





دانشکده مهندسی عمران

رشته مهندسی عمران گرایش سازه‌های هیدرولیکی

پایان نامه کارشناسی ارشد

بررسی آزمایشگاهی و عددی تأثیر شیب کانال اصلی بر ضریب آبگذری سرریزهای جانبی
لبه تیز مرکب مثلثی _ مستطیلی

نگارنده : سینا شکری

اساتید راهنما:

دکتر امیرعباس عابدینی

دکتر احمد احمدی

استاد مشاور:

دکتر مجتبی عامری

تیرماه ۱۳۹۵

تقدیم‌نامه

تقدیم به خدایی که آفرید

جهان را، انسان را، عقل را، علم را، معرفت را، عشق را ...

و به کسانی که عشقشان را در وجودم دمید

تقدیم به پدر بزرگوار و مادر مهربانم

تشکر و قدردانی

بر خود واجب می‌دانم که از زحمات اساتید فرهیخته و فرزانه جناب آقایان دکتر امیرعباس عابدینی و جناب دکتر احمد احمدی و همچنین مشاور ارجمند این تحقیق جناب دکتر مجتبی عامری کمال تشکر را داشته باشم.

و با تشکر خالصانه خدمت همه کسانی که به نوعی مرا در به انجام رساندن این مهم یاری نموده‌اند.

سینا شکری

تیرماه ۱۳۹۵

تعهد نامه

اینجانب سینا شکری دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته مهندسی عمران دانشکده مهندسی عمران دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان نامه بررسی آزمایشگاهی و عددی تاثیر شیب طولی کانال بر ضریب آبگذری سرریزهای جانبی لبه تیز مرکب مثلثی - مستطیلی تحت راهنمایی دکتر امیرعباس عابدینی و دکتر احمد احمدی متعهد می شوم.

- تحقیقات در این پایان نامه توسط اینجانب انجام شده است و از صحت و اصالت برخوردار است.
- در استفاده از نتایج پژوهشهای محققان دیگر به مرجع مورد استفاده استناد شده است.
- مطالب مندرج در پایان نامه تاکنون توسط خود یا فرد دیگری برای دریافت هیچ نوع مدرک یا امتیازی در هیچ جا ارائه نشده است.
- کلیه حقوق معنوی این اثر متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می باشد و مقالات مستخرج با نام « دانشگاه صنعتی شاهرود » و یا « Shahrood University of Technology » به چاپ خواهد رسید.
- حقوق معنوی تمام افرادی که در به دست آمدن نتایج اصلی پایان نامه تأثیرگذار بوده اند در مقالات مستخرج از پایان نامه رعایت می گردد.
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه ، در مواردی که از موجود زنده (یا بافتهای آنها) استفاده شده است ضوابط و اصول اخلاقی رعایت شده است.
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه، در مواردی که به حوزه اطلاعات شخصی افراد دسترسی یافته یا استفاده شده است اصل رازداری ، ضوابط و اصول اخلاق انسانی رعایت شده است

تاریخ

امضای دانشجو

مالکیت نتایج و حق نشر

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

چکیده

سرریز جانبی یکی از معمول ترین سازه های کنترل و انحراف جریان در شبکه های آبیاری و زهکشی و کانال های انتقال آب و فاضلاب است. جریان در سرریز جانبی مثالی از جریان متغیرمکانی با کاهش دبی می باشد. سرریز جانبی لبه تیز مرکب مثلثی - مستطیلی از انواع سرریزهای جانبی می باشد. در این پژوهش اقدام به بررسی پارامترهای موثر بر ضریب دبی سرریزهای جانبی شامل شیب طولی کانال (S_0)، عدد فرود جریان (Fr_1)، نسبت ارتفاع وزنی تاج سرریز به عمق جریان ($\frac{\bar{w}}{y_1}$)، نسبت طول سرریز به عمق جریان ($\frac{l}{y_1}$) در بالادست سرریز گردید. بررسی نتایج آزمایشگاهی سه شیب مختلف ۰/۰۰۱، ۰/۰۰۲، ۰/۰۰۳ در شرایط زیر بحرانی نشان داد تأثیر شیب طولی کانال بر مقادیر دبی محاسباتی ناچیز بوده و حذف آن از آنالیز ابعادی تأثیری بر دقت محاسبات سرریز جانبی لبه تیز مثلثی مستطیلی نداشته است. با استفاده از آنالیز ابعادی و روش رگرسیون غیرخطی، ضریب دبی تعیین و مقایسه نتایج حاصل از ضرایب دبی محاسباتی با داده های آزمایشگاهی نشان دهنده دقت بالای آن در تخمین دبی عبوری از سرریز جانبی مرکب است. جهت کاهش هزینه اقتصادی و زمانی، با استفاده از نرم افزار FLOW-3D به شبیه سازی سرریز جانبی لبه تیز مرکب مثلثی - مستطیلی پرداخته و در این شبیه سازی از مدل آشفتگی RNG K-ε استفاده شده است. هدف از این تحقیق مقایسه نتایج به دست آمده از مدل عددی با نتایج آزمایشگاهی بر اساس میزان دبی عبوری از روی تاج سرریز می باشد. نتایج نشان داد که میزان خطای بین نتایج مدل عددی با نتایج آزمایشگاهی بین ۰/۸۳ تا ۱/۴۴ می باشد که این میزان نشان دهنده تطابق مناسب و مؤید صحت مدل سازی می باشد.

کلمات کلیدی: سرریز جانبی مرکب، ارتفاع وزنی تاج، شیب طولی کانال، تحلیل ابعادی، مدل

آزمایشگاهی، جریان زیربحرانی، FLOW-3D، مدل آشفتگی RNG K-ε.

بررسی آزمایشگاهی اثرشیب طولی کانال بر ضریب آبگذری سرریزهای جانبی لبه تیز مرکب مثلثی - مستطیلی

سینا شکری، دانشجوی ارشد سازه‌های هیدرولیکی دانشکده عمران، دانشگاه صنعتی شاهرود*

احمد احمدی، دانشیار دانشکده عمران، دانشگاه صنعتی شاهرود

امیرعباس عابدینی، استادیار دانشکده عمران، دانشگاه صنعتی شاهرود

مجتبی عامری، استادیار گروه عمران، دانشگاه آزاد واحد شاهرود

*تلفن نویسنده اصلی: ۰۹۳۸۲۱۱۲۶۳۷ پست الکترونیکی: sinashokri70@yahoo.com

فهرست مطالب:

فصل اول: مقدمه و کلیات.....	۱
۱-۱ مقدمه.....	۲
۲-۱ انواع سرریزها و اهداف استفاده از آنها.....	۳
۱-۲-۱ سرریزهای لبه تیز.....	۴
۲-۲-۱ سرریزهای لبه پهن.....	۴
۳-۲-۱ سرریزهای ساده.....	۵
۴-۲-۱ سرریزهای مرکب.....	۶
۵-۲-۱ سرریز جانبی.....	۶
۶-۲-۱ سرریز نرمال.....	۷
۷-۲-۱ سرریز مورب.....	۸
۸-۲-۱ اهداف استفاده از سرریزها.....	۸
۳-۱ اهداف پایان نامه.....	۹
۴-۱ طرح بندی پایان نامه.....	۱۰
فصل دوم: تئوری جریان‌های متغیر مکانی و مروری بر مطالعات پیشین.....	۱۱
۱-۲ مقدمه.....	۱۲
۲-۲ تئوری جریان‌های متغیر مکانی.....	۱۲
۱-۲-۲ تعریف.....	۱۲
۱-۱-۲-۲ جریان متغیر مکانی با کاهش دبی.....	۱۲
۱-۱-۲-۲-۱ معادله دینامیکی جریان متغیر مکانی با کاهش دبی.....	۱۳
۲-۲-۲ پروفیل‌های جریان روی سرریز جانبی.....	۱۴
۳-۲ مروری بر مطالعات پیشین.....	۱۵
۱-۳-۲ مقدمه.....	۱۵
۲-۳-۲ مطالعات آزمایشگاهی.....	۱۵
۱-۲-۳-۲ مطالعات انجام گرفته در زمینه سرریزهای جانبی لبه تیز ساده.....	۱۵
۲-۲-۳-۲ مطالعات انجام گرفته در زمینه سرریزهای لبه تیز مرکب.....	۲۳
۱-۲-۲-۳-۲ سرریزهای لبه تیز نرمال مرکب.....	۲۳
۲-۲-۲-۳-۲ سرریزهای لبه تیز جانبی مرکب.....	۲۴
۳-۳-۲ مطالعات عددی.....	۳۰
فصل سوم: مواد و روش‌ها.....	۳۵

۳۶.....	مقدمه	۱-۳
۳۶.....	ضریب دبی مستقیم در سرریزهای ساده	۲-۳
۳۶.....	۱-۲-۳ ضریب دبی مستقیم در سرریز لبه تیز مستطیلی	۲-۳
۳۸.....	۲-۲-۳ ضریب دبی مستقیم در سرریز لبه تیز مثلثی	۲-۳
۴۱.....	ضریب دبی مستقیم در سرریز مرکب مثلثی - مستطیلی	۳-۳
۴۳.....	ضریب دبی دیمارچی در سرریزهای ساده مستطیلی و مثلثی	۴-۳
۴۶.....	ضریب دبی دیمارچی در سرریز مرکب مثلثی - مستطیلی	۵-۳
۴۶.....	۱-۵-۳ معادل نمودن سرریز مرکب با یک سرریز مستطیلی	۵-۳
۴۸.....	آنالیز ابعادی	۶-۳
۴۹.....	۱-۶-۳ آنالیز ابعادی ضریب دبی در سرریز جانبی لبه تیز مرکب مثلثی - مستطیلی	۶-۳
۵۲.....	محدوده پارامترهای هیدرولیکی و هندسی آزمایش‌ها	۷-۳
۵۳.....	دستگاه‌ها و تجهیزات آزمایشگاه	۸-۳
۵۹.....	نحوه استخراج روابط در روش‌های مستقیم و دیمارچی	۹-۳
۶۰.....	آمارهای ارزیابی خطا	۱۰-۳
۶۱.....	معرفی نرم‌افزار FLOW - 3D	۱۱-۳
۶۳.....	معادلات حاکم بر جریان آشفته	۱۲-۳
۶۳.....	۱-۱۲-۳ معادله متوسط رینولدز ناویر استوکس (RANS)	۱۲-۳
۶۵.....	۲-۱۲-۳ معادله انرژی آشفته	۱۲-۳
۶۶.....	انواع مدل‌های آشفته	۱۳-۳
۶۷.....	۱-۱۳-۳ مدل‌های صفر معادله‌ای	۱۳-۳
۶۷.....	۲-۱۳-۳ مدل‌های یک معادله‌ای	۱۳-۳
۶۷.....	۳-۱۳-۳ مدل‌های دو معادله‌ای	۱۳-۳
۶۸.....	۴-۱۳-۳ مدل‌های دارای معادله‌ی تنش	۱۳-۳
۶۸.....	۵-۱۳-۳ مدل‌های شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ	۱۳-۳
۶۹.....	مدل‌های آشفته در نرم‌افزار FLOW - 3D	۱۴-۳
۶۹.....	مدل RNG k-ε	۱-۱۴-۳
۷۱.....	فصل چهارم: بحث و نتایج	

۱-۴	مقدمه	۷۲
۲-۴	نتایج مدل آزمایشگاهی	۷۲
۱-۲-۴	ضریب دبی در سرریز جانبی لبه تیز مرکب مثلثی - مستطیلی و محاسبه دبی عبوری از آن	۷۲
۱-۱-۲-۴	ضریب دبی عبوری متوسط سرریز مرکب مثلثی - مستطیلی به روش مستقیم	۷۲
۲-۱-۲-۴	ضریب دبی عبوری دیمارچی در سرریز مرکب مثلثی - مستطیلی	۷۹
۳-۱-۲-۴	کنترل فرض ناچیز بودن انرژی در طول سرریز مرکب مثلثی - مستطیلی	۸۴
۲-۲-۴	بررسی اثر شیب طولی کانال بر دقت محاسباتی دبی	۸۵
۳-۴	نتایج مدل عددی	۸۶
۱-۳-۴	مشخصات مدل برای شبیه سازی	۸۶
۲-۳-۴	زمان شبیه سازی	۸۷
۳-۳-۴	تنظیمات نرم افزار و فیزیک مدل سازی	۸۷
۱-۳-۳-۴	تنظیمات اندازه گیری دبی خروجی	۸۷
۴-۳-۴	مشخصات میدان حل	۸۸
۱-۴-۳-۴	مدل سازی	۸۸
۲-۴-۳-۴	شبکه بندی	۸۹
۳-۴-۳-۴	شرایط مرزی	۹۰
۵-۳-۴	بررسی نتایج و صحت سنجی	۹۴
	فصل پنجم: نتیجه گیری و پیشنهادات	۹۷
۱-۵	نتیجه گیری	۹۸
۲-۵	پیشنهادات	۹۹

منابع

فهرست اشکال:

- شکل (۱-۱) نمونه‌ای از سرریز لبه تیز..... ۴
- شکل (۲-۱) نمونه‌ای از سرریز لبه پهن..... ۵
- شکل (۳-۱) نمونه‌ای از سرریز جانبی..... ۷
- شکل (۴-۱) نمونه‌ای از سرریز نرمال مستطیلی..... ۷
- شکل (۴-۱) نمونه‌ای از سرریز نرمال مثلثی..... ۸
- شکل (۱-۲) شماتیک پروفیل سطح آب در حین عبور از روی سرریز جانبی..... ۱۵
- شکل (۲-۲) نمایی کلی از یک سرریز جانبی (سابرامانیا و آواستی، ۱۹۷۲)..... ۱۷
- شکل (۳-۲) نمودار مقایسه نتایج دبی جریان محاسباتی با مقادیر آزمایشگاهی بر اساس رابطه (۲-۱۵) (برقی و همکاران ۱۹۹۹)..... ۲۱
- شکل (۴-۲) نمودار مقایسه نتایج دبی جریان محاسباتی با مقادیر آزمایشگاهی بر اساس رابطه (۲-۱۶) (برقی و همکاران ۱۹۹۹)..... ۲۱
- شکل (۵-۲) رابطه دبی اندازه‌گیری شده با دبی محاسبه شده (برقی و صالحی، ۱۳۸۲)..... ۲۲
- شکل (۶-۲) رابطه ضریب دبی سرریز با عدد فرود (برقی و صالحی، ۱۳۸۲)..... ۲۲
- شکل (۷-۲) سرریز جانبی لبه تیز مرکب با مقطع مستطیلی - مستطیلی (باقری و همکاران ۱۳۹۱)..... ۲۵
- شکل (۸-۲) مقایسه نتایج محاسباتی و آزمایشگاهی ضریب دبی سرریز جانبی مرکب (ظهیری و همکاران، ۲۰۱۳)..... ۲۶
- شکل (۹-۲) مقایسه نتایج ضریب دبی به دست آمده از روابط سرریزهای جانبی ساده با مقادیر آزمایشگاهی..... ۲۷
- شکل (۱۰-۲) مقایسه نتایج دبی جریان به دست آمده از روابط سرریزهای جانبی ساده با مقادیر آزمایشگاهی..... ۲۷
- شکل (۱۱-۲) مقایسه مقادیر ضریب دبی محاسباتی با نتایج آزمایشگاهی..... ۲۸
- شکل (۱۲-۲) مقایسه مقادیر دبی محاسباتی با مقادیر آزمایشگاهی..... ۲۸
- شکل (۱۳-۲) مقایسه مقادیر دبی براساس ضریب دبی با نتایج آزمایشگاهی..... ۲۹
- شکل (۱۴-۲) نمودار ترسیم ضرایب دبی برای سرریزهای لبه تیز مقابل H_t/t_w ۳۲
- شکل (۱-۳) جریان از روی سرریز لبه تیز..... ۳۷
- شکل (۲-۳) سرریز لبه تیز مستطیلی..... ۳۷

- شکل (۳-۳) سرریز لبه تیز مثلثی شکل..... ۳۹
- شکل (۴-۳) شمای یک سرریز لبه تیز مثلثی..... ۴۰
- شکل (۵-۳) مقادیر K_H بر حسب زاویه θ ۴۰
- شکل (۶-۳) مقادیر C_{de} بر حسب زاویه θ ۴۱
- شکل (۷-۳) سرریز مرکب مثلثی - مستطیلی..... ۴۲
- شکل (۸-۳) شمای یک سرریز کناری..... ۴۳
- شکل (۹-۳) معادل نمودن سرریز مرکب مثلثی - مستطیلی با یک سرریز مستطیلی..... ۴۷
- شکل (۱۰-۳) سرریز جانبی لبه تیز مرکب با مقطع مثلثی - مستطیلی..... ۵۰
- شکل (۱۱-۳) فلومتر آلتراسونیک مذکور به همراه اتصال نوع V سنسورها..... ۵۵
- شکل (۱۲-۳): عمق سنج دیجیتالی..... ۵۶
- شکل (۱۳-۳): مجموعه فلوم به همراه تجهیزات جانبی آن..... ۵۷
- شکل (۱-۴) شماتیک سرریز مرکب مثلثی - مستطیلی..... ۷۳
- شکل (۲-۴) مقایسه ضریب دبی محاسباتی و مشاهداتی با سه شیب مختلف برای مقطع ۶۰ درجه با استفاده از روابط (۴-۴)..... ۷۵
- شکل (۳-۴) مقایسه ضریب دبی محاسباتی و مشاهداتی با سه شیب مختلف برای مقطع ۹۰ درجه با استفاده از روابط (۴-۴)، (۳-۴) و (۴-۴)..... ۷۵
- شکل (۴-۴) مقایسه دبی بر اساس رابطه (۴-۴) و (۸-۴) با مقادیر مشاهداتی..... ۷۶
- شکل (۵-۴) نمودارهای ضریب دبی در مقابل پارامترهای Fr_1 ، $\frac{\bar{w}}{y_1}$ ، $\frac{l}{y_1}$ با استفاده از رابطه (۸-۴)..... ۷۷
- شکل (۶-۴) نمودارهای ضریب دبی در مقابل پارامترهای Fr_1 ، $\frac{\bar{w}}{y_1}$ ، $\frac{l}{y_1}$ با استفاده از رابطه (۹-۴)..... ۷۷
- ادامه شکل (۶-۴)..... ۷۸
- شکل (۷-۴) مقایسه ضریب دبی محاسباتی و مشاهداتی با سه شیب مختلف برای مقطع ۶۰ درجه با استفاده از روابط (۴-۴)، (۱۰-۴)، (۱۱-۴) و (۱۲-۴)..... ۸۰
- شکل (۸-۴) مقایسه ضریب دبی محاسباتی و مشاهداتی با سه شیب مختلف برای مقطع ۹۰ درجه با استفاده از روابط (۴-۴)، (۱۳-۴)، (۱۴-۴) و (۱۵-۴)..... ۸۱

- شکل (۹-۴) مقایسه دبی بر اساس رابطه (۱۶-۴) و (۱۷-۴) با مقادیر مشاهدات..... ۸۲
- شکل (۱۰-۴) نمودارهای ضریب دبی در مقابل پارامترهای FT_1 , $\frac{\bar{w}}{y_1}$, $\frac{l}{y_1}$ با استفاده از رابطه (۱۶-۴)..... ۸۲
- ادامه شکل (۱۰-۴)..... ۸۳
- شکل (۱۱-۴) نمودارهای ضریب دبی در مقابل پارامترهای FT_1 , $\frac{\bar{w}}{y_1}$, $\frac{l}{y_1}$ با استفاده از رابطه (۱۷-۴)..... ۸۳
- شکل (۱۲-۴) تغییرات انرژی مخصوص بالادست و پایین دست جریان در سرریزهای مرکب مثلثی - مستطیلی..... ۸۵
- شکل (۱۳-۴) مقایسه دبی محاسباتی و مشاهداتی بر اساس ضرایب دبی مستقیم پیشنهادی برای سه شیب طولی مختلف..... ۸۵
- شکل (۱۴-۴) مقایسه دبی محاسباتی و مشاهداتی بر اساس ضرایب دبی دیمارچی پیشنهادی برای سه شیب طولی مختلف..... ۸۶
- شکل (۱۵-۴) محل قرارگیری Baffle در روی تاج سرریز در حالت FAVOR..... ۸۸
- شکل (۱۶-۴) مدل ساخته شده در نرم افزار..... ۸۸
- شکل (۱۷-۴) مش‌های مدل سازی..... ۹۰
- شکل (۱۸-۴) نمودار تغییرات دبی عبوری از سرریز مرکب نسبت به زمان..... ۹۴
- شکل (۱۹-۴) نمودار تغییرات دبی نسبت به شیب طولی کانال..... ۹۵

فهرست جداول:

- جدول (۱-۳) محدوده آزمایشات سرریز جانبی لبه تیز مرکب مثلثی - مستطیلی..... ۵۲
- جدول (۲-۳) مشخصات هندسی مقاطع سرریز..... ۵۳
- جدول (۱-۴) مقادیر انواع آماره‌های ارزیابی دبی محاسباتی سرریز جانبی لبه تیز مرکب مثلثی - مستطیلی..... ۷۸
- جدول (۲-۴) مقادیر انواع آماره‌های ارزیابی دبی محاسباتی سرریز جانبی لبه تیز مرکب مثلثی - مستطیلی به روش
دیمارچی..... ۸۴
- جدول (۳-۴) مشخصات هندسی سرریز مورد مطالعه..... ۸۶
- جدول (۴-۴) مقادیر شرایط مرزی مینیمم X در سه شیب طولی مختلف..... ۹۱
- جدول (۵-۴) مقادیر عمق جریان در انتهای پایین دست کانال برای سه شیب طولی مختلف..... ۹۱
- جدول (۶-۴) مقایسه نتایج مدل عددی و نتایج آزمایشگاهی..... ۹۵

فهرست علائم

B	عرض کانال اصلی
b_1	طول تاج سرریز در کناره‌های سرریز مرکب
b_2	طول تاج سرریز در بخش میانی سرریز مرکب
C_d	ضریب دبی مستقیم
C_m	ضریب دبی دیمارچی
E	درصد میانگین خطا
Fr_1	عدد فرود جریان در بالادست سرریز
g	شتاب ثقل
L	طول سرریز
N	تعداد داده‌ها
Q	دبی در کانال اصلی
Q_1	دبی بالادست سرریز در کانال اصلی
Q_2	دبی پایین‌دست سرریز در کانال اصلی
S_f	شیب خط انرژی
S_0	شیب طولی کانال
w_1	ارتفاع تاج سرریز در بخش میانی
w_2	ارتفاع تاج سرریز در کناره‌ها
\bar{w}	ارتفاع وزنی تاج سرریز مرکب

y عمق جریان

α ضریب تصحیح سرعت در معادله انرژی

ρ جرم حجمی سیال

θ زاویه رأس سرریز مثلثی

فصل اول:

مقدمه و کلیات

۱-۱ مقدمه

در مقاطعی از رودخانه‌ها، کانال‌های آبیاری و زه‌کشی، کانال‌های انتقال فاضلاب و آب‌های سطحی ممکن است جریان بیشتر از دبی ظرفیت کانال یا رودخانه شود. در چنین مواردی جهت کنترل و یا حفظ کانال یا رودخانه، از سازه‌های کنترل دبی همانند سرریز جانبی استفاده می‌شود. سرریزهای جانبی^۱ به صورت موازی جهت جریان در دیواره آبراهه یا کانال انتقال آب نصب می‌شوند و ارتفاع آن کمتر از ارتفاع کانال می‌باشد و زمانی آبدگیری توسط سرریز آغاز می‌گردد که عمق جریان از ارتفاع لبه تاج سرریز بیشتر شود. این عملکرد باعث تنظیم دبی و کنترل سطح آب در کانال اصلی خواهد شد. کنترل و انحراف سیلاب در مخازن سدها، انحراف جریان و محافظت کانال‌ها و رودخانه‌ها در برابر سیلاب‌ها از دیگر موارد کاربرد سرریزهای جانبی می‌باشد. سرریزهای جانبی لبه‌تیز مستطیلی و مثلثی ساده از قدیمی‌ترین و پرکاربردترین سرریزها محسوب می‌شوند که در مورد آنها تحقیقات گسترده‌ای تاکنون انجام گرفته است. سرریز مستطیلی توانایی عبور دبی بیشتری را نسبت به نوع مثلثی دارد ولی دقت اندازه‌گیری دبی عبوری در نوع مثلثی بیشتر است. از معایب سرریزهای ساده عدم بازدهی کافی در شرایط نوسانات شدید عمق جریان است. جهت رفع این مشکل می‌توان از سرریزهای مرکب^۲ استفاده نمود. از خصوصیات سرریزهای جانبی لبه‌تیز مرکب اندازه‌گیری دقیق دبی جریان عبوری برای آبدگیری مناسب از کانال و توانایی آن در خروج میزان قابل توجهی از جریان در مکان‌هایی است که به عنوان سازه حفاظتی بکار می‌رود. سرریز جانبی ساده به طور همزمان این دو خصوصیت را دارا نمی‌باشد، به طوری که اگر عرض سرریز کوچک باشد، فقط برای اندازه‌گیری جریان مناسب است و اگر عرض سرریز بزرگ در نظر گرفته شود، فقط برای تخلیه سریع سیلاب مناسب بوده و دقت اندازه‌گیری دبی کاهش می‌یابد. سرریزهای جانبی لبه‌تیز مرکب با اشکال هندسی مختلفی (مستطیلی - مستطیلی، مثلثی - مستطیلی، مثلثی -

¹ Side weirs

² Compound weirs

مثلی ...) به صورت آزمایشگاهی در شرایط جریان زیربحرانی^۳ مورد مطالعه قرار گرفتند. مهمترین امتیازات هیدرولیکی سرریزهای جانبی لبه تیز مرکب مثلی - مستطیلی عبارتند از: ۱. در جریانهای کم به صورت یک سرریز مثلی عمل نموده و در مقایسه با سرریزهای مستطیلی یا دوزنقه‌ای بار هیدرولیکی بیشتری را در بالادست سرریز ایجاد نموده و اندازه‌گیری دبی جریان را با حساسیت و دقت بالاتری میسر می‌سازد. ۲. در جریانهای زیاد دهانه فوقانی مستطیل شکل مانع از افزایش زیاد سطح آب بالادست سرریز و برگشت آب گردیده و اندازه‌گیری دبی‌های زیاد را با دقت قابل قبول میسر می‌سازد.

مدل‌سازی‌های آزمایشگاهی دارای هزینه‌های اقتصادی و زمانی بوده‌اند. با پیشرفت فناوری و افزایش یافتن قدرت کامپیوترهای امروزی، نرم‌افزارهای متعددی بوجود آمده‌اند که قادر به شبیه‌سازی مسائل هیدرولیکی می‌باشند که از جمله این نرم‌افزارها می‌توان نرم‌افزار FLOW-3d نام برد که مبتنی بر اصول دینامیک سیالات محاسباتی (CFD) طراحی شده است. با افزایش روند پیشرفت کامپیوترها به نظر می‌رسد استفاده از روش‌های عددی جایگزین مناسبی برای مدل‌های فیزیکی باشد.

۱-۲ انواع سرریزها (Types of weirs) و اهداف استفاده از آن

سرریزها را بر حسب شکل تاج و این که آیا تمام یا قسمتی از عرض کانال را گرفته‌اند، تقسیم بندی می‌نمایند. در معمول‌ترین تقسیم بندی‌ها، سرریزها به دو گروه ((سرریزهای لبه تیز^۴)) و ((سرریزهای لبه پهن^۵)) تقسیم می‌شوند. همچنین سرریزها از نظر شکل هندسی به ((سرریزهای ساده)) و ((سرریزهای مرکب)) و از نظر موقعیت قرارگیری در کانال می‌توانند به ((سرریز جانبی))، ((سرریز نرمال^۶)) و ((سرریز مورب^۷)) تقسیم شوند.

³ Subcritical Flow

⁴ Sharp Crested weirs

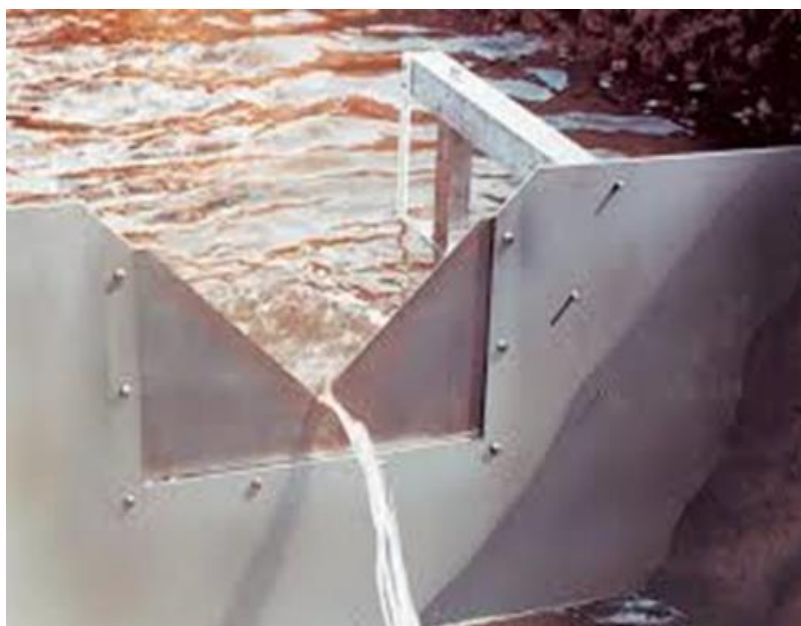
⁵ Broad crested weirs

⁶ Normal weir

⁷ Oblique weir

۱-۲-۱ سرریزهای لبه تیز (sharp crested weirs)

این نوع سرریزها عموماً از یک صفحه قائم کار گذاشته شده در مسیر جریان تشکیل شده که دارای لبه و تاجی نسبتاً تیز در بالا (محلی که آب از روی آن عبور می کند) می باشد. سرریزهای لبه تیز علاوه بر این که به عنوان یک وسیله‌ی اندازه‌گیری دبی در کانال باز، مورد استفاده قرار می گیرند، به عنوان یک سرریز که باعث افزایش ارتفاع و حجم آب در بالادست شده و آب از روی آن می‌گذرد (Overflow spillway) نیز به کار می‌روند و از آن جا که تئوری هیدرولیکی مربوط به این سرریزها به عنوان پایه و اساس محاسبات و طراحی سرریزهای لبه‌پهن (سرریز سدها) به کار می‌رود، از اهمیت خاصی برخوردارند. شکل (۱-۱) نمونه‌ای از سرریز لبه تیز را نشان می‌دهد.



شکل (۱-۱): سرریز لبه تیز

۱-۲-۲ سرریزهای لبه پهن (Broad – crested weirs)

در این نوع سرریزها، لبه سرریز به اندازه کافی پهن بوده و در مقایسه با سایر ابعاد، دارای اندازه قابل ملاحظه‌ای می‌باشد شکل (۲-۱). تاج سرریزهای لبه‌پهن افقی و یا دارای انحناء خاصی بوده و اگرچه

برای اندازه‌گیری دبی نیز مورد استفاده قرار می‌گیرند اما بیشتر به عنوان سرریز سدها و گاه به عنوان خود سد (در صورتی که آب مجاز به گذشتن از روی آن باشد) به کار می‌روند و در هر حال می‌توان در مواقع لزوم برای ذخیره نمودن حجم‌های زیاد آب و ارتفاع‌های بالا، از سرریزهای لبه‌پهن استفاده نمود.



شکل (۱-۲): سرریز لبه‌پهن

۱-۲-۳ سرریزهای ساده^۸

سرریزهای ساده می‌توانند به شکل‌های مستطیلی، مثلثی، دوزنقه‌ای، سهموی و... ساخته شوند.

الف) سرریزهای مستطیلی^۹: این سرریزها یکی از قدیمی‌ترین انواع سرریزهای منفرد است که در سازه‌های انتقال و رودخانه‌ها جهت تنظیم عمق آب بالادست و همچنین اندازه‌گیری دبی مورد استفاده قرار می‌گیرد.

ب) سرریزهای مثلثی^{۱۰}: این سرریزها نیز همچون سرریز مستطیلی از گذشته دور تاکنون به عنوان یکی

⁸ Single Section

⁹ Rectangular

¹⁰ Triangular

از تجهیزات اندازه‌گیری شدت جریان مورد توجه و استفاده قرار داشته است. زوایای رأس این سرریز معمولاً ۳۰، ۴۵، ۶۰، ۹۰ و ۱۲۰ درجه است که با داشتن پارامترهای هیدرولیکی و هندسی آن امکان تخمین دبی عبوری را فراهم می‌نماید. از مزایای این سرریز دقت بیشتر در اندازه‌گیری دبی است. (پ) سرریزهای ذوزنقه‌ای^{۱۱}: این نوع سرریز بیشتر در کانال‌های انتقال آب کشاورزی بکار گرفته می‌شوند. از مزایای این سرریزها امکان عبور بیشتر دبی است.

۴-۲-۱ سرریزهای مرکب

این سرریزها از ترکیب سرریزهای ساده ساخته می‌شوند، به طوری که ابعاد بخش پایینی سرریز کوچکتر از قسمت فوقانی آن است. سرریزهای مرکب عموماً دارای دو تاج در ارتفاع از کف متفاوت هستند. از ویژگی‌های مهم این نوع سرریزها امکان اندازه‌گیری دبی جریان است، اما این مهم مستلزم شناخت دقیق رفتار هیدرولیکی و پارامترهای مؤثر بر تعیین دبی عبوری از سرریزهای جانبی است. سرریزهای مرکب بر اساس شکل هندسی تقسیم بندی می‌شوند که متداول‌ترین آنها عبارت‌اند از:

الف) مستطیلی - مستطیلی

ب) مثلثی - مستطیلی

ج) مثلثی - مثلثی

د) مثلثی - ذوزنقه ای

۵-۲-۱ سرریز جانبی

سرریز جانبی سازه‌های هیدرولیکی است که در راستای جریان و دیواره جانبی کانال نصب می‌شود تا علاوه بر انحراف جریان امکان اندازه‌گیری دبی عبوری از خود را نیز فراهم نماید. شکل (۱-۳) نمونه‌ای

¹¹ Trapezoidal

از سرریز جانبی می‌باشد.



شکل (۱-۳): سرریز جانبی

۱-۲-۶ سرریز نرمال

الف - سرریز نرمال: عمود بر راستای اصلی جریان در کانال نصب شده و بسیار مورد استفاده قرار می‌گیرند.

تعریف سرریز نرمال: هر مانعی که بر سر راه جریان در کانال قرار گیرد و باعث شود تا آب در پشت آن بالا آمده و بر سرعت آب در ضمن عبور از روی آن افزوده گردد، سرریز نرمال نامیده می‌شود. اشکال (۱-۴ الف و ب) نمونه‌هایی از سرریز نرمال مثلثی و مستطیلی در طبیعت را نشان می‌دهد



شکل (۱-۴ الف): نمونه‌ای از سرریز نرمال مستطیلی



شکل (۱-۴ب): نمونه‌ای از سرریز نرمال مثلثی

۷-۲-۱ سرریز مورب

جهت سرریز دارای زاویه‌ای کمتر از ۹۰ درجه با امتداد اصلی جریان در کانال است. مهم‌ترین کاربرد این سرریزها کنترل و کاهش نوسانات جریان عبوری از دهانه‌های آبگیر بدون دریچه تنظیم در رودخانه های فصلی با جریان‌های متغیر می‌باشد. در این سرریزها امکان استفاده از طول سرریز نسبت به سرریزهای نرمال به دلیل مورب بودن بیشتر است.

۸-۲-۱ اهداف استفاده از سرریزها

الف) قابلیت اندازه‌گیری نسبتاً دقیق دبی عبوری

ب) انحراف جریان

ج) تنظیم عمق آب بالادست آن

د) هدایت سیلاب و تخلیه جریان

ه) سهولت ساخت و نصب آن

۱-۳ اهداف پایان نامه

اهداف پایان نامه را می توان در پاسخ به چند سؤال زیر بیان کرد:

(۱) شیب طولی کانال چه تأثیری بر ضریب دبی سرریز مرکب دارد؟

از آنجایی که در بیشتر تحقیقات گذشته بر روی سرریزهای ساده از تأثیر شیب طولی کانال بر مقادیر دبی عبوری به روش های مستقیم و دیمارچی صرف نظر گردیده، آزمایش ها در سه شیب طولی متفاوت برای برخی از مقاطع اثر این پارامتر در روابط سرریزهای مرکب بررسی می شود.

(۲) در هریک از روش های محاسبه دبی عبوری از سرریز، ضریب دبی به چه پارامترهایی وابسته است؟ برای ارائه روابط تعیین ضریب دبی، یافتن پارامترهای مؤثر بر آن بسیار ضروری است. در روابط پیشنهادی محققین مختلف برای سرریزهای ساده، پارامترهای بی بعد مؤثر متعددی مدنظر قرار گرفته است که برخی از آنها همچون عدد فرود جریان در بالادست سرریز عمومیت بیشتری دارد. یکی از روش های متداول برای تعیین پارامترهای بی بعد مؤثر استفاده از روش آنالیز ابعادی است. شاید بتوان ادعان کرد که شرایط هیدرولیکی و هندسی آزمایش ها در تعیین این پارامترهای بی بعد تأثیرگذار باشد. به عبارتی هرچقدر مشخصات هندسی سرریزها و کانال به همراه شرایط هیدرولیکی جریان متنوع تر باشد بررسی پارامترهای مؤثر نیز جامع تر خواهد بود که لحاظ آن در روابط سبب افزایش بیشتر دقت محاسبات می گردد. در این پژوهش تلاش شده است با متنوع نمودن مشخصات هندسی سرریزها، فلوم و شرایط جریان آزمایش ها تأثیر پارامترهای بی بعد مؤثر با دقت بیشتری کنترل گردد.

(۳) شبیه سازی سه بعدی جریان بر روی سرریز جانبی لبه تیز مرکب مثلثی - مستطیلی در کانال

رو باز مستطیلی با استفاده از نرم افزار Flow-3d چه عملکردی دارد؟

در تحقیقات گذشته محمدیان و همکاران (۱۳۹۳) بر روی سرریز جانبی مرکب مستطیلی - مستطیلی به این نتیجه رسیدند که شبیه سازی با نرم افزار Flow-3d دارای دقت و کارایی مناسبی است.

(۴) مقایسه نتایج بدست آمده از شبیه سازی عددی با نتایج آزمایشگاهی؟

تحقیقات بسیاری در زمینه شبیه‌سازی عددی سرریزها انجام شده است و مقایسه نتایج آزمایشگاهی با مدل عددی نشان داد که میزان خطای آن‌ها کم بوده و انطباق خوبی با هم دارند. از جمله این تحقیقات می‌توان به نتایج محمدیان و همکاران (۱۳۹۳) اشاره نمود که در زمینه‌ی شبیه‌سازی عددی جریان از روی سرریز جانبی لبه‌تیز مرکب با استفاده از نرم‌افزار Flow-3d است.

۱-۴ طرح بندی پایان نامه

پایان نامه در پنج فصل نگارش و تدوین شده است. فصل اول که شامل مقدمه و کلیات بود. تئوری جریان‌های متغیر مکانی و مروری بر مطالعات پیشین آزمایشگاهی و عددی در فصل دوم ارائه شده است. فصل سوم شامل دو بخش است که بخش اول روش‌های محاسبه ضرایب دبی و آنالیز ابعادی به همراه معرفی تجهیزات و دستگاه‌های مورد استفاده و نحوه انجام آزمایش‌ها و آمارهای ارزیابی خطا ارائه می‌گردد و بخش دوم معرفی نرم افزار Flow-3d، معادلات حاکم بر جریان آشفتنه، انواع مدل‌های آشفتگی به همراه مدل‌های آشفتگی موجود در نرم افزار را شامل می‌گردد. نتایج تحقیق و تفسیر آن در فصل چهارم ارائه شده است و فصل پنجم هم نتیجه‌گیری و پیشنهادها را دربرمی‌گیرد. منابع مورد استفاده در تحقیق به همراه مقاله استخراج شده از این پژوهش و فهرست علائم نیز به صورت پیوست ارائه گردیده است.

فصل دوم:

تئوری جریان های متغیر مکانی

و

مروری بر مطالعات پیشین

۱-۲ مقدمه

در این فصل پس از معرفی جریان متغیرمکانی، تئوری این جریان بیان می‌شود. و معادله حاکم بر این جریان مورد مطالعه قرار می‌گیرد. در ادامه به بررسی جریان متغیرمکانی با کاهش دبی و انواع پروفیل های تشکیل شده روی سرریز جانبی مورد بررسی قرار گرفته و در انتها مطالعات پیشین آزمایشگاهی و عددی درباره‌ی سرریزهای جانبی بیان می‌شود.

۲-۲ تئوری جریان های متغیرمکانی

۱-۲-۲ تعریف

جریان متغیرمکانی، حالتی از جریان دائمی است که شدت جریان در جهت جریان و در طول مسیر افزایش یا کاهش می‌یابد. بدین ترتیب جریان متغیرمکانی به دو دسته جریان متغیرمکانی با افزایش دبی و جریان متغیر مکانی با کاهش دبی تقسیم می‌شود. از آنجا که به دلیل افزایش یا کاهش دبی در طول مسیر، مقدار انرژی جنبشی یا مقدار ممنتوم جریان (رابطه اندازه حرکت) تغییر پیدا خواهد کرد، رفتار هیدرولیکی جریان متغیر مکانی در هر کدام از دو حالت افزایش دبی و کاهش دبی با یکدیگر تفاوت بسیار دارد.

۱-۱-۲-۲ جریان متغیرمکانی با کاهش دبی

مطالعات روی سرریز جانبی با کاهش دبی به دهه سوم قرن بیستم بر می‌گردد. یکی از پایه‌ای ترین معادلات در رابطه با هیدرولیک سرریز جانبی، معادله کلاسیک دیمارچی (۱۹۳۴) می‌باشد. مسئله مهم در مطالعات وی تعیین ضریب دبی بوده است. در این نوع جریان ها که موارد مثال آن در طبیعت فراوان مشاهده می‌شود (نظیر سرریزهای کناری و کفهای مشبک)، کاسته شدن جریان باعث تغییرات قابل

ملاحظه و مشخص آنی در جریان نشده و لذا افت انرژی را مساوی صفر قرار داده و از معادله انرژی استفاده می‌گردد.

۲-۲-۱-۱-۱ معادله دینامیکی جریان متغیر مکانی با کاهش دبی

برای تعیین این معادله فرضیات زیر صورت می‌گیرد:

- ۱- پخش فشار هیدرواستاتیکی خواهد بود.
 - ۲- جریان یک بعدی در نظر گرفته می‌شود (برای اعمال اثر توزیع غیریکنواخت سرعت در مقطع، ضریب تصحیح سرعت در معادله انرژی در نظر گرفته می‌شود).
 - ۳- افت اصطکاکی بر اساس معادله مانینگ تعیین می‌گردد.
 - ۴- از اثر مومنتم جریان انحرافی بر جریان در کانال اصلی صرف نظر می‌شود.
 - ۵- جریان دائمی در نظر گرفته می‌شود.
 - ۶- کانال منشوری شکل و دارای شیب کم در نظر گرفته می‌شود.
- در هر مقطع کانال، کل انرژی نسبت به یک سطح مبنا برابراست با:

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

از معادله‌ی بالا نسبت به محور طولی کانال (X) مشتق گرفته می‌شود.

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

در این معادله:

$$\frac{dA}{dx} = \frac{dA}{dy} * \frac{dy}{dx} = B \frac{dy}{dx}, \quad \frac{dz}{dx} = -S_0, \quad \frac{dH}{dx} = -S_f \quad (3-2)$$

که B عرض کانال اصلی و $\frac{dQ}{dx}$ دبی در واحد طول سرریز می‌باشد با جایگذاری روابط ۲-۳ در ۲-۲، رابطه ۲-۴ که رابطه نهایی تغییرات پروفیل جریان است به دست می‌آید:

$$\frac{dy}{dx} = \frac{S_0 - S_f - \left(\frac{\alpha Q}{gA^2}\right) * \left(\frac{dQ}{dx}\right)}{1 - \alpha Q^2 * \frac{B}{gA^3}} = \frac{S_0 - S_f - \left(\frac{\alpha Q}{gA^2}\right) * \left(\frac{dQ}{dx}\right)}{1 - F_r^2} \quad (۴-۲)$$

در رابطه بالا عبارت $\alpha Q^2 * \frac{B}{gA^3}$ همان F_r^2 است (F_r عدد فرود است). این رابطه معادله دینامیکی جریان متغیرمکانی با کاهش دبی می‌باشد که با استفاده از رابطه انرژی به دست آمده است.

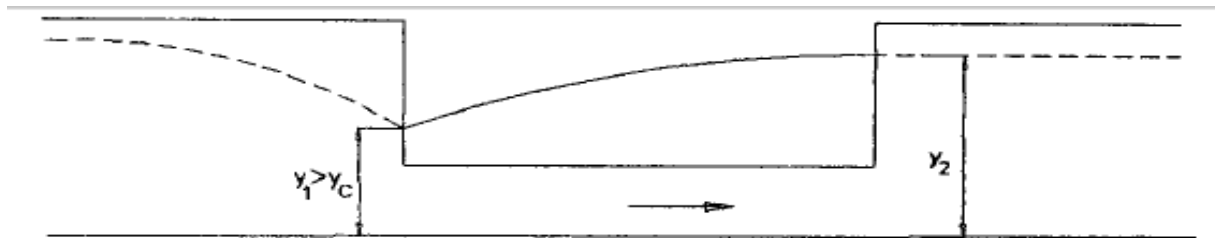
۲-۲-۲ پروفیل‌های جریان روی سرریز جانبی

شکل (۱-۲) انواع پروفیل‌های جریانی که عموماً در سرریزهای جانبی موازی کانال به وجود می‌آید (هندرسون ۱۹۶۶)، عبارتند از:

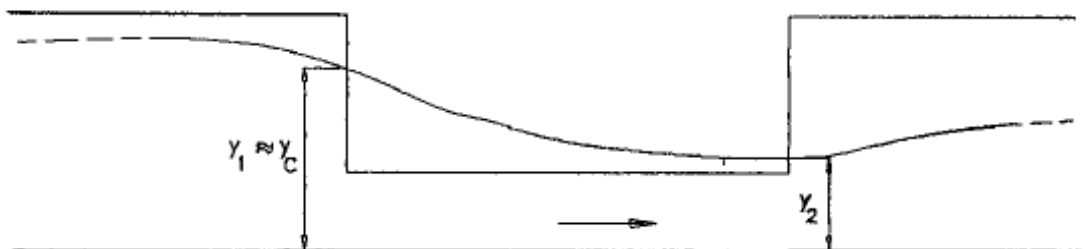
نوع ۱ (شکل a): در این حالت جریان در تمام طول سرریز جانبی زیر بحرانی است ($F_r < 1$). سطح آب از بالادست سرریز به سمت پایین دست آن به آرامی افزایش می‌یابد و این بدان معنی است که دبی در واحد عرض (q) در بالادست سرریز در مقایسه با پایین دست آن بیشتر است. این شرایط اساساً در کانال‌های با شیب ملایم رخ می‌دهد.

نوع ۲ (شکل b): در این حالت جریان در تمام طول سرریز جانبی فوق بحرانی است ($F_r > 1$). سطح آب از بالادست سرریز به سمت پایین دست آن به آرامی کاهش می‌یابد و این بدان معنی است که دبی در واحد عرض (q) در بالادست سرریز در مقایسه با پایین دست آن کمتر است. این شرایط اساساً در کانال‌های با شیب تند رخ می‌دهد.

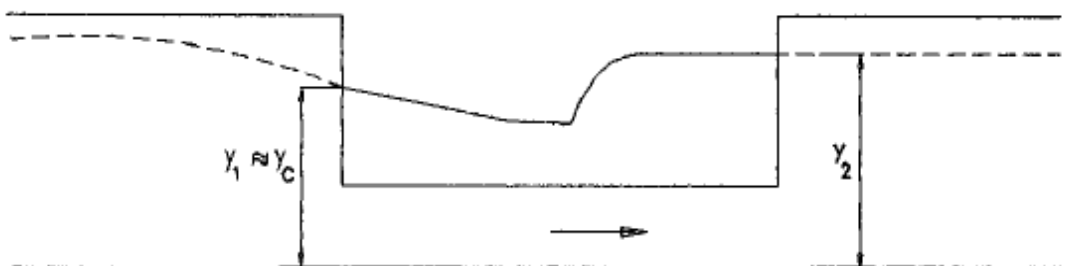
نوع ۳ (شکل c): در این حالت جریان ترکیبی از دو حالت بالا می‌باشد. بدین صورت که جریان در ابتدا فوق بحرانی است و سطح آب در طول سرریز پایین می‌آید و در ادامه یک پرش صورت می‌گیرد و جریان در مقطع پایین دست سرریز زیر بحرانی می‌شود. پرش هیدرولیکی اتفاق افتاده در طول سرریز جانبی از لحاظ مشخصات با یک پرش معمولی در یک کانال روباز کاملاً متفاوت می‌باشد.



(a)



(b)



(c)

شکل (۱-۲): شماتیک پروفیل سطح آب در حین عبور از روی سرریز جانبی

۲-۳-۲ مروری بر مطالعات پیشین

۲-۳-۲-۱ مقدمه

اولین تحقیقات در مورد سرریزهای جانبی از اوایل قرن ۱۹ میلادی آغاز شد که منتهی به ارائه معادله ارزشمند دیمارچی در سال ۱۹۳۴ گردید. دیمارچی سرریز جانبی لبه تیز مستطیلی را مورد بررسی قرار داد. وی در تحقیقات خود با صرف نظر از افت انرژی در طول سرریز و لحاظ سایر فرضیات، حل تحلیلی معادلات حاکم بر جریان در محدوده سرریزهای جانبی را ارائه نمود. ایشان در روابط خود ضریب دبی دیمارچی را به عنوان یک پارامتر ضروری در تعیین دبی عبوری از سرریز معرفی نمود. به دلیل عدم شناخت کافی از عوامل موثر 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 ادامه تعدادی از پژوهش‌هایی که تاکنون توسط محققین انجام شده به صورت مختصر ارائه می‌شود.

۲-۳-۲-۲ مطالعات آزمایشگاهی

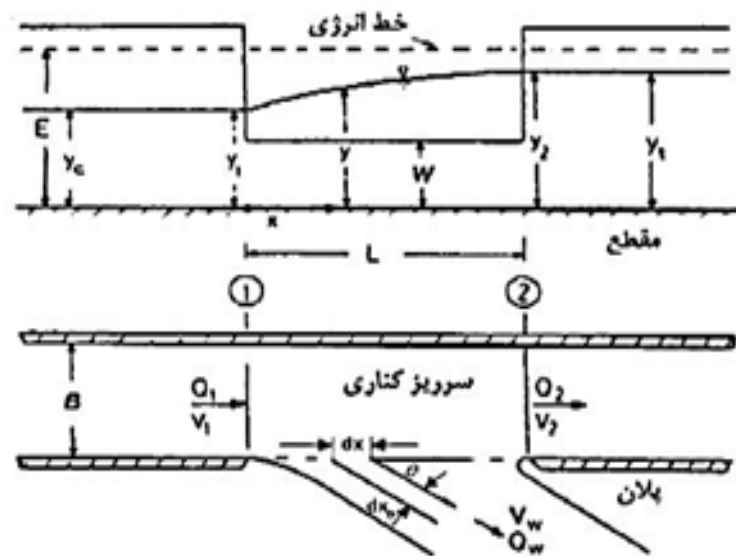
۲-۳-۲-۲-۱ مطالعات انجام گرفته در زمینه سرریزهای جانبی لبه تیز ساده

سابرامانیا و آواستی^{۱۲} در سال (۱۹۷۲) آزمایشات خود را بر روی سرریز جانبی مستطیلی قرار گرفته شده در کانال روباز مستطیلی با ارتفاع تاج صفر انجام دادند. شکل (۲-۱) نمایی از سرریز جانبی می‌باشد. و با آزمایشات متعدد برای حالت‌های جریان زیربحرانی و فوق بحرانی، روابطی را جهت محاسبه ضریب دبی سرریزهای مذکور پیشنهاد کردند. تحقیقات انجام گرفته شده توسط آنها نشان داد در جریان‌های زیربحرانی، ضریب C_m به هیچ کدام از عوامل w/y_1 ، y_1/L ، L/B بستگی ندارد. ولی در جریان فوق بحرانی ضریب دبی تنها تابع Fr_1 بوده است.

¹² Subramanya and Awasthy

$$C_m = 0.36 - 0.08 Fr_1$$

(۵-۲)



شکل (۲-۲): نمایی کلی از یک سرریز جانبی (سابرامانیا و آواستی، ۱۹۷۲)

یوتچ^{۱۳} با بحث در خصوص رابطه (۵-۲) گزارش نمود که این رابطه برای ارتفاع سرریز ($w > 0$) و عدد فرود ($Fr > 0.6$) دارای خطا است و رابطه‌ای را برای تعیین ضریب دبی در سرریزهای جانبی مستطیل شکل ارائه نمود. (یوتچ ۱۹۷۲)

کومار و پاتاک^{۱۴} (۱۹۸۷) پس از انجام آزمایش‌های متعدد بر روی سرریز جانبی لبه تیز مثلثی با زاویه رأس ۶۰، ۹۰، ۱۲۰ درجه در شرایط زیربحرانی ضریب دبی سرریز را محاسبه نمودند و به این نتیجه رسیدند که ضریب دبی فقط تابعی از عدد فرود جریان در بالادست سرریز می‌باشد و روابط زیر را پیشنهاد دادند:

$$C_m = 0.642 - 0.042 Fr_1$$

$$\theta = 60^\circ$$

(۶-۲)

¹³ Yu-Tek

¹⁴ Kumar and Pathak

$$C_m = 0.668 - 0.381Fr_1 \quad \theta = 90^\circ \quad (7-2)$$

$$C_m = 0.619 - 0.203Fr_1 \quad \theta = 120^\circ \quad (8-2)$$

هاگر^{۱۵} در سال (۱۹۸۷) آزمایشات خود را برای دو حالت جریان زیربحرانی و فوق‌بحرانی جهت بدست آوردن ضریب دبی برای سرریزجانبی با ارتفاع تاج صفر انجام داد. وی برای تعیین ضریب دبی معادله مستقل برای هر پارامتر مثل عمق جریان بالادست، سرعت ورودی، زاویه جریان خروجی، شیب کانال و شدت جریان خروجی جانبی ارائه داد.

چیونگ^{۱۶} در سال (۱۹۹۱) آزمایشات خود را بر روی سرریزجانبی مستطیلی در کانال‌های ذوزنقه‌ای با ارتفاع تاج صفر انجام داد و رابطه‌ای برای محاسبه ضریب دبی پیشنهاد نمود:

$$C_m = 0.45 - 0.22Fr_1^2 \quad (9-2)$$

سینگ و همکاران^{۱۷} در سال (۱۹۹۴) نیز از اتلاف انرژی در طول سرریزجانبی صرف‌نظر کردند. در بیشتر تحقیقات قبل از ایشان ضریب دبی فقط تابعی از عدد فرود بالادست جریان لحاظ شده بود. اما در پژوهش ایشان بررسی توأم عدد فرود بالادست و نسبت عمق آب روی سرریز به ارتفاع تاج سرریز بر ضریب دبی سرریزهای جانبی لبه تیز مستطیلی در شرایط جریان زیربحرانی در یک کانال اصلی مستطیلی منشوری مورد توجه قرار گرفته است. در نهایت با استفاده از رگرسیون چند متغیره رابطه زیر را پیشنهاد دادند:

$$C_m = 0.33 - 0.18Fr_1 + 0.49 (W/y_1) \quad (10-2)$$

ایزدجو و شفافی بجستان در سال (۱۳۷۵) تعداد ۶ مدل سرریز لبه‌تیز مستطیلی را در آزمایشگاه هیدرولیک دانشگاه شهید چمران اهواز تحت شرایط هیدرولیکی مختلف آزمایش نموده و نتایج بدست

¹⁵ Hager

¹⁶ Cheong

¹⁷ Singh et al.

آمده را تجزیه و تحلیل نمودند. در این بررسی مشخص شد رابطه سینگ و همکاران (۱۹۹۴) بهترین جواب را برای تخمین ضریب دبی سرریز می‌دهد و همچنین رابطه‌ی جدیدی برای ضریب دبی این سرریز استخراج شد.

ایزدجو و شفافی بجستان پارامترهای بی‌بعد مؤثر بر ضریب دبی را به شکل زیر معرفی نمودند:

$$C_d = f(Fr_1^2, Re, \frac{L}{y_1}, \frac{w}{y_1}, \frac{b}{y_1}, \frac{B}{y_1}) \quad (11-2)$$

که در آن Fr_1 عدد فرود جریان در بالادست سرریز، Re عدد رینولدز جریان، L طول سرریز، y_1 عمق جریان در بالادست سرریز، w ارتفاع تاج، b عرض کانال جانبی و B عرض کانال اصلی است.

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

$$C_d = 0.199 - 0.0759 Fr_1^2 + 0.7364 (w/y_1) - 0.0187 (L/y_1) \quad (12-2)$$

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 قاضی‌زاده و همکاران در سال (۱۳۷۶) بر اساس آنالیز ابعادی پارامترهای مختلف از جمله $Fr_1, S_0, w/y_1, L/B$ که بر مقدار C_d موثر هستند را مشخص نمودند. بر این اساس رابطه (۱۳-۲) برای تخمین ضریب دبی ارائه شد.

$$C_d = a + b (Fr_1) + c (w/y_1) + d (L/B) + e (S_0) \quad (13-2)$$

که در آن y_1 عمق آب در بالادست سرریز، w ارتفاع تاج سرریز از کف کانال، L طول سرریز، B عرض کانال، S_0 شیب طولی کانال، Fr_1 عدد فرود جریان در بالادست سرریز است. به این نتیجه رسیدند که با حذف پارامترهای L/B و S_0 در مقادیر C_d تاثیر چندانی نمی‌گذارد و می‌توان از آن‌ها صرف‌نظر کرد. با توجه به داده‌های آزمایشگاهی رابطه زیر را پیشنهاد دادند:

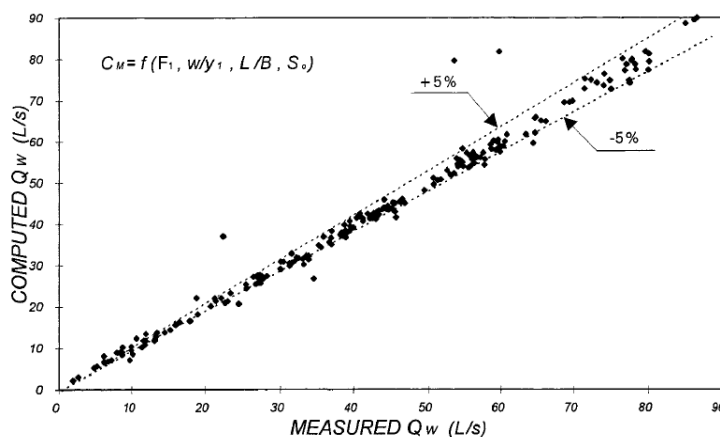
$$C_d = 0.71 - 0.41 Fr_1 - 0.22 (w/y_1) \quad (۱۴-۲)$$

برقعی و همکاران در سال (۱۹۹۹) ضریب دبی سرریز جانبی لبه تیز مستطیلی را با انجام آزمایش‌های متعدد و به کمک رابطه دیمارچی محاسبه نمودند. از ویژگی‌های بارز این پژوهش بررسی اثر شیب طولی کانال بر مقادیر ضریب دبی است. وی با اشاره بر این موضوع که در اکثر تحقیقات گذشته ضریب دبی بر اساس پارامترهای بی بعد عدد فرود بالادست جریان و نسبت ارتفاع تاج سرریز به عمق جریان بنا شده و سایر متغیرها همچون شیب طولی کانال و نسبت طول سرریز به عرض کانال اصلی نیز می‌تواند تاثیرگذار باشد. و در ادامه رابطه زیر را پیشنهاد نمود:

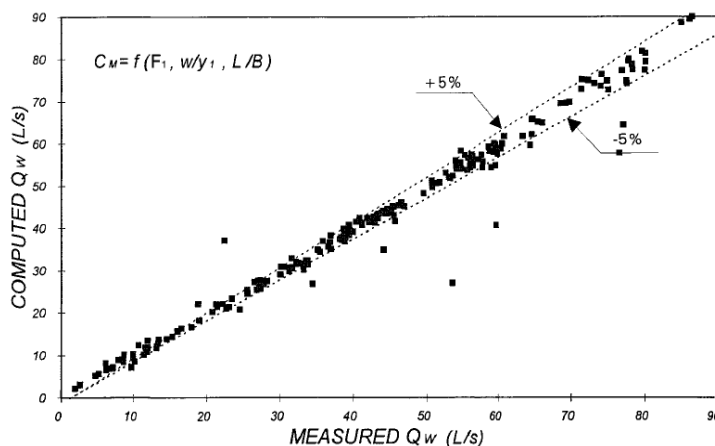
$$C_m = 0.687 - 0.46 Fr_1 - 0.3 w/y_1 + 0.06 L/B + 1.2 S_0 \quad (۱۵-۲)$$

شکل (۲-۲) مقایسه نتایج محاسباتی با استفاده از رابطه (۱۵-۲) و مقادیر آزمایشگاهی را نشان می‌دهد. وی پس از محاسبه مقادیر خطا نتیجه‌گیری کرد اثر شیب طولی کانال بسیار ناچیز بوده و می‌توان آن را از روابط تعیین ضریب دبی حذف نمود، که در شکل (۳-۲) نمودار مقایسه‌ای نتایج مقادیر محاسباتی و آزمایشگاهی ترسیم شده است.

$$C_m = 0.687 - 0.46 Fr_1 - 0.3 w/y_1 + 0.06 L/B \quad (۱۶-۲)$$

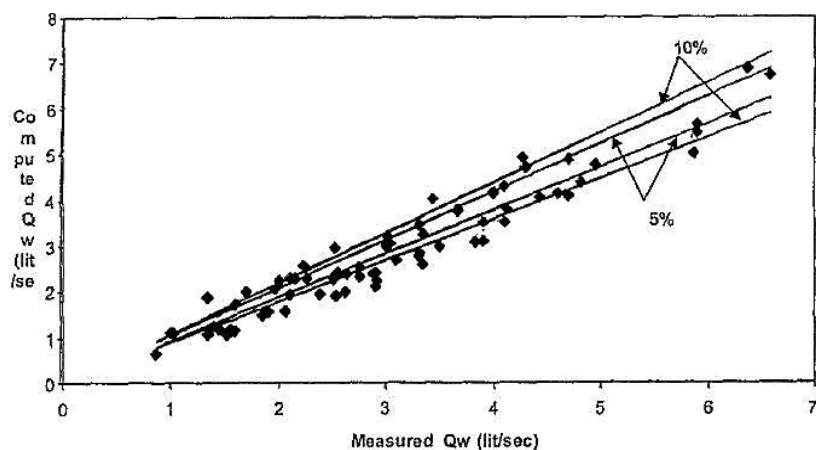


شکل (۳-۲): نمودار مقایسه نتایج دبی جریان محاسباتی با مقادیر آزمایشگاهی بر اساس رابطه (۲-۱۵) (برقعی و همکاران ۱۹۹۹)



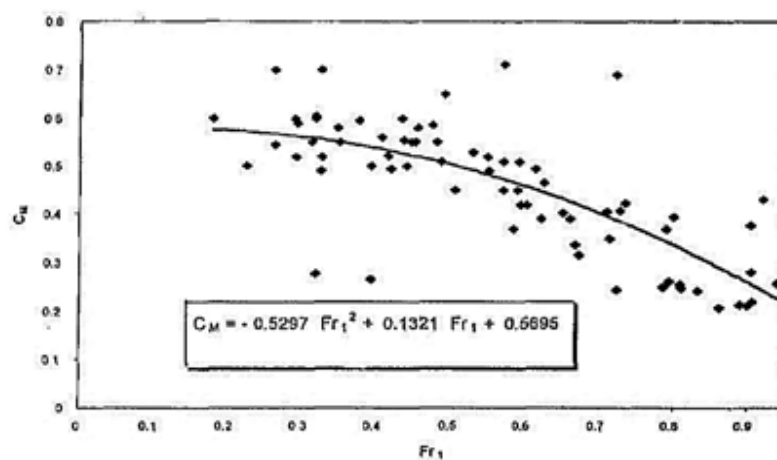
شکل (۴-۲): نمودار مقایسه نتایج دبی جریان محاسباتی با مقادیر آزمایشگاهی بر اساس رابطه (۲-۱۶) (برقعی و همکاران ۱۹۹۹)

برقعی و صالحی در سال (۱۳۸۲) با در نظر گرفتن عمق روی سرریز به عنوان عمق بحرانی، دبی سرریز جانبی را محاسبه و رابطه‌ای برای محاسبه ضریب دبی ارائه نمودند. با انجام آزمایش‌ها و جمع نمودن دبی تک‌تک‌ها دبی عبوری از سرریز را محاسبه نمودند که نتایج آن در شکل (۴-۲) ارائه شده است. که می‌تواند تخمین نسبتاً خوبی از دبی با استفاده از این روش باشد.



شکل (۵-۲): رابطه دبی اندازه‌گیری شده با دبی محاسبه شده (برقعی و صالحی، ۱۳۸۲)

حال بر اساس اینکه مؤثرترین پارامتر روی ضریب تخلیه، عدد فرود است لذا در شکل (۵-۲) تابع ضریب تخلیه برحسب عدد فرود ارائه شده است. در این شکل مشخص است که در محدوده $\pm 10\%$ ، بیشتر نقاط از این تابع پیروی می‌کنند.



شکل (۶-۲): رابطه ضریب دبی سرریز با عدد فرود (برقعی و صالحی، ۱۳۸۲)

قدسیان در سال ۲۰۰۴ با انجام آزمایش‌های متعدد سرریز جانبی مثلثی لبه‌تیز را مورد مطالعه قرار داد. وی این آزمایش‌ها را در شرایط جریان زیربحرانی و با تغییر پارامترهای هیدرولیکی جریان ورودی و همچنین مشخصات هندسی از جمله زاویه رأس مثلث انجام داد. سپس ضریب دبی سرریز را به روش

دیمارچی و برای زوایای مختلف (۳۰، ۶۰، ۹۰ و ۱۲۰ درجه) محاسبه نمود. وی پس از بررسی‌های متعدد روابط زیر را جهت تعیین ضریب دبی متوسط سرریز مثلثی به روش دیمارچی را پیشنهاد داد:

$$C_m = 0.6246 - 0.367 Fr_1 + 0.196 W/y_1 \quad \Theta = 30^\circ \quad (17-2)$$

$$C_m = 0.5707 - 0.293 Fr_1 + 0.142 W/y_1 \quad \Theta = 60^\circ \quad (18-2)$$

$$C_m = 0.5607 - 0.251 Fr_1 + 0.166 W/y_1 \quad \Theta = 90^\circ \quad (19-2)$$

$$C_m = 0.552 - 0.132 Fr_1 + 0.087 W/y_1 \quad \Theta = 120^\circ \quad (20-2)$$

در این روابط ضریب دبی تابعی از عدد فرود بالادست جریان و نسبت ارتفاع تاج سرریز به عمق آب بالادست سرریز به عنوان پارامترهای مؤثر در نظر گرفته شده است. بررسی‌های وی همچنین نشان داد که افت انرژی در طول سرریز بسیار کم است.

۲-۲-۳-۲ مطالعات انجام گرفته در زمینه سرریزهای لبه تیز مرکب

۱-۲-۲-۳-۲ سرریزهای لبه تیز نرمال مرکب

اولین بار سازمان احیای اراضی امریکا^{۱۸} (۱۹۶۳) از یک سرریز لبه تیز مثلثی-مستطیلی برای اندازه‌گیری دبی جریان استفاده نمود.

یاسی و عباسپور (۲۰۰۵) با بررسی جریان در سرریز لبه تیز مرکب نرمال مثلثی-مستطیلی و با زاویه رأس ۹۰ درجه به این نتیجه رسیدند که با افزایش ارتفاع سطح آب روی سرریز و در مرز تماس سرریزهای مثلثی و مستطیلی، ضریب دبی به صورت متناوب افزایش و کاهش می‌یابد.

مارتینز و همکاران^{۱۹} (۲۰۰۵) با بررسی آزمایشگاهی سرریز لبه تیز مرکب نرمال مثلثی-مثلثی، این نوع

¹⁸ USBR

¹⁹ Martinez et al.

سرریز را برای استفاده در سدهای رسوب‌گیر در حوضه‌های کوهستانی پیشنهاد نمودند. انتخاب این نوع سرریز به دلیل پیوستگی رابطه دبی- اشل در تمامی عمق‌های جریان روی سرریز و نیز دقت مناسب اندازه‌گیری دبی در محدوده وسیعی از شرایط جریان (کم‌آب تا سیلابی) است. ایشان سرریز مرکب را به چند سرریز مثلثی با زاویه رأس و مشخصات هندسی متفاوت تقسیم نمود و سپس با جمع جبری دبی‌های محاسباتی از هر بخش، رابطه‌هایی را برای تعیین ضریب دبی کل مقطع پیشنهاد دادند. مارتینز درصد خطا محاسباتی را برای حالتی که ارتفاع آب روی سرریز به ۵ و ۲۵ سانتی متر می‌رسد را به ترتیب کمتر از ۰.۵٪ و ۰.۱٪ تعیین نمود.

پیراتیپان و همکاران^{۲۰} (۲۰۰۶) نیز با بررسی آزمایشگاهی همین نوع سرریز مرکب با زوایای رأس مختلف، دبی عبوری از این سرریز را به چهار روش محاسبه نمود. تقسیم بندی این روش‌ها بر اساس چگونگی تقسیم مقطع مرکب به مقاطع جزء و بکارگیری ضرایب دبی آن تعریف شدند. و در نهایت رابطه دقیقی برای محاسبه دبی جریان سرریز مرکب مثلثی- مثلثی ارائه نمودند.

جان و همکاران^{۲۱} (۲۰۰۶) با الگو از روش مارتینز و با انجام یک سری آزمایش، دبی جریان برای ۴ نوع سرریز لبه‌تیز مرکب را اندازه‌گیری نموده و روابط ساده‌ای را ارائه نمودند.

۲-۲-۲-۳-۲ سرریزهای لبه‌تیز جانبی مرکب

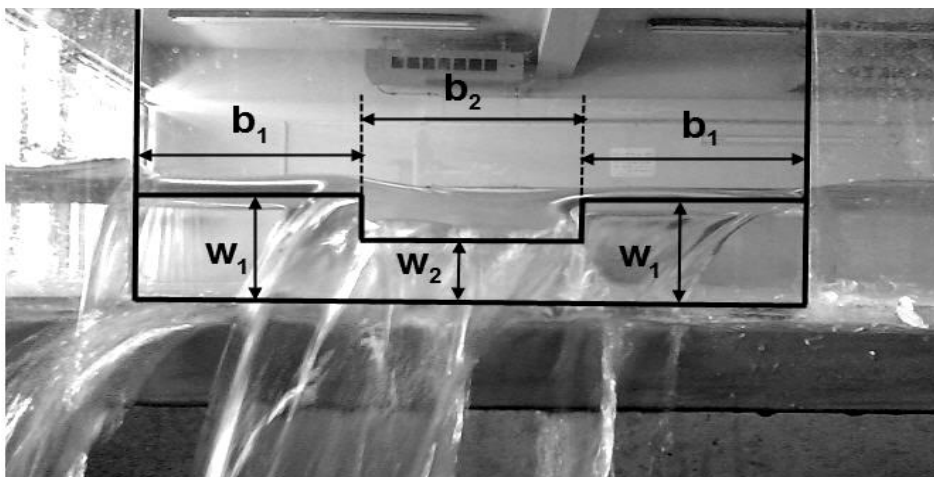
ظهیری و همکاران در سال ۲۰۱۲ به مطالعه سرریزهای جانبی لبه‌تیز با مقطع مرکب پرداختند. ضریب دبی در سرریزهای جانبی لبه‌تیز مرکب مستطیلی - مستطیلی با استفاده از مدل فیزیکی و انجام آزمایش‌های لازم مورد بررسی قرار گرفته و براساس تحلیل ابعادی، رابطه بهینه‌ای ارائه شده است. با توجه به شکل خاص سرریزهای مرکب شکل (۲-۶)، ارتفاع تاج در طول سرریز متفاوت است به همین دلیل در این پژوهش از ارتفاع وزنی تاج سرریز (\bar{W}) که به صورت زیر تعریف می‌شود، استفاده شده

²⁰ Piratheepan et al.

²¹ Jan et al.

است:

$$\bar{w} = \frac{(2*w_1*b_1)+(w_2*b_2)}{(2*b_1)+(b_2)} \quad (21-2)$$



شکل (۷-۲): سرریز جانبی لبه تیز مرکب با مقطع مستطیلی - مستطیلی (باقری و همکاران ۱۳۹۱)

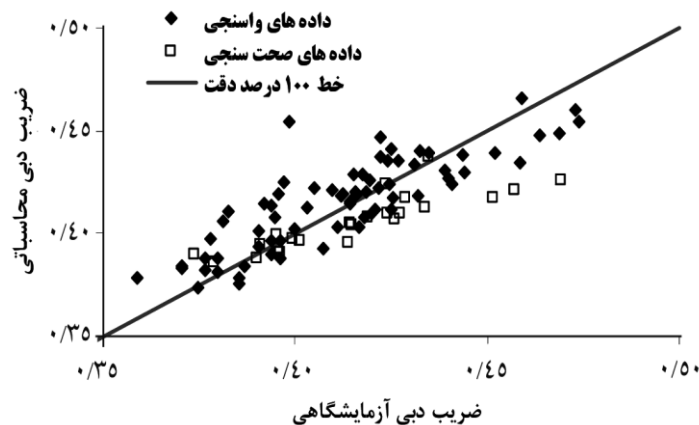
که b_2 و b_1 به ترتیب طول تاج سرریزهای بالایی و پایینی و w_2 و w_1 به ترتیب ارتفاع تاج مقاطع بالایی و پایینی سرریز می باشد. هدف از پژوهش ایشان استخراج یک رابطه کاربردی به صورت بدون بعد برای تخمین ضریب دبی سرریزهای جانبی لبه تیز مرکب است. با انجام تحلیل ابعادی و نیز مدل-سازی فیزیکی، می توان این رابطه را استخراج نمود. رابطه ای به صورت کلی زیر برای تخمین ضریب دبی سرریزهای جانبی مرکب مستطیلی- مستطیلی پیشنهاد شده است:

$$C_d = aFr_1^b + c(\bar{w}/y_1)^d + e(B/y_1)^f + h \quad (22-2)$$

که در آن ضرایب، a ، b ، c ، d ، e ، f ، h ضرایب ثابتی هستند که به کمک داده های آزمایشگاهی این پژوهش و با حداقل سازی مجموع مربعات خطا به دست می آیند. به این منظور از پارامتر آماری مجموع مربعات خطا به عنوان تابع هدف و از ضرایب مجهول a تا h به عنوان متغیرهای تصمیم گیری استفاده

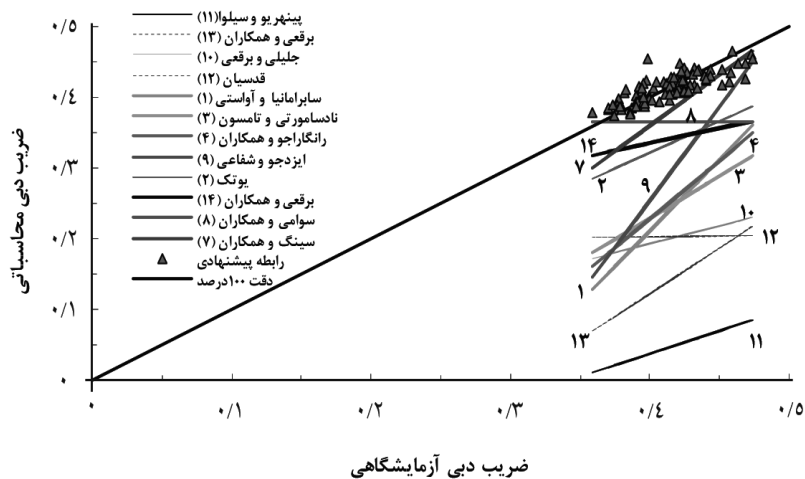
شده و مراحل بهینه سازی ضرایب در a تا h ضرایب مجهول محیط اکسل انجام شد. در نهایت رابطه زیر برای برآورد ضریب دبی سرریزهای جانبی لبه تیز مرکب در شرایط جریان زیربحرانی به دست آمد:

$$C_d = -0.0551 Fr_1 + 0.1063 \left(\frac{\bar{W}}{y_1}\right)^{2.1065} + 0.00168 \left(\frac{B}{y_1}\right)^{1.179} + 0.412 \quad (23-2)$$



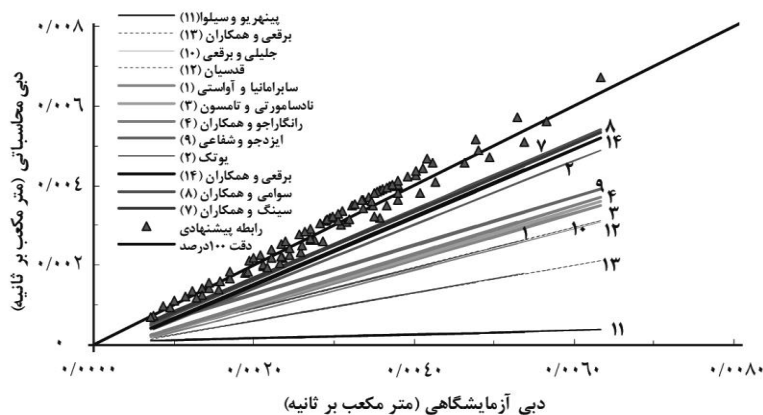
شکل (۲-۸): مقایسه نتایج محاسباتی و آزمایشگاهی ضریب دبی سرریز جانبی مرکب (ظهیری و همکاران، ۲۰۱۳)

با توجه به این که تاکنون رابطه مشخصی برای تعیین ضریب دبی سرریزهای جانبی مرکب ارائه نشده است، در این مقاله برای مقایسه نتایج رابطه پیشنهادی این پژوهش با نتایج محققان قبلی، روابط ارائه شده توسط محققان مختلف برای سرریزهای جانبی مستطیلی ساده (قبادی و شفاعی بجستان، ۲۰۰۶) مورد استفاده قرار گرفته‌اند. نتایج ضریب دبی این روابط در نمودار شکل (۲-۸) نشان داده شده است. قابل ذکر است که برای استفاده از این رابطه‌ها در سرریز جانبی مرکب که دارای ۳ مقدار برای متغیر W (ارتفاع تاج سرریز) است، از متغیر جدید \bar{W} استفاده شده است. همان طور که ملاحظه می‌شود همه روابط سرریزجانبی ساده، ضریب دبی سرریز جانبی مرکب را بسیار کمتر از مقدار آزمایشگاهی برآورد کرده و بنابراین قابل اعتماد نیستند.



شکل (۲-۹): مقایسه نتایج ضرب دبی به دست آمده از روابط سرریزهای جانبی ساده با مقادیر آزمایشگاهی

در نمودار شکل (۲-۹) نتایج دبی جریان عبوری از سرریز جانبی مرکب به دست آمده از رابطه‌های سرریزهای ساده ارائه شده است. در این شکل نیز مشخص است که همه رابطه‌های محققان، مقدار دبی جریان را کمتر از واقع برآورد می‌کنند.



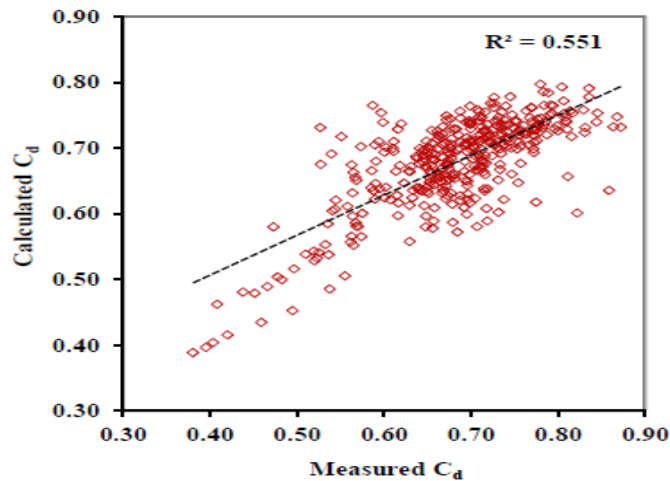
شکل (۲-۱۰): مقایسه نتایج دبی جریان به دست آمده از روابط سرریزهای جانبی ساده با مقادیر آزمایشگاهی

عامری و همکاران در سال ۲۰۱۳ به بررسی جریان روی سرریز جانبی لبه تیز مرکب مستطیلی در شرایط زیر بحرانی و تعیین ضریب آن به روش مستقیم و دیمارچی پرداختند، ایشان با انجام تحلیل ابعادی و نیز مدل سازی فیزیکی رابطه‌ای را استخراج نمود، در این رابطه ضریب دبی تابعی از عدد فرود جریان،

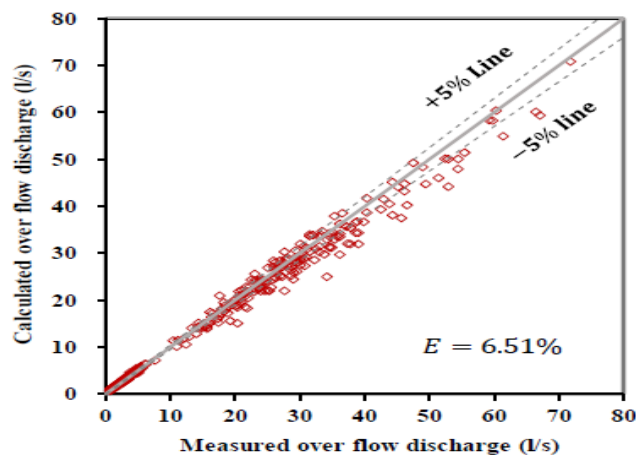
نسبت طول و ارتفاع وزنی تاج (\bar{w}) سرریز به عمق جریان کانال اصلی در بالادست سرریز می‌باشد. رابطه‌ای به صورت کلی برای تخمین ضریب دبی مستقیم در سرریزهای جانبی لبه‌تیز مستطیلی-مستطیلی پیشنهاد شده است:

$$C_d = -0.3327Fr_1^{0.1722} + 0.5685 (\bar{w}/y_1)^{0.5885} - 0.2163 (L/B)^{0.5348} + 0.7698 \quad (24-2)$$

شکل (۲-۱۰) تغییرات ضریب دبی محاسباتی در مقابل مقادیر آزمایشگاهی و شکل (۲-۱۱) تغییرات دبی محاسباتی در مقابل دبی مشاهده‌ای در محدوده خطای $\pm 5\%$ درصد را نشان می‌دهند.



شکل (۲-۱۱): مقایسه مقادیر ضریب دبی محاسباتی با نتایج آزمایشگاهی

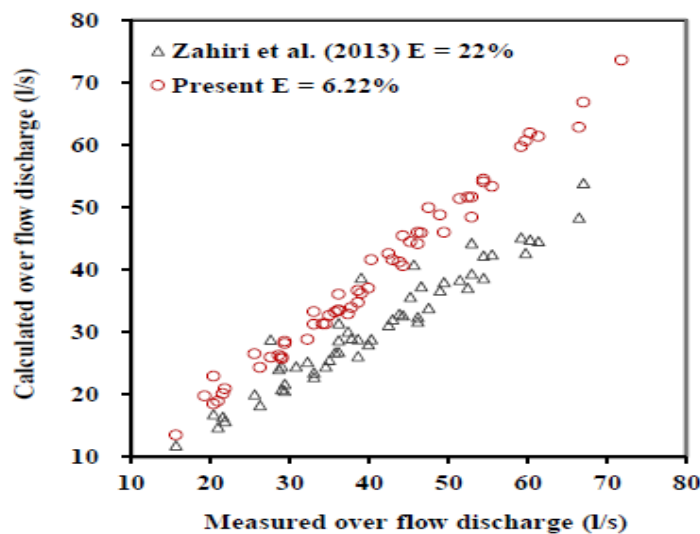


شکل (۲-۱۲): مقایسه مقادیر دبی محاسباتی با مقادیر آزمایشگاهی

در روش دیمارچی نیز جهت حل مشکل تغییر ارتفاع تاج در طول سرریز، مقطع مرکب با یک سرریز مستطیلی ساده به ارتفاع تاج (\bar{W}) معادل شد. عامری و همکاران در نهایت رابطه زیر را برای تعیین ضریب دبی دیمارچی سرریز مرکب مستطیلی - مستطیلی پیشنهاد داد:

$$C_m = -0.5829Fr_1^{1.663} + 0.481(\bar{w}/y_1)^{0.0491} - 0.2462(L/B)^{0.2194} + 0.48 \quad (25-2)$$

شکل (۱۲-۲) نمودار مقایسه دبی عبوری از سرریز مرکب مستطیلی - مستطیلی که با استفاده از رابطه پیشنهادی ضریب دبی ظهیری و همکاران (۲۰۱۳) با داده‌های مشاهداتی را نشان می‌دهد. ملاحظه می‌گردد رابطه ظهیری و همکاران با میانگین خطای ۲۲ درصد مقادیر دبی را کمتر از مقادیر واقعی نشان می‌دهد. مقایسه ضریب دبی به دست آمده از رابطه (۲۵-۲) با نتایج آزمایشگاهی نشان می‌دهد، که درصد خطای میانگین در این حالت ۶/۲۲ درصد می‌باشد.



شکل (۱۲-۲): مقایسه مقادیر دبی براساس ضریب دبی با نتایج آزمایشگاهی

عامری و همکاران در سال (۲۰۱۳) پس از انجام رگرسیون و بررسی پارامترهای موثر به کمک آنالیز ابعادی، روابط زیر را جهت محاسبه ضریب دبی به روش مستقیم و دیمارچی در سرریزهای جانبی لبه تیز مثلثی مستطیلی با تجمیع زوایای رأس ۶۰، ۹۰ و ۱۲۰ درجه استخراج نمودند.

$$C_d = 0.154Fr_1^{0.166} + 0.473 (\bar{w}/y_1)^{0.711} + 0.213 (L/y_1)^{0.201} \quad \Theta = 60^\circ, 90^\circ, 120^\circ \quad (26-2)$$

$$C_m = -0.3904Fr_1 + 0.4264 (\bar{w}/y_1)^{4.324} + 0.1514 (L/y_1)^{0.202} + 0.51 \quad \Theta = 60^\circ \quad (27-2)$$

$$C_m = -0.402Fr_1 + 0.3399 (\bar{w}/y_1)^{1.115} + 0.0116 (L/y_1)^{0.412} + 0.5433 \quad \Theta = 90^\circ \quad (28-2)$$

$$C_m = 0.413Fr_1 + 0.16 (\bar{w}/y_1)^{0.672} + 0.0255 (L/y_1)^{1.313} + 0.5327 \quad \Theta = 120^\circ \quad (29-2)$$

بررسی‌ها نشان داد که استفاده از رابطه کلی (۲۶-۲) مقادیر خطا را برای مقطع مرکب با زاویه رأس ۶۰ درجه کمی افزایش و در دیگر مقاطع کاهش داده است. لازم به توضیح است که بررسی نتایج نشان داد به دلیل ثابت بودن عرض فلوم تحقیقاتی و همچنین محدوده کم تغییرات طول سرریز، پارامتر (L/B) تأثیر زیادی در کاهش خطای روابط فوق نداشته و در نتیجه از روابط حذف گردید.

۲-۳-۳ مطالعات عددی

قنادان و همکاران (۱۳۹۱) به منظور شبیه‌سازی جریان عبوری از روی سرریزهای جانبی لبه پهن و تطابق آن با نتایج حاصل از بررسی‌های فیزیکی، آزمایش‌های مربوطه را در کانال دوزنقه‌ای خاکی به طول ۳۲/۳ متر که یک سرریز جانبی لبه پهن به طول ۴ متر بر آن تعبیه شده، انجام دادند.

شبیه‌سازی عددی توسط نرم افزار FLOW-3d و با اعمال ۲ مدل آشفتگی k-ε استاندارد و RNG K-ε به منظور یافتن بهترین مدل آشفتگی جهت تعیین ضریب آبگذری سرریز جانبی لبه پهن اجرا گردید. مدل‌های اجرا شده برای ۶ دبی مختلف ۶۹، ۷۲، ۸۳، ۹۳، ۱۰۴، ۱۱۲ لیتر بر ثانیه صورت گرفت و در مجموع ۱۲ شبیه‌سازی انجام شد.

برای مش‌بندی مدل از تقسیم متفاوت مش‌ها در نواحی مختلف استفاده شد. به طوری که در نواحی نزدیک سرریزجانبی، مش‌های بیشتر و ریزتری نسبت به سایر نواحی به کار برده شد، که ایشان با مش‌بندی غیریکنواخت قسمتی از کانال را مورد مطالعه قرار داد.

نتایج حاصل از بررسی‌های آنها نشان داد که:

۱. مدل آشفتگی ϵ -RNG K، با مقدار میانگین مطلق خطای $3/56$ درصد برای ضریب آبگذری و $1/5$ درصد برای دبی خروجی، بهترین تطابق را با نتایج آزمایشگاهی داشته و لذا این مدل، پیش بینی بهتری از تخمین ضریب آبگذری و دبی خروجی سرریزهای جانبی لبه پهن، نسبت به مدل ϵ -K استاندارد ارائه می‌کند.

۲. با توجه به تطابق مناسب نتایج مدل ریاضی و آزمایشگاهی، می‌توان از نرم افزار FLOW-3d در طراحی سرریزهای جانبی لبه پهن استفاده نمود.

محمدیان و همکاران (۱۳۹۳) به منظور شبیه‌سازی جریان در محدوده سرریزجانبی مرکب مستطیلی و تطابق آن به کمک داده‌های آزمایشگاهی، از نتایج حاصل از مطالعات آزمایشگاهی باقری و همکاران (۱۳۹۱) استفاده نمودند. در مجموع ۱۲ سرریزجانبی لبه تیز مرکب ساخته شد، بنا به اشاره باقری مبنی بر دقت بالای اندازه‌گیری جریان در سرریز نوع ششم این سرریز برای انجام مدل‌سازی ریاضی انتخاب شده است. همچنین با توجه به ماهیت آشفته جریان، ۲ مدل آشفتگی موجود در نرم افزار FLOW-3d شامل ϵ -k استاندارد و ϵ -RNG K مورد ارزیابی قرار گرفتند. ایشان ابتدای سرریز و انتهای سرریزجانبی را برای مدل‌سازی جریان مورد بررسی قرار داد.

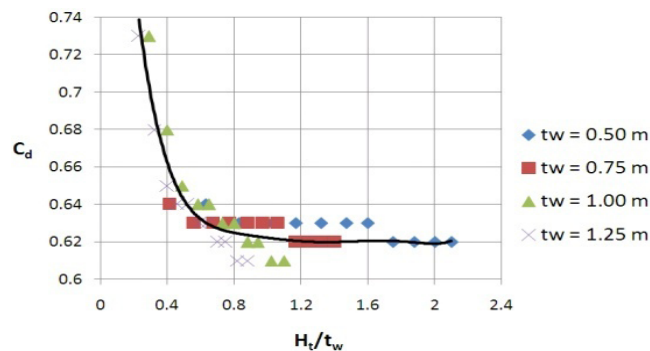
یافته‌های مهم تحقیق آن‌ها به شرح زیر می‌باشد:

۱. مدل تلاطمی ϵ -RNG K بهترین دقت را در شبیه‌سازی سرریزهای جانبی مرکب مستطیلی در مقایسه با داده‌های آزمایشگاهی دارد.

۲. این نرم افزار با مدل تلاطمی ϵ -RNG K، به ازای مقادیر دبی ورودی و عمق جریان بالا، تخمین بهتری از دبی خروجی از سرریز ارائه می کند. دقت نتایج در دبی های ورودی و عمق جریان پایین، کمتر است.

۳. بر اساس محاسبات شاخص های آماری مشخص شد نتایج محاسباتی نرم افزار FLOW-3d در تخمین دبی خروجی از سرریز با دارا بودن ضریب همبستگی برابر 0.979 از کرائی مناسبی برخوردار است.

Reda و همکاران در سال (۲۰۱۱) به شبیه سازی دوبعدی و سه بعدی جریان روی سرریزهای لبه تیز با استفاده از نرم افزار FLOW-3d پرداختند. اهمیت پژوهش ایشان ارزیابی و اعتبار جریان روی یک سرریز لبه تیز مستطیلی و به دست آوردن ضریب دبی می باشد. ترکیب های مختلف از دبی و ارتفاع سرریز به منظور ایجاد کردن یک منحنی مناسب برای تخمین ضرایب دبی بکار برده شد. تحقیق ایشان نشان داد که مهم ترین متغیر دبی حاکم روی سرریزهای لبه تیز H_t/t_w (هد روی سرریز به ارتفاع سرریز) است. به علاوه از مزایای FLOW-3d به عنوان مثال یک وسیله یا ابزار برای آزمایش کردن بردارهای سرعت و الگوی فشار روی سرریزهای لبه تیز مشخص شده است. ۱۱ دبی مختلف از $1 \text{ m}^3/\text{s}$ تا $6 \text{ m}^3/\text{s}$ مورد آزمایش قرار گرفتند. آزمایش ها برای سرریزهای با $1/25$ ، $1/10$ ، $1/75$ ، $1/50$ t_w انجام شدند. شکل (۲-۱۳) نمودار ترسیم ضرایب دبی برای سرریز لبه تیز مقابل H_t/t_w را نشان می دهد.



شکل (۲-۱۴): نمودار ترسیم ضرایب دبی برای سرریزهای لبه تیز مقابل H_t/t_w

مقایسه داده‌های آماری از این تحقیق با نتایج حاصل از Sarginson (۱۹۷۲)، Kindsvater and Carter (۱۹۵۷)، Asawa and Raju (۱۹۷۷) مطابقت خوبی با داده‌های آماری از این تحقیق برای سرریزهای لبه تیز داشته، قیاس آنها نشان‌دهنده‌ی حدود $\pm 3\%$ خطا می‌باشد.

فصل سوم:

مواد و روش‌ها

۱-۳ مقدمه

این فصل شامل دو بخش می‌باشد، که بخش اول معادلات حاکم بر جریان عبوری از سرریزهای لبه تیز مستطیلی و مثلثی و سپس روش‌های تعیین ضریب دبی متوسط به روش‌های مستقیم، دیمارچی در این سرریزها ارائه می‌گردد و در ادامه آنالیز ابعادی، مشخصات تجهیزات و دستگاه‌های مورد استفاده در آزمایشگاه، چگونگی انجام آزمایش‌ها به همراه محدوده پارامترهای هیدرولیکی و مشخصات هندسی مقاطع مختلف سرریز و نحوه استخراج روابط ارائه و توضیح داده می‌شود. بخش دوم معرفی نرم افزار $Flow - 3d$ ، معادلات حاکم بر جریان آشفته، انواع مدل‌های آشفتگی به همراه مدل‌های آشفتگی موجود در نرم افزار را شامل می‌گردد.

۲-۳ ضریب دبی مستقیم در سرریزهای لبه تیز ساده

۱-۲-۳ ضریب دبی مستقیم در سرریز لبه تیز مستطیلی

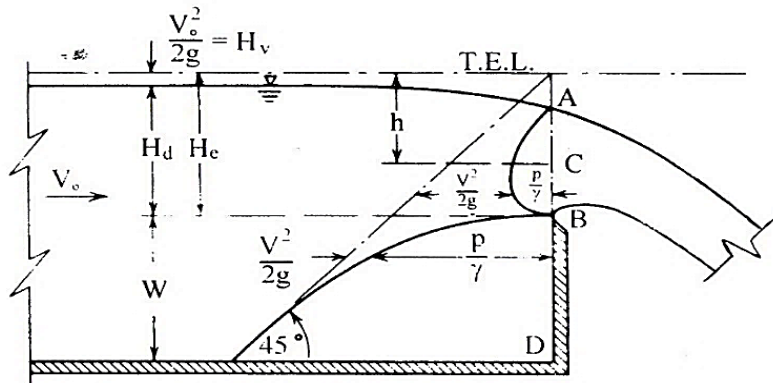
شکل (۱-۳) پروفیل جریان عبوری از روی یک سرریز لبه تیز مستطیلی را نشان می‌دهد. در این تصویر مشخص است که برای محاسبه دبی عبوری از سرریز و به‌طور کلی سرریزهای لبه‌تیز، مفهوم عمق بحرانی روی تاج سرریز قابل کاربرد نیست، لذا جهت استخراج روابط موردنیاز فرض می‌شود:

الف - ارتفاع آب روی سرریز همان H_d باقیمانده و انقباض یا کاهش عمقی وجود ندارد.

ب - جهت بردار سرعت آب بر روی سرریز تقریباً افقی است.

ج - فشار در تمام مقطع AB شکل (۱-۳) همان فشار اتمسفر باشد (سرریز همانند روزنه عمل می‌کند).

د - هد سرعت جریان ورودی $(V_0^2/2g)$ ناچیز است.



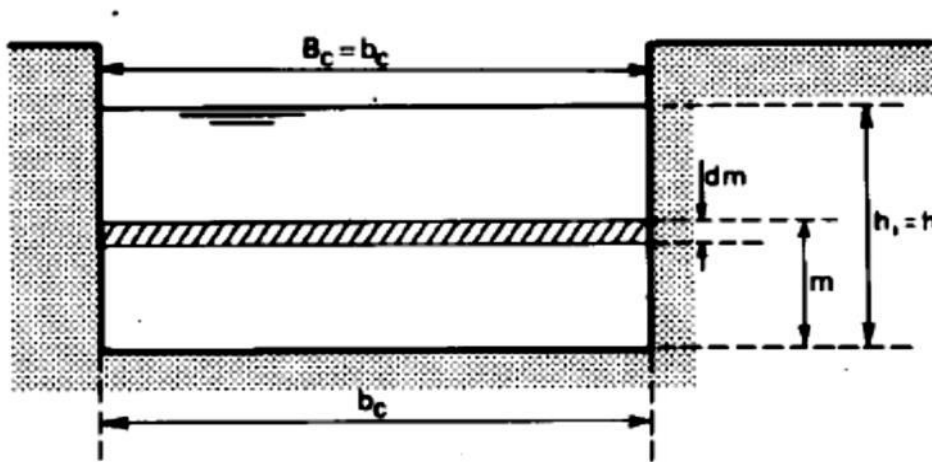
شکل (۱-۳): جریان از روی سرریز لبه تیز

با توجه به فرضیات فوق و در نظر گرفتن $h = v^2/2g$ در نقطه نظیر C در مقطع AB، رابطه زیر به دست می آید:

$$V = \sqrt{2gh} \quad (۱-۳)$$

و مقدار دبی عبوری از سرریز، برابر می شود با:

$$Q = Lq = L \int_{H_v}^{H_e} V dh = L \cdot \sqrt{2g} \int_{H_v}^{H_e} h^{1/2} \cdot dh = \frac{2}{3} \sqrt{2g} L [H_e^{1.5} - H_v^{1.5}] \quad (۲-۳)$$



شکل (۲-۳): سرریز لبه تیز مستطیلی

چون در استخراج معادلات فوق فرض می گردد شتاب گریز از مرکز در جریان عبوری از سرریز وجود ندارد، از اثرات لزجت و آشفتگی جریان صرف نظر می شود. همچنین توزیع پروفیل سرعت نیز یکنواخت

باشد. در عمل این فرضیات به طور کامل صحیح نیست لذا با معرفی ضریب C_d به عنوان ضریب دبی سعی می‌گردد تا حدودی اثرات عوامل نامبرده در تعیین دبی عبوری لحاظ گردد. مقدار ضریب دبی به مشخصات هندسی سرریز، کانال اصلی، وضعیت دیواره‌های کانال خروجی و همچنین مشخصات هیدرولیکی جریان بستگی دارد. لذا رابطه (۲-۳) به صورت زیر تصحیح می‌گردد:

$$Q = \frac{2}{3} \sqrt{2gL} C_d [H_e^{1.5} - H_v^{1.5}] \cong \frac{2}{3} \sqrt{2gL} C_d (y_1 - w)^{1.5} \quad (۳-۳)$$

که در آن Q دبی عبوری از سرریز جانبی، L طول سرریز، g شتاب ثقل، y_1 عمق آب بالادست سرریز و w ارتفاع تاج سرریز است.

ضریب C_d شامل اثرات عدم یکنواختی پروفیل سرعت و انقباض جریان در حین عبور از سرریز نیز می‌باشد تغییرات C_d که تابعی از (H_d/w) است، به وسیله رابطه ره‌بوک (۱۹۲۹) به صورت زیر ارائه شد:

$$C_d = 0.611 + 0.08 \frac{H_d}{w} \quad \frac{H_d}{w} \leq 5 \quad (۴-۳)$$

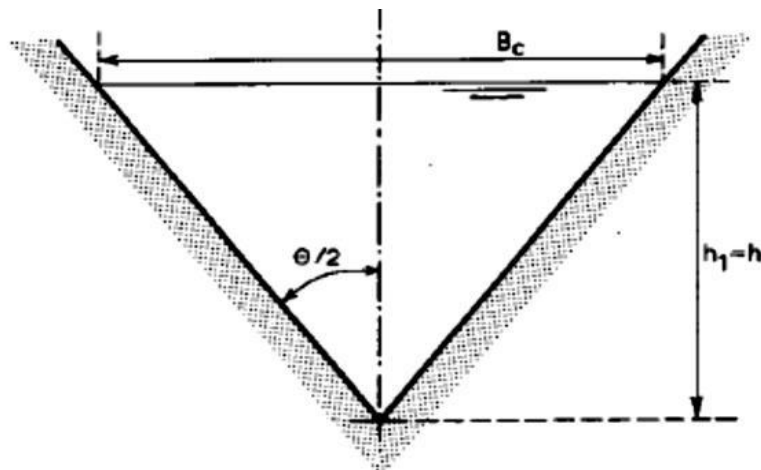
از بررسی رابطه فوق ملاحظه می‌شود چنانچه مقدار w بسیار زیاد باشد، C_d مساوی ۰.۶۱۱ می‌گردد که برابر مقدار عددی $\left(\frac{\pi}{\pi+2}\right)$ است. این عدد به عنوان ضریب انقباض یک جت آبی بدون افت انرژی که تحت تأثیر ثقل قرار نگرفته و از یک تانک بزرگ خارج شود، در قرن ۱۹ میلادی توسط کرشهف معرفی گردید. برای سایر مقادیر (H_d/w) ، رابطه مذکور تغییر نموده و در صورتی که $(H_d/w) > 20$ باشد تجربه ثابت نموده که در چنین حالتی جریان بالادست سرریز بحرانی شده و مقدار C_d برابر می‌شود با:

$$C_d = 1.06 \left(1 + \frac{w}{H_d}\right)^{3/2} \quad (۵-۳)$$

۳-۲-۲ ضریب دبی مستقیم در سرریز لبه تیز مثلثی

سرریزهای لبه تیز مثلثی که به صورت متقارن در یک صفحه نازک و عمود بر کناره‌ها و کف کانال قرار می‌گیرند، به جهت دارا بودن سطح مقطع کوچکتر، در دبی‌های کم حساسیت بیشتری نسبت به تغییر

ارتفاع داشته و لذا در اندازه‌گیری دبی‌های کم در مقایسه با سرریزهای مستطیلی از دقت بیشتری برخوردارند. به همین دلیل جهت انجام اندازه‌گیری‌های حساس با دبی کم و در تحقیقات آزمایشگاهی، بیشتر از سرریزهای مثلثی که به سرریزهای V شکل موسوم‌اند، استفاده می‌شود.



شکل (۳-۳): سرریز لبه تیز مثلثی شکل

رابطه تعیین دبی این نوع سرریزها از طریق حل تحلیلی و با گرفتن انتگرال روی جزء المان با همان فرضیاتی که برای سرریزهای مستطیلی در نظر گرفته شده بود، به دست می‌آید.

برای مقطع کنترل مثلث شکل (۳-۳):

$$x = 2m \tan\left(\frac{\theta}{2}\right)$$

که در آن θ زاویه رأس سرریز مثلثی است.

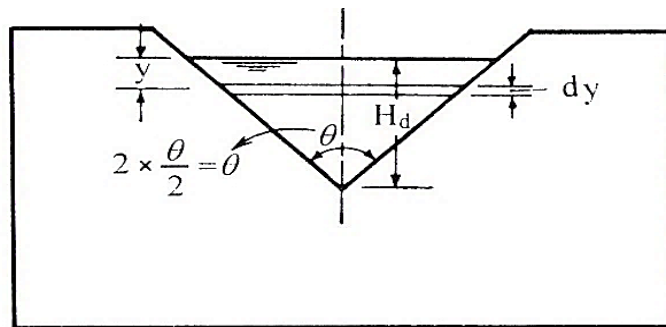
برای سرریز مثلثی:

$$Q = \frac{8}{15} \sqrt{2g} C_d (\tan \frac{\theta}{2}) H_d^{2.5} \approx \frac{8}{15} \sqrt{2g} C_d \tan(\frac{\theta}{2}) (y_1 - w)^{2.5} \quad (۶-۳)$$

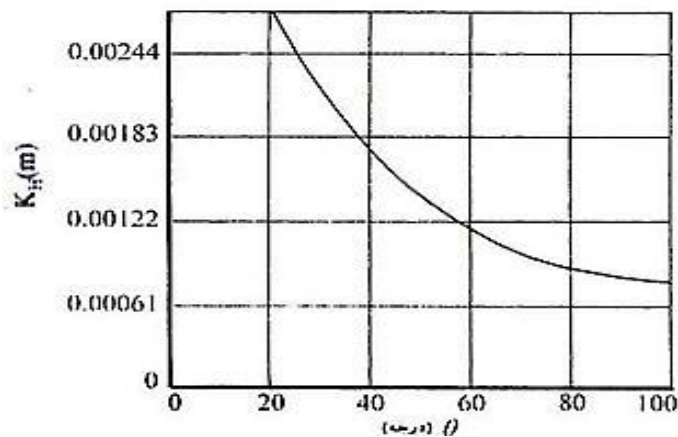
که در آن y_1 عمق جریان در بالادست سرریز است. در استخراج رابطه فوق از انرژی حرکتی ($v_0^2/2g$) صرف نظر گردیده است. چون مقدار واقعی دبی از آنچه از رابطه (۳-۶) به دست می‌آید، کمتر است، باس (۱۹۷۶) جهت اصلاح آن، رابطه زیر را پیشنهاد داد:

$$Q = \frac{8}{15} \sqrt{2g} C_{de} \left(\tan \frac{\theta}{2} \right) H_{de}^{2.5} \quad (۷-۳)$$

که $H_{de} = H_d + K_h$ ضریب C_{de} تابعی از زاویه θ بوده که از منحنی‌های زیر قابل محاسبه است.

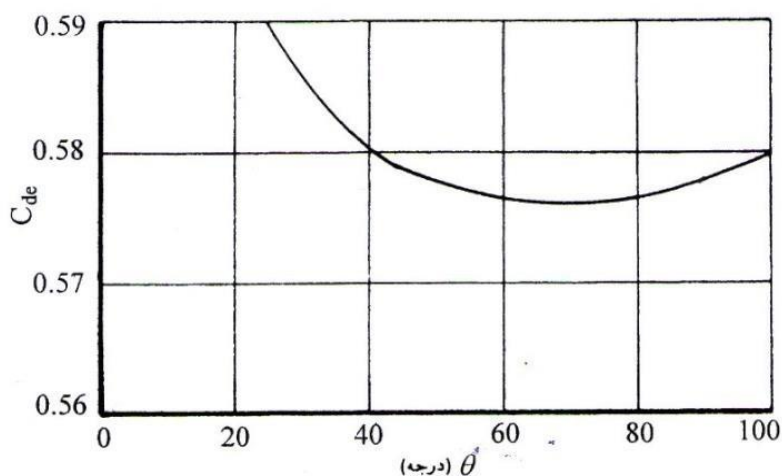


شکل (۳-۴) شمای یک سرریز لبه تیز مثلثی



شکل (۳-۵) مقادیر K_H بر حسب زاویه θ

در بسیاری از تحقیقات گذشته ضریب دبی متوسط به روش مستقیم و از روابط (۳-۳) و (۳-۶) محاسبه شده‌اند. در این روش کافی است پس از انجام آزمایش‌ها و استخراج نتایج، ضریب دبی سرریزهای مستطیلی و مثلثی را برای تمام آزمایش‌ها مطابق روابط (۳-۸) و (۳-۹) محاسبه، سپس با بکارگیری روش آنالیز ابعادی پارامترهای بی‌بعد مؤثر را شناسایی نمود.



شکل (۶-۳) مقادیر C_{de} بر حسب زاویه θ

در گام بعد با ارائه رابطه برای ضرایب دبی، به کمک روش رگرسیون غیرخطی نسبت به تعیین ضرایب ثابت و مجهول آن اقدام کرد. این ضرایب به نحوی تعیین می‌شوند که کمترین خطای نسبی (مجموع مربعات خطا) را نسبت به داده‌های آزمایش ایجاد نماید.

$$C_d = \frac{Q_w}{\frac{2}{3}\sqrt{2gl}(y_1-w)^{1.5}} \quad (۸-۳)$$

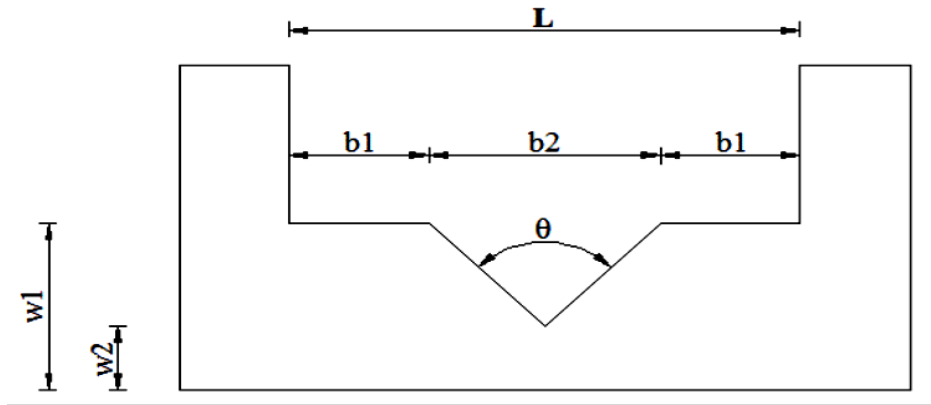
$$C_d = \frac{Q_w}{\frac{8}{15}\sqrt{2g(\tan\frac{\theta}{2})(y_1-w)^{2.5}}} \quad (۹-۳)$$

که در آن Q_w دبی عبوری از سرریز است.

در این شیوه چون از حداقل داده‌های آزمایشگاهی استفاده می‌شود و نقاط کنترلی آن نیز اندک است تأثیر عوامل و پارامترهای مؤثر بر ضریب دبی کمتر لحاظ می‌گردد که در نتیجه از دقت رابطه پیشنهادی نیز کاسته می‌شود؛ اما از مزایای این روش سهولت و سرعت انجام محاسبات است که با داشتن چند پارامتر هیدرولیکی و هندسی می‌توان نسبت به تعیین مقدار دبی انحراف اقدام نمود. در این روش امکان محاسبه پروفیل جریان وجود ندارد.

۳-۳ ضریب دبی مستقیم در سرریز مرکب مثلثی - مستطیلی

در پژوهش حاضر رابطه ضریب دبی متوسط سرریز مرکب مثلثی- مستطیلی از روش مستقیم نیز محاسبه و ارائه شده است.



شکل (۷-۳) سرریز مرکب مثلثی - مستطیلی

به دلیل تغییر تراز تاج در سرریز مرکب از روش پارامتر ارتفاع وزنی تاج استفاده گردید، که استفاده از این روش برای اولین بار توسط ظهیری و همکاران (۲۰۱۳) برای سرریز مرکب مستطیلی - مستطیلی و عامری و همکاران (۲۰۱۴) برای سرریز مرکب مستطیلی - مستطیلی و مثلثی - مستطیلی معرفی شد. به طوری که ضریب دبی برای سرریز مرکب مثلثی - مستطیلی شکل به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$C_d = \frac{Q_w}{\frac{8}{15} \sqrt{2g} (\tan \frac{\theta}{2}) (y_1 - \bar{w})^{2.5}} \quad (۱۰-۳)$$

که در آن \bar{w} وزنی تاج سرریز بوده و برای این سرریز به صورت زیر به دست می‌آید:

$$\bar{w} = \frac{2w_1b_1 + w_2b_2 + 0.5b_2(w_1 - w_2)}{2b_1 + b_2} \quad (۱۱-۳)$$

در این شیوه سرریز مثلثی - مستطیلی به یک سرریز مستطیلی ساده با سطح بازشدگی یکسان و با ارتفاع تاج \bar{w} معادل شده است.

۳-۴ ضریب دبی دیمارچی در سرریزهای ساده مستطیلی و مثلثی

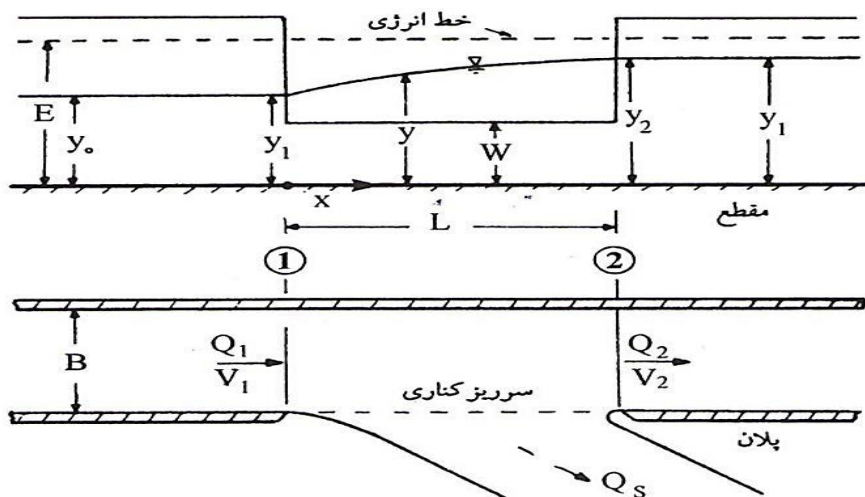
دیمارچی، در سال ۱۹۳۴ برای به دست آوردن رابطه‌های جهت سرریزهای کناری و با توجه به شکل (۳-۹)، فرضیات زیر را در نظر گرفت:

۱- کانال مستطیلی و منشوری است.

۲- سرریز جانبی دارای طول کوتاه بوده و انرژی مخصوص بین مقاطع ۱ و ۲ ثابت است. این امر معادل فرض $S_0 - S_f = 0$ بوده که نتایج تجربی نشان می‌دهد یک فرض تقریباً قابل قبول است.

۳- سرریز جانبی به صورت لبه تیز با هوادهی کامل بوده و آب به صورت آزاد از روی آن ریزش می‌کند.

۴- ضریب تصحیح سرعت در رابطه انرژی (α) مساوی یک باشد.



شکل (۳-۸) شمای یک سرریز کناری

چنانچه در فصل دوم مشاهده شد رابطه دینامیکی جریان متغیر مکانی با کاهش دبی به صورت زیر به دست آمد:

$$\frac{dy}{dx} = \frac{S_0 - S_f - \left(\frac{\alpha Q}{gA^2}\right) * \left(\frac{dQ}{dx}\right)}{1 - \alpha F_r^2} \quad (۳-۱۲)$$

با در نظر گرفتن فرضیات مطرح شده رابطه (۱۲-۳) به شکل زیر درمی آید:

$$\frac{dy}{dx} = \frac{\frac{Q}{gB^2y^2}(-\frac{dQ}{dx})}{1 - \frac{Q^2}{gy^3B^2}} = \frac{Qy(-\frac{dQ}{dx})}{gB^2y^3 - Q^2} \quad (۱۳-۳)$$

که در آن تغییرات عمق جریان در طول سرریز و B عرض کانال است.

از طرفی تغییرات دبی در طول سرریز مستطیلی لبه تیز ($\frac{dQ}{dx}$) که توسط هندرسون (۱۹۶۶) ارائه شد، برابر است با:

$$q = -\left(\frac{dQ}{dx}\right) = \left(\frac{dQ_w}{dx}\right) = \frac{2}{3} C_m \sqrt{2g}(y-w)^{1.5} \quad (۱۴-۳)$$

و برای سرریز مثلثی لبه تیز، توسط کومار و پاتاک (۱۹۸۷) به صورت زیر پیشنهاد داده شد:

$$q = -\left(\frac{dQ}{dx}\right) = \left(\frac{dQ_w}{dx}\right) = \frac{4}{15} C_m \sqrt{2g}(y-w)^{1.5} \quad (۱۵-۳)$$

که در آن C_m ضریب دبی بوده و به ضریب دیمارچی موسوم است. با توجه به فرض ثابت بودن انرژی مخصوص (E) در طول سرریز مقدار دبی در مقطع کانال، از عبارت زیر حاصل می گردد:

$$Q = By\sqrt{2g(E-y)} \quad (۱۶-۳)$$

با جایگذاری معادلات (۱۴-۳) و (۱۶-۳) در (۱۲-۳) رابطه زیر برای سرریز مستطیلی به دست می آید:

$$\frac{dy}{dx} = \frac{4}{3} \frac{C_m}{B} \frac{\sqrt{(E-y)(y-w)^3}}{3y-2E} \quad (۱۷-۳)$$

و همین طور با قرار دادن روابط (۱۴-۳) و (۱۵-۳) در (۱۲-۳) برای سرریز مثلثی می شود:

$$\frac{dy}{dx} = \frac{8}{15} \frac{C_m}{B} \frac{\sqrt{(E-y)(y-w)^3}}{3y-2E} \quad (۱۸-۳)$$

با فرض اینکه C_m مستقل از x باشد، پس از انجام عملیات انتگرال گیری و ساده سازی رابطه زیر که به رابطه دیمارچی معروف است به دست می آید:

$$\Phi_2 - \Phi_1 = \frac{2E-3W}{E-W} \left[\left(\frac{E-y_2}{y_2-w} \right)^{0.5} - \left(\frac{E-y_1}{y_1-w} \right)^{0.5} \right] \quad (19-3)$$

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

در این رابطه Φ_1 و Φ_2 تابع جریان متغیر دیمارچی در بالادست و پایین دست سرریز جانبی است. همچنین y_1 و y_2 به ترتیب اعماق جریان در بالادست و پایین دست سرریز می باشند. رابطه (۱۹-۳) به رابطه دیمارچی معروف بوده و چنانچه خواسته شود فاصله بین دو مقطع ۱ و ۲، L محاسبه گردد کافی است با داشتن پارامترهای عمق و دبی در بالادست و پایین دست مقادیر x_1 و x_2 را محاسبه و از تفاضل آنها طول سرریز را مطابق زیر به ترتیب برای سرریز مستطیلی و مثلثی ساده به دست آورد:

$$L = x_2 - x_1 = \frac{3B}{2C_m} (\Phi_2 - \Phi_1) \quad (20-3)$$

$$L = x_2 - x_1 = \frac{15B}{4C_m} (\Phi_2 - \Phi_1) \quad (21-3)$$

مسلماً برای حل رابطه فوق نیاز به ضریب دیمارچی C_m نیز است و در فصل قبل اشاره شد که محققین زیادی، روابطی را به صورت تجربی برای محاسبه آن ارائه داده اند. مقادیر این ضریب وابسته به پارامترهای مختلفی از جمله مشخصات جریان در کانال اصلی و شرایط هندسی سرریز است.

با داشتن داده های آزمایش می توان ضریب دبی دیمارچی را از روابط (۲۲-۳) و (۲۳-۳) به ترتیب برای سرریز مستطیلی و مثلثی ساده محاسبه نمود:

$$C_m = \frac{3B}{2L} \Delta\Phi + \text{const} \quad (22-3)$$

$$C_m = \frac{15B}{4L} \Delta\Phi + \text{const} \quad (23-3)$$

لازم به توضیح است که بر اساس رابطه دیمارچی، فقط مقدار دبی عبوری از سرریز قابل محاسبه است و امکان ترسیم پروفیل آب وجود ندارد. با داشتن مشخصات جریان کانال در مقطع بالادست سرریز مرکب (Q_1 و γ_1) و هندسه آن به همراه C_m مقادیر γ_2 از رابطه (۳-۲۰) به دست آمده و سپس به کمک رابطه (۳-۱۶) مقادیر دبی در کانال و پایین دست سرریز محاسبه می‌شود. در نهایت دبی عبوری از سرریز به کمک رابطه زیر تعیین می‌گردد:

$$Q_w = Q_1 - Q_2 \quad (۳-۲۴)$$

لازم به ذکر است که مقادیر γ_2 از روش سعی و خطا به دست می‌آیند و برای همگرا شدن محاسبات تغییرات آن باید بسیار جزئی باشد.

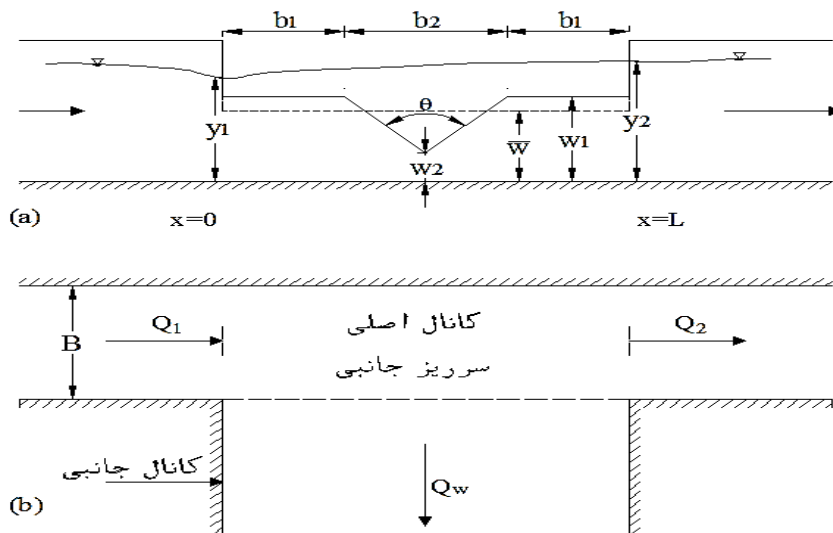
۳-۵ ضریب دبی دیمارچی در سرریز مرکب مثلثی - مستطیلی

اصول کلی تعیین ضریب دبی دیمارچی در سرریزهای ساده و مرکب تفاوت زیادی ندارد. فقط مشکلی که در سرریزهای مرکب وجود دارد تغییر تراز تاج سرریز در طول آن است. از آنجایی که رابطه کلی دیمارچی بر اساس تراز تاج ثابت استخراج گردیده، جهت حل این معضل می‌توان به روش معادل نمودن سرریز مرکب با یک سرریز مستطیلی اقدام نمود که در ادامه تشریح می‌گردد.

۳-۵-۱ معادل نمودن سرریز مرکب با یک سرریز مستطیلی

این روش بر مبنای معادل‌سازی سرریز مرکب با یک سرریز مستطیلی به ارتفاع وزنی تاج (\bar{W}) استوار شده است. شکل (۳-۹) چگونگی این معادل‌سازی را نشان می‌دهد. در این روش به دلیل تغییرات تراز تاج در طول سرریز و مشکل استفاده از ضریب دبی در روابط دیمارچی مقطع مرکب با یک سرریز

مستطیلی به ارتفاع وزنی تاج \bar{W} معادل می‌شود. به عبارتی سطح بازشدگی دو مقطع یکسان در نظر گرفته می‌شود. پارامتر \bar{W} توسط رابطه (۳-۱۱) برای سرریز مثلثی - مستطیلی محاسبه می‌گردد.



شکل (۳-۹) معادل نمودن سرریز مرکب مثلثی - مستطیلی با یک سرریز مستطیلی

با استفاده از رابطه دیمارچی مقادیر ضریب دبی برای مقطع سرریز معادل به شرح زیر تعیین می‌شود:

- ۱- با داشتن پارامترهای هیدرولیکی عمق و دبی جریان در بالادست سرریز (Q_1 و y_1) آزمایش‌ها مقدار انرژی مخصوص از رابطه زیر بدست می‌آید:

$$E = y_{11} + \frac{Q_{11}^2}{2gB_1^2 y_{11}^3} \quad (۳-۲۵)$$

- ۲- پارامتر ارتفاع وزنی تاج (\bar{W}) به کمک رابطه (۳-۱۱) تعیین می‌شود.

- ۳- با داشتن عمق جریان در پایین دست سرریز (y_2)، دبی عبوری از آن (Q_w) و با فرض عدم

اتلاف انرژی در طول سرریز ضریب دبی دیمارچی (C_m) مطابق روابط زیر به دست می‌آید:

$$\Delta\Phi = \frac{2E-3\bar{W}}{E-\bar{W}} \left[\left(\frac{E-y_2}{y_2-\bar{W}} \right)^{0.5} - \left(\frac{E-y_1}{y_1-\bar{W}} \right)^{0.5} \right] - 3 \left[\sin^{-1} \left(\frac{E-y_2}{E-\bar{W}} \right)^{0.5} - \sin^{-1} \left(\frac{E-y_1}{E-\bar{W}} \right)^{0.5} \right] \quad (۳-۲۶)$$

$$C_m = \frac{3B}{2L} \Delta\Phi + \text{const} \quad (27-3)$$

۴- با تعیین مقادیر C_m برای کلیه داده‌ها، به کمک آنالیز ابعادی پارامترهای مؤثر بر ضریب دبی مشخص می‌شوند.

۵- رابطه‌ای برای ضریب دبی که دربرگیرنده پارامترهای بی‌بعد مؤثر باشد ارائه می‌گردد.

۶- ضرایب مجهول و ثابت رابطه پیشنهادی به کمک روش رگرسیون غیرخطی به نحوی مشخص می‌گردند که درصد میانگین خطای بین مقادیر مشاهداتی و محاسباتی ضریب دبی حداقل شود. (حداقل مجموع مربعات خطا)

چنانچه خواسته شود دبی عبوری از سرریز مرکب تعیین گردد، کافی است با برداشت مقادیر دبی ورودی (Q_1)، عمق بالادست جریان (y_1) انرژی مخصوص محاسبه، سپس به کمک رابطه پیشنهادی، ضریب دبی مشخص شود.

با قرارگیری پارامترهای اخیر در رابطه (۴-۲۵) مقدار عمق جریان پایین دست سرریز (y_2) به دست می‌آید. با فرض عدم اتلاف انرژی در طول سرریز، مقدار دبی پایین دست محاسبه و به دنبال آن دبی عبوری از سرریز تعیین می‌گردد.

۳-۶ آنالیز ابعادی

منظور از آنالیز ابعادی، گروه‌بندی متغیرهای مؤثر در یک پدیده فیزیکی به گروه‌های بدون بعد است. هر یک از این گروه‌های بدون بعد، π نامیده می‌شوند (که ارتباطی با مقدار عددی ۳/۱۴ ندارد). باید توجه داشت که شناخت و تعیین متغیرهای مؤثر، از ضابطه‌ی خاصی تبعیت نمی‌کند و تنها بر اساس

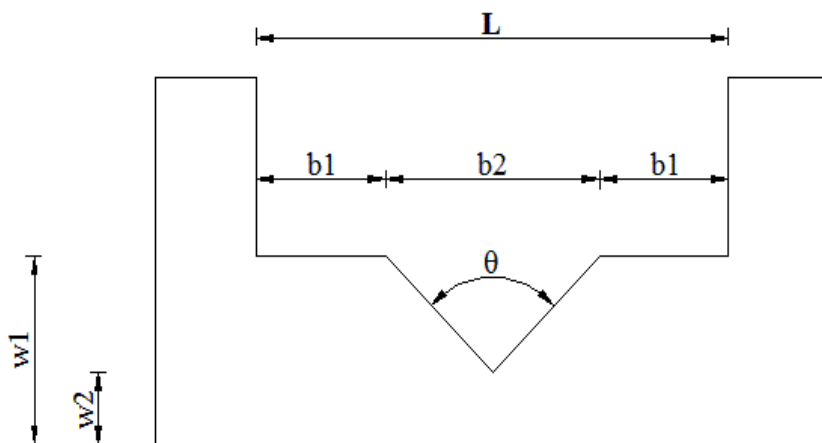
تجربه و قضاوت مهندسی است. مزیت استفاده از آنالیز ابعادی نیز، در کاهش تعداد متغیرهای مسئله و به کارگیری نتایج فشرده‌ی حاصل برای تمام وضعیت‌هاست.

حال این سوال پیش می‌آید که در یک پدیده فیزیکی با یک تعداد متغیر موثر معلوم، چه تعداد پارامتر بدون بعد π قابل تشخیص است و اصولاً چگونه می‌توان با استفاده از آنالیز ابعادی این پارامترها را مشخص کرد؟ برای پاسخ به این سوال بایستی از قضیه‌ی π - باکینگهام استفاده نمود. در این روش می‌توان تعدادی از پارامترهای بی‌بعد 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. سپس با انجام آزمایشهای متعدد و یا عملیات صحرایی، نحوه تأثیر پارامترهای موردنظر در پدیده را مورد بررسی قرار داده و در نهایت رابطه ریاضی که دارای کمترین خطا نسبت به مقادیر مشاهداتی دارد، ارائه نمود. در بخش آزمایشگاهی انجام آنالیز ابعادی ضریب دبی عبوری از سرریز ضروری بوده که در ادامه برای سرریز مرکب مثلثی - مستطیلی ارائه می‌شود.

۳-۶-۱ آنالیز ابعادی ضریب دبی در سرریز جانبی لبه تیز مرکب مثلثی مستطیلی

به طور کلی پارامترهای مهم مؤثر بر روی ضریب دبی سرریز مثلثی - مستطیلی شکل (۳-۱۰) را می‌توان به شرح زیر دسته بندی نمود:

- ۱- خصوصیات مربوط به سیال شامل: جرم حجمی مایع (ρ)، لزجت دینامیکی سیال (μ)، کشش سطحی (σ) و شتاب ثقل (g).
- ۲- خصوصیات مربوط به جریان شامل: دبی جریان در بالادست سرریز (Q)، عمق جریان در بالادست سرریز (V_1) و سرعت جریان در بالادست سرریز (V_1).
- ۳- مشخصات هندسی سرریز شامل: طول سرریز (L)، ارتفاع سرریز (w) و زاویه رأس سرریز (θ).
- ۴- خصوصیات هندسی کانال شامل: عرض کانال (B).



شکل (۳-۱۰) سرریز جانبی لبه تیز مرکب با مقطع مثلثی - مستطیلی

با توجه به مواد فوق ضریب شدت جریان به متغیرهای زیر وابسته می‌گردد:

$$C_d = f(\rho, \mu, g, Q_1, y_1, V_1, w_1, w_2, b_1, b_2, B, \sigma, \psi, S_0, \theta) \quad (۳-۲۸)$$

(ρ) جرم حجمی سیال، (μ) لزجت دینامیکی سیال، (g) شتاب ثقل، (y_1) عمق بالادست سرریز، (b_1) طول تاج سرریز بالایی، (b_2) طول تاج سرریز پایینی، (L) طول سرریز جانبی، (V_1) سرعت جریان در بالادست سرریز، (Q_1) دبی جریان در بالادست سرریز، (w_1) ارتفاع تاج سرریز بالایی، (w_2) ارتفاع تاج سرریز پایینی، (B) عرض کانال اصلی، (σ) ضریب کشش سطحی آب، (ψ) زاویه انحراف جریان، (S_0) شیب طولی کانال و (θ) زاویه رأس سرریز مرکب می‌باشند.

دبی جریان در بالادست سرریز تابعی از V_1, B, y_1 می‌باشد، بنابراین می‌توان Q_1 از رابطه (۳-۲۸) حذف نمود. با توجه به شکل (۳-۱۰) سرریز مرکب، ارتفاع تاج در طول سرریز متفاوت است و مقدار ثابتی ندارد. به همین دلیل در این تحقیق از پارامتر ارتفاع وزنی تاج سرریز (\bar{w}) که عامری و همکاران (۲۰۱۴) ارائه دادند، مورد استفاده قرار گرفت.

$$\bar{w} = \frac{2w_1b_1 + w_2b_2 + 0.5(w_1 - w_2)b_2}{2b_1 + b_2} \quad (۳-۲۹)$$

$$L = 2b_1 + b_2 \quad (30-3)$$

بنابراین ضریب دبی در این گونه سرریزها با تابع زیر قابل بیان است:

$$C_d = f(\rho, \mu, g, \gamma_1, V_1, \bar{w}, L, B, \sigma, \psi, S_0) \quad (31-3)$$

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

$$C_d = f(Fr_1 = \frac{V_1}{\sqrt{g\gamma_1}}, We = \frac{\rho\gamma_1 V_1^2}{\sigma}, Re = \frac{\rho\gamma_1 V_1}{\mu}, \frac{L}{B}, \frac{L}{\gamma_1}, \frac{\bar{w}}{\gamma_1}, \psi, S_0) \quad (32-3)$$

که در آن Fr_1 عدد فرود جریان در بالادست سرریز، We عدد وبر، Re عدد رینولدز است.

از طرفی قدسیان (۲۰۰۴) با علم به این موضوع که حداقل ارتفاع آب روی سرریز هنگام برداشت داده‌های آزمایشگاه همواره تأمین شده است یعنی ($\gamma_1 > 5 \text{ mm}$)، از مقدار عدد وبر (We) در محاسباتش صرف نظر نمود. از آنجایی که این معیارها در آزمایشها این پژوهش نیز رعایت شد اثر وبر از روابط حذف می‌گردد. با اطمینان از آشفته بودن جریان در طول سرریز جانبی می‌توان از اثر عدد رینولدز (Re) نیز صرف نظر نمود.

زاویه انحراف جریان ψ که میزان انحراف لایه عبوری آب از روی سرریز نسبت به امتداد سرریز جانبی است به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\sin \psi = \sqrt{1 - \left(\frac{V_1}{V_s}\right)^2} \quad (33-3)$$

که در آن V_1 سرعت متوسط جریان کانال در مجاورت سرریز و در امتداد کانال اصلی و V_s سرعت جریان جزئی دبی عبوری از لبه سرریز جانبی است.

الخشاب (۱۹۷۶) نشان داد که پارامتر بی بعد ($\frac{L}{B}$) سرریز، شامل اثرات زاویه انحراف در ضریب دبی نیز می‌باشد. بر این اساس ψ از رابطه (۳-۳۲) حذف می‌گردد.

در نتیجه ضریب دبی در سرریز مثلثی - مستطیلی تابع پارامترهای زیر خواهد بود:

$$C_d = f(Fr_1, \frac{\bar{w}}{y_1}, \frac{L}{y_1}, S_0) \quad (3-34)$$

۳-۷ محدوده پارامترهای هیدرولیکی و هندسی آزمایش‌ها

آزمایش‌ها برای تعدادی از مقاطع سرریز مرکب با مشخصات مختلف انجام شد. در فلوم آزمایشگاهی سه شیب طولی مختلف کانال به همراه ۴ دبی ورودی انتخاب شد و در هر یک از این دبی‌ها ۵ عمق جریان بالادست متفاوت ایجاد گردید به طوری که این تغییرات در محدوده شرایط جریان زیربحرانی قرار داشت. محدوده آزمایشات برای هر دو تیپ مقطع با زوایای رأس ۶۰ و ۹۰ درجه در جدول (۳-۱) و مشخصات هندسی مقاطع سرریز در جدول (۳-۲) ارائه گردیده است.

جدول (۳-۱): محدوده آزمایشات سرریز جانبی لبه تیز مرکب مثلثی - مستطیلی

متغیرها	$\theta = 60^\circ$	$\theta = 90^\circ$
Channel width (m)	۰/۶	۰/۶
Discharge (L/S)	۴۰-۱۰۰	۴۰-۱۰۰
Weir length (m)	۰/۴-۰/۶	۰/۴-۰/۶
Froude number	۰/۲-۰/۶	۰/۲-۰/۷
$\frac{\bar{w}}{y_1}$	۰/۵-۰/۸	۰/۴-۰/۸
$\frac{L}{y_1}$	۱/۳-۳	۱/۴-۳/۲
Number of runs	۴۳۵	۴۴۱

جدول (۲-۳): مشخصات هندسی مقاطع سرریز

Run number	Width (cm)	Slope	$\theta = 60^\circ$		$\theta = 90^\circ$		W_1 (cm)	W_2 (cm)	\bar{W} (cm)
			b_1	b_2	b_1	b_2			
۱	۶۰	۰/۰۰۱، ۰/۰۰۲، ۰/۰۰۳	۱۳/۰۷	۱۳/۸۶	۸	۲۴	۱۶/۳۰	۴/۳۵	۱۴/۲۲
۲	۶۰	۰/۰۰۱، ۰/۰۰۲، ۰/۰۰۳	۱۳/۰۷	۱۳/۸۶	۸	۲۴	۱۸/۳۰	۶/۳۵	۱۶/۲۲
۳	۶۰	۰/۰۰۱، ۰/۰۰۲، ۰/۰۰۳	۱۳/۰۷	۱۳/۸۶	۸	۲۴	۲۰/۳۰	۸/۳۷	۱۸/۲۳
۴	۶۰	۰/۰۰۱، ۰/۰۰۲، ۰/۰۰۳	۱۱/۹۲	۱۶/۱۷	۶	۲۸	۱۶/۳۰	۲/۳۵	۱۳/۴۸
۵	۶۰	۰/۰۰۱، ۰/۰۰۲، ۰/۰۰۳	۱۱/۹۲	۱۶/۱۷	۶	۲۸	۱۸/۳۰	۴/۳۰	۱۵/۴۳
۶	۶۰	۰/۰۰۱، ۰/۰۰۲، ۰/۰۰۳	۱۴/۲۳	۱۱/۵۵	۱۰	۲۰	۱۴/۳۰	۴/۳۵	۱۲/۸۶
۷	۶۰	۰/۰۰۱، ۰/۰۰۲، ۰/۰۰۳	۱۴/۲۳	۱۱/۵۵	۱۰	۲۰	۱۶/۵۷	۶/۶۵	۱۵/۱۳
۸	۶۰	۰/۰۰۱، ۰/۰۰۲، ۰/۰۰۳	۱۵/۳۸	۹/۲۴	۱۲	۱۶	۱۶/۵۰	۸/۵۷	۱۵/۵۸
۹	۶۰	۰/۰۰۱، ۰/۰۰۲، ۰/۰۰۳	۱۰/۷۶	۱۸/۴۸	۴	۳۲	۲۰/۵۸	۴/۶۵	۱۶/۹۰
۱۰	۶۰	۰/۰۰۱، ۰/۰۰۲، ۰/۰۰۳	۱۸/۰۷	۱۳/۸۶	۱۳	۲۴	۱۶/۶۰	۴/۶۷	۱۴/۹۴
۱۱	۶۰	۰/۰۰۱، ۰/۰۰۲، ۰/۰۰۳	۲۳/۰۷	۱۳/۸۶	۱۸	۲۴	۱۶/۲۵	۴/۳۴	۱۴/۸۷

۳-۸ دستگاهها و تجهیزات آزمایشگاه

آزمایش‌های این تحقیق در فلوم با سه شیب ۰/۰۰۱، ۰/۰۰۲، ۰/۰۰۳ به طول ۱۰ متر، عرض ۶۰ سانتی متر و ارتفاع ۷۵ سانتی متر ساخته شد. جنس کف از ورق فلزی رنگ‌آمیزی شده و دیوارها شیشه به ضخامت ۸ میلی‌متر در نظر گرفته شد. محل قرارگیری سرریز جانبی به فاصله ۴/۵ متری از ابتدای کانال تعبیه گردید. برای تأمین آب موردنیاز دو مخزن با مصالح بنایی و فلزی به حجم کل ۱۸ مترمکعب طراحی و ساخته شد. جهت تأمین دبی ورودی موردنیاز از یک پمپ گریز از مرکز با توان خروجی ۱۲۰

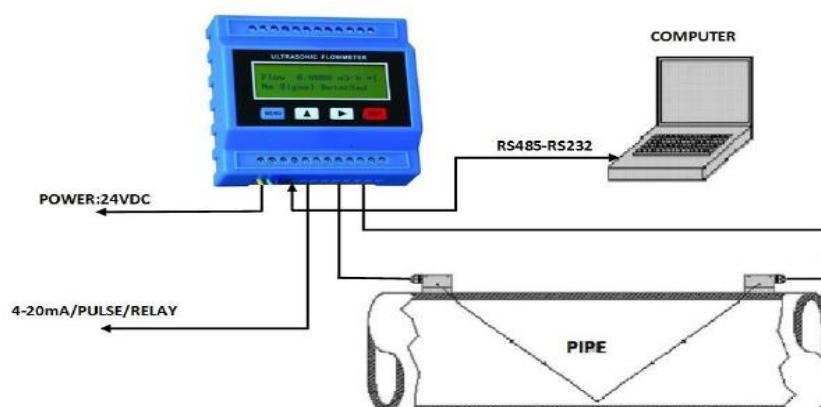
لیتر در ثانیه استفاده شد و با نصب دو شیر کشویی امکان تغییر مقدار دبی ورودی فراهم گردید. دبی ورودی توسط یک فلومتر آلتراسونیک^{۲۲} با دقت ۰/۰۱ لیتر بر ثانیه اندازه‌گیری گردید. جهت تعیین دبی خروجی سرریز جانبی مرکب، یک مخزن فلزی به طول ۳ متر، عمق ۶۰ سانتی‌متر و عرض یک متر ساخته و به‌منظور اندازه‌گیری دبی خروجی از سرریز جانبی، سرریز نرمال مثلثی ۹۰ درجه انتهای مخزن نصب و کالیبره شد. برای جلوگیری از ورود تلاطم به دلیل ریزش جریان از روی سرریز جانبی به داخل مخزن جانبی، از ورق‌های عرضی سوراخدار به عنوان آرام‌کننده جریان^{۲۳} به صورت عرضی در فاصله ۲ متری از سرریز مثلثی نصب شد. عمق جریان داخل این مخزن به کمک یک پیژومتر که در فاصله ۱/۵ متری از سرریز مثلثی تعبیه گردیده بود قرائت شد. همچنین از یک عمق سنج دیجیتالی با دقت ۰/۰۱ میلی‌متر نیز برای اندازه‌گیری تراز سطح آب در داخل فلوم و در محدوده سرریز جانبی بکار گرفته شد. به منظور سهولت قرائت عمق‌های جریان و کاهش خطا یک ارابه فلزی طراحی و ساخته شد که بر روی ریل قرار گرفت. با نصب عمق سنج دیجیتال بر روی این ارابه امکان حرکت آن در هر دو جهت طولی و عرضی کانال فراهم گردید. به منظور تنظیم سطح آب داخل کانال و در بالادست سرریز جانبی، یک دریچه متحرک فولادی با ضخامت ۴ میلی‌متر در قسمت انتهایی فلوم نصب گردید. این دریچه توسط یک فرمان قابل تنظیم بود. در آزمایش‌هایی که ارتفاع تاج سرریز زیاد بود، جهت تأمین تراز آب موردنیاز و افزایش سطح آب تا بالای تاج سرریز از این دریچه متحرک استفاده شد. بدین صورت که با پایین آوردن دریچه، تراز سطح آب افزایش یافته و امکان قرائت و برداشت داده‌ها فراهم گردید.

همانگونه که اشاره شد برای تعیین دبی ورودی از یک فلومتر آلتراسونیک با دقت ۰/۰۱ لیتر بر ثانیه استفاده شد. این فلومتر از مدل TFM3100-F1 ساخت کارخانه اکتک ترکیه بود. برای آنکه این دستگاه بتواند کارایی و دقت لازم را داشته باشد بایستی دستورالعمل‌های آن را به دقت رعایت نمود. از جمله

²² Ultrasonic Flowmeter

²³ Buffer

تعریف جنس و ضخامت لوله ورودی، قطر لوله ورودی، نحوه و فاصله قرارگیری سنسورها نسبت به هم فاصله نصب سنسورها نسبت به محل قرارگیری شیر کشویی تنظیم شدت جریان و کنترل قدرت سیگنال جزو بخش‌های اصلی کار با این دستگاه است. شکل (۳-۱۱) دبی‌سنج آلتراسونیک مذکور به همراه اتصال نوع V سنسورها را نشان می‌دهد.



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

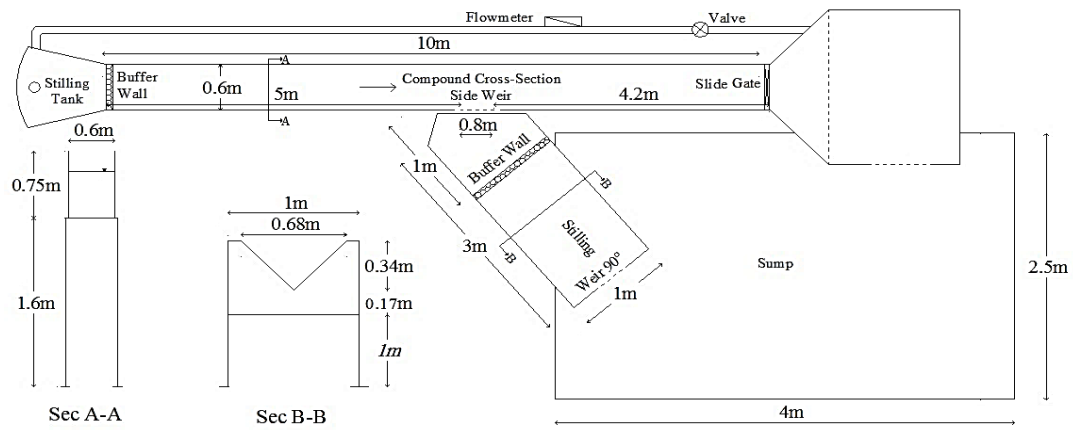
یکی از قسمت‌های مهم کار با این فلومتر، تنظیم سری زمانی به منظور متوسط‌گیری شدت جریان اندازه‌گیری شده می‌باشد؛ زیرا با توجه به عملکرد پمپ، نوساناتی در مقدار دبی ایجاد می‌شود، اگرچه این نوسانات دارای دامنه کوچکی بوده ولی جهت کاهش خطا و جلوگیری از قرائت لحظه‌ای تنظیم دمپینگ برای دستگاه ضروری است. به منظور افزایش دقت فلومتر، دستگاه توسط شرکت پشتیبانی آن کالیبره شد. علاوه بر آن به روش حجمی نیز در آزمایشگاه مجدداً کنترل شد. یکی دیگر از تجهیزات بکار گرفته شده در این آزمایش‌ها، عمق سنج دیجیتالی با دقت ۰/۱ میلی‌متر بود. چون در کلیه روشهای

محاسبه ضریب دبی، عمق جریان از اهمیت زیادی برخوردار است لذا در برداشت تراز آب دقت بسیاری صورت گرفت. در تمام آزمایش‌ها عمق‌های جریان در میانه کانال (محل قرارگیری سرریز جانبی) و روی تاج سرریز قرائت و ثبت شد. فواصل اندازه‌گیری عمق جریان به گونه‌ای تعیین شد که محل تغییر ارتفاع تاج جزو نقاط برداشت باشد. شکل (۳-۱۲) عمق سنج دیجیتال و محل‌های برداشت عمق جریان را نشان می‌دهد.



شکل (۳-۱۲): عمق سنج دیجیتالی

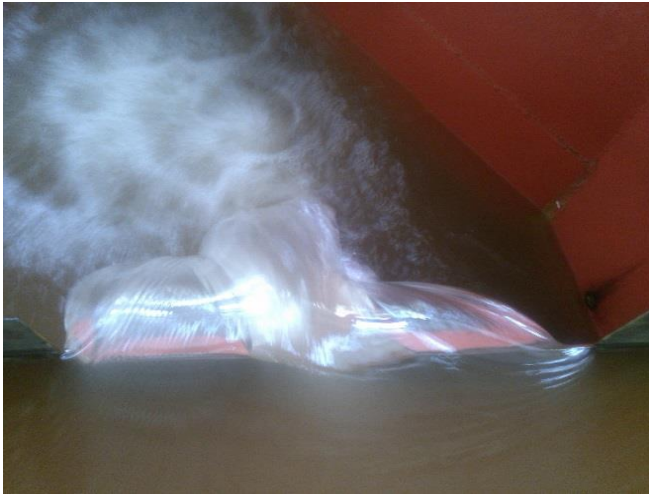
با توجه به طول سرریزها که ۷۰، ۶۰، ۵۰، ۴۰ سانتی‌متر طراحی گردید در مجموع ۱۱ نقطه برداشت در وسط کانال و روی تاج در امتداد طولی فلوم در نظر گرفته شد که فواصل این نقاط در سرریزهای مختلف با توجه به مشخصات هندسی آن متغیر بود. مجموعه فلوم تحقیقاتی به همراه تجهیزات آن در شکل (۳-۱۳) نمایش داده شده است. یکی از قابلیت‌های این فلوم شیب‌پذیری آن بود که امکان انجام آزمایش‌ها برای شیب‌های طولی مختلف را فراهم نمود. ملاحظه می‌گردد که از آرام‌کننده‌های جریان در فلوم و مخزن سرریز جانبی جهت کاهش نوسانات سطح آب استفاده شده است.



شکل (۳-۱۳): مجموعه فلوم به همراه تجهیزات جانبی آن

اشکال زیر تصاویر دبی عبوری از سرریز جانبی لبه تیز مرکب مثلثی _ مستطیلی را نشان می‌دهد.





۳-۹ نحوه استخراج روابط در روش‌های مستقیم و دیمارچی

هدف از برداشت داده‌ها در آزمایشگاه تعیین روابط ضریب دبی و دبی عبوری از سرریز مرکب مثلثی مستطیلی است. با توجه به توضیحات ارائه شده در بخش (۳-۲) برای محاسبه دبی عبوری از روی سرریز به روش مستقیم، مقدار انرژی مخصوص در روابط دخالتی ندارد، اما در بخش (۳-۴) با به دست آوردن دبی عبوری از روی سرریز در هر مقطع کانال به روش دیمارچی، از مقادیر انرژی مخصوص استفاده می‌گردد. با انجام تحلیل ابعادی و نیز مدل سازی فیزیکی، می‌توان این روابط را استخراج نمود. به کمک رابطه (۳-۳۴) و نیز شکل کلی روابطی که توسط محققان مختلف برای ضریب دبی سرریزهای جانبی لبه تیز مستطیلی و مثلثی ارائه شده است، روابط به صورت کلی زیر برای تخمین ضریب دبی سرریزهای جانبی مرکب مثلثی - مستطیلی پیشنهاد شده است، که این روابط با دو فرض مورد بررسی قرار گرفت: فرض اول رابطه (۳-۳۵)، که از جمع پارامترهای مؤثر بدست آمده از آنالیز ابعادی و فرض دوم رابطه (۳-۳۶)، حاصل ضرب پارامترهای مؤثر بدست آمده از آنالیز ابعادی می‌باشد.

$$C_d = a(Fr_1)^b + c\left(\frac{\bar{w}}{y_1}\right)^d + e\left(\frac{L}{y_1}\right)^f + g(S_0)^h + i \quad (3-35)$$

$$C_d = a(Fr_1)^b * \left(\frac{\bar{w}}{y_1}\right)^c * \left(\frac{L}{y_1}\right)^d * S_0^e \quad (3-36)$$

که در آن، ضرایب a تا i ضرایب ثابتی هستند که به کمک داده های آزمایشگاهی این پژوهش و با حداقل سازی مجموع مربعات خطا به دست می آیند. سپس به کمک رابطه (۳-۸) و (۳-۲۹) و با توجه به معلوم بودن دبی عبوری از سرریز جانبی و مشخصات هندسی سرریز، مقدار واقعی ضریب دبی سرریز جانبی لبه تیز مرکب محاسبه شد. حال به کمک روابط پیشنهادی (۳-۳۵) و (۳-۳۶) و با توجه به معلوم بودن ضریب دبی و پارامترهای بدون بعد، ضرایب ثابت روابط پیشنهادی در روش‌های مستقیم و دیمارچی طوری محاسبه شدند که ضریب دبی محاسباتی در مقایسه با ضریب دبی واقعی کمترین اختلاف را داشته باشد. به این منظور از پارامتر آماری مجموع مربعات خطا به عنوان تابع هدف و از ضرایب مجهول a تا i به عنوان متغیرهای تصمیم گیری استفاده شده و مراحل بهینه سازی ضرایب از طریق رگرسیون غیرخطی در محیط نرم افزار اکسل با استفاده از نوار ابزار solver انجام شد. با معلوم بودن ضرایب ثابت در روابط (۳-۳۵) و (۳-۳۶) می‌توان نشان داد که مقادیر محاسباتی رابطه (۳-۳۵) نسبت به رابطه (۳-۳۶) همپوشانی مناسبی با نتایج آزمایشگاهی دارد. در نهایت می‌توان رابطه (۳-۳۵) را به عنوان یک رابطه کلی برای محاسبه ی ضریب دبی در دو روش مستقیم و دیمارچی در نظر گرفت. برای محاسبه دبی عبوری از سرریز به روش دیمارچی که به صورت سعی خطا صورت می‌گیرد برنامه‌ای در محیط اکسل نوشته شد.

۳-۱۰ آمارهای ارزیابی

به منظور کنترل دقت روابط پیشنهادی در محاسبه پارامترهای موردنیاز با داده‌های آزمایشگاهی از کمیت آمارهای ارزیابی شامل موارد زیر استفاده شد:

۱- میانگین مطلق خطا (درصد خطای میانگین): (Mean Absolute Percentage Error)

$$MAPE = E = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{C_{mc} - C_{mo}}{C_{mo}} \right| \quad (35-3)$$

۲- خطای متوسط: (Mean Error)

$$ME = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (C_{mc} - C_{mo}) \quad (36-3)$$

۳- ماکزیمم خطای نسبی: (Maximum Relative Error)

$$MRE = \max\left(\frac{C_{mc} - C_{mo}}{C_{mo}}\right) \quad (37-3)$$

۴- میانگین نسبت مقادیر محاسباتی به مشاهداتی: (σ)

$$\sigma = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{C_{mc}}{C_{mo}} \quad (38-3)$$

۵- جذر میانگین مربعات خطا: (Root-mean-square error)

خطای جذر میانگین مربعات یا انحراف جذر میانگین مربعات یا خطای جذر میانگین مربعات تفاوت میان مقدار پیش بینی شده توسط مدل یا برآوردگر آماری و مقدار واقعی می‌باشد. $RMSE$ یک ابزار مناسب است برای مقایسه خطاهای پیش بینی توسط یک مجموعه داده است و برای مقایسه چند مجموعه داده کاربرد ندارد.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (C_{mc} - C_{mo})^2} \quad (39-3)$$

۶- ضریب همبستگی: (Correlation coefficient)

بیان کننده میزان همبستگی بین نتایج برآورد شده مدل و داده‌های واقعی می‌باشد. بدیهی است که هر چه مقدار آن به یک نزدیک‌تر باشد، نشان‌دهنده نزدیکی بیشتر مقادیر برآورد شده به مقادیر واقعی است. در واقع ضریب همبستگی ارتباط خطی بین دو متغیر را اندازه‌گیری می‌کند و یک ابزار ریاضی است که در پایه‌ریزی تحلیل‌ها بسیار کاربرد دارد.

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (C_{mo} - \bar{C}_{mo})(C_{mc} - \bar{C}_{mc})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (C_{mo} - \bar{C}_{mo})^2 \sum_{i=1}^n (C_{mc} - \bar{C}_{mc})^2}} \quad (40-3)$$

در این روابط اندیس‌های mc نشان‌دهنده مقادیر محاسباتی و mo بیانگر مقادیر آزمایشگاهی یا مشاهداتی است.

۳-۱۱ معرفی نرم‌افزار FLOW 3D

نرم‌افزار FLOW 3D یک نرم‌افزار قوی در زمینه دینامیک سیالات محاسباتی می‌باشد که توسط شرکت Flow Science, Inc تولید، توسعه، پشتیبانی می‌شود. این نرم‌افزار برای تحقیق در رابطه با رفتار یک، دو و سه بعدی دینامیکی سیالات در محدوده کاربردی وسیعی طراحی شده است. روش حل معادلات در این نرم‌افزار بر اساس روش حجم محدود می‌باشد. این نوع مدل‌های ریاضی از جمله ابزارهای قدرتمند برای حل معادلات پیچیده در دینامیک سیالات می‌باشند. امروزه با افزایش سرعت کامپیوترها، استفاده از این مدل‌ها گسترش چشمگیری یافته است. یکی از قابلیت‌های عمده این نرم‌افزار برای آنالیزهای هیدرولیکی، توانایی مدل کردن جریان‌های سطح آزاد با روش VOF می‌باشد.

نرم افزار FLOW 3D، از یک شبکه متشکل از سلول‌های مستطیلی استفاده می‌کند. این شبکه دارای مزایایی برای تولید آسان و نظم مناسب برای بهبود بخشیدن به شبیه‌سازی عددی است که به کمترین ذخیره حافظه احتیاج دارد. استفاده از این نرم‌افزار با توجه به توانایی گرافیکی و ارائه نتایج حل معادلات سه‌بعدی جریان با توجه به هر نوع شکل هندسی سازه‌های هیدرولیکی، می‌تواند اطلاعات مفیدی به طراح در جهت بهینه‌سازی شکل هندسی سازه مورد نظر ارائه نماید.

این نرم‌افزار توانایی نمایش تغییرات لحظه‌ای پارامترهای هیدرولیکی مختلف مانند سرعت در جهات مختلف و در هر مقطع دلخواه از سازه را به صورت فایل متنی یا گرافیکی دارا می‌باشد. همچنین نرم‌افزار توانایی نمایش به صورت یک، دو و سه بعدی نیز می‌باشد.

نرم‌افزار FLOW 3D الگوهای فیزیکی مختلفی را در خود دارد از جمله می‌توان به آب‌های کم‌عمق، لزجت، کاویتاسیون، آشفستگی، کشش سطحی و محیط‌های متخلخل اشاره کرد. این مدل‌ها در زمینه‌های مختلفی همچون هیدرولیک، هوافضا، ریخته‌گری، علوم دریایی، نفت، گاز، طراحی تزریق مرکب و غیره کاربرد دارد.

این نرم‌افزار با استفاده از تقریب احجام محدود معادله‌های حاکم بر حرکت سیالات را حل می‌کند و همه متغیرها را در مرکز سلول محاسبه می‌کند به غیر از سرعت که مقدار آن در مرکز وجوه سلول حساب می‌شود. در این نرم‌افزار از دو تکنیک VOF و FAVOR استفاده می‌شود.

در ادامه به توضیح دو تکنیک VOF و FAVOR می‌پردازیم:

- روش حجم سیال (VOF)

این روش برای نشان دادن رفتار سیال در سطح آزاد استفاده می‌گردد. در این روش ناحیه‌ای که باید مدل شود، ابتدا به شبکه‌ای از المان‌ها کوچک‌تر و یا حجم کنترل‌هایی تقسیم می‌شود. برای المان‌های حاوی سیال، مقادیر عددی برای هر کدام از متغیرهای جریان نظیر فشار، دما و سرعت در داخل آنها نگه‌داشته می‌شود.

زمانی که جریان دارای سطح آزاد است، تمام سلول‌ها پر از سیال نیستند و تعدادی از سلول‌ها که در سطح جریان قرار دارند، نیمه پر هستند. روش مناسب برای نشان دادن وضعیت سلول‌ها اینست که کمیتی به نام F ، که بیانگر جزئی از سلول است که توسط سیال پر شده است، تعریف شود. این کمیت تابع حجم سیال نامیده میشود.

با دانستن مقادیر F ، می‌توان محل سطح آزاد و زاویه‌ی آن را در میان سلول‌های میدان حل مشخص کرد. این عمل با کنترل کردن مقدار سیال در سلول‌های مجاور انجام‌پذیر است. بخش عمده‌ی سیال در داخل یک سلول سطحی به سلول مجاور با سیال بیشتر نزدیک است.

مزیت بزرگ روش VOF اینست که سیال در داخل یک شبکه ثابت جریان دارد و هیچگونه تغییر شکل و جابجایی شبکه وجود ندارد.

- روش FAVOR

روش FAVOR یکی دیگر از فنون جز حجمی است که برای تعیین هندسه بکار برده می‌شود. همان‌طور که جز حجمی سیال در داخل هر سلول شبکه برای تعیین موقعیت سطح سیال بکار برده می‌شود، یک کمیت جز حجمی دیگر نیز می‌تواند برای تعیین سطح بدنه‌ی صلب استفاده شود. از طرفی، این کمیت می‌تواند در مشخص کردن حجمی از سلول که توسط بدنه‌ی صلب اشغال نشده است (V_f) نیز استفاده شود. زمانیکه، در هر سلول، حجم اشغال شده توسط بدنه‌ی صلب مشخص باشد با روشی مشابه روش VOF می‌توان مرز صلب را در داخل شبکه‌ی ثابت مشخص کرد. این مرز برای تعیین شرایط مرزی دیواره که جریان باید از آن تبعیت کند، بکار برده می‌شود.

۳-۱۲ معادلات حاکم بر جریان آشفته

۳-۱۲-۱ معادله متوسط رینولدز ناویر استوکس (RANS)

برای ساده‌سازی بیشتر، جریان سیال را با خواص ثابت و تراکم ناپذیر فرض می‌شود. معادلات ناویر استوکس برابر با:

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (41-3)$$

$$\rho \frac{\partial u_i}{\partial t} + \rho u_i \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial t_{ij}}{\partial x_j} \quad (42-3)$$

که بردارهای u_i و x_i به ترتیب سرعت و موقعیت، t زمان، p فشار و ρ چگالی می‌باشند و t_{ij} تانسور تنش لزجت می‌باشد، که به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$t_{ij} = 2\mu s_{ij} \quad (43-3)$$

که μ لزجت مولکولی و s_{ij} تانسور نرخ کرنش:

$$s_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad (44-3)$$

توجه کنید که $s_{ij} = s_{ji}$ ، بنابراین $t_{ij} = t_{ji}$ برای سیال‌های لزج می‌باشد. در اینجا با توجه به معادله (41-3) (پیوستگی) تابع $\partial u_j / \partial x_j$ برابر صفر می‌باشد و با ساده‌سازی بیشتر، معادلات ناویر استوکس به شکل زیر بازنویسی می‌شود:

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (45-3)$$

$$\rho \frac{\partial u_i}{\partial t} + \rho \frac{\partial}{\partial x_j} (u_j u_i) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} (2\mu s_{ij}) \quad (46-3)$$

حال با استفاده از روش متوسط‌گیری زمانی معادلات بالا به صورت زیر تبدیل می‌شوند:

$$\frac{\partial U_i}{\partial x_i} = 0 \quad (47-3)$$

$$\rho \frac{\partial U_i}{\partial t} + \rho U_j \frac{\partial U_i}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} (2\mu s_{ij} - \overline{\rho u_j' u_i'}) \quad (48-3)$$

در اینجا گذشته از جایگزینی متغیرهای لحظه‌ای با متغیرهای متوسط، تنها فرق میان متوسط زمانی با معادلات مومنتوم ایستایی عبارت $\overline{u_j' u_i'}$ می‌باشد. این عبارت نرخ متوسط زمانی انتقال مومنتوم ناشی از

آشفته‌گی می‌باشد. این عبارت، پایه و اساس مسائل آشفته‌گی را تشکیل می‌دهد. برای محاسبه تمامی خواص متوسط جریان آشفته، نیاز به دستورالعملی برای محاسبه $\overline{u_j u_i}$ می‌باشد.

معادلات (۳-۴۷) و (۳-۴۸) به عنوان معادلات متوسط رینولدز ناویر استوکس (RANS) شناخته می‌شوند. کمیت $-\rho \overline{u_j u_i}$ به عنوان تانسور تنش رینولدز تعریف می‌شود و در اینجا با علامت $\rho \tau_{ij}$ نشان می‌دهیم، بنابراین τ_{ij} تانسور تنش رینولدز مخصوص می‌باشد و برابر است با:

$$\tau_{ij} = -\overline{u_j u_i} \quad (۳-۴۹)$$

در دیدگاه متوسط‌گیری رینولدز در مدل کردن آشفته‌گی نیاز است که تانسور تنش رینولدز به درستی مدل شود. روش معمول بکارگیری فرضیه بوزینسک با ارتباط دادن تانسور تنش رینولدز با گرادیان-های سرعت متوسط می‌باشد:

$$\tau_{ij} = 2\nu_t S_{ij} - \frac{2}{3} K \delta_{ij} \quad (۳-۵۰)$$

$$\delta_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{if } i = j \\ 0 & \text{if } i \neq j \end{cases} \quad (۳-۵۱)$$

۳-۱۲-۲ معادله انرژی آشفته‌گی

اگر سه تنش رینولدز نرمال را با هم جمع کنیم و در $0/5$ ضرب کنیم، انرژی جنبشی آشفته تشکیل می‌شود که با علامت K نشان داده می‌شود. بنابراین:

$$K = \frac{1}{2} (\overline{u'^2} + \overline{v'^2} + \overline{w'^2}) = \frac{1}{2} \overline{u_i u_i} \quad (۳-۵۲)$$

این متغیر انرژی جنبشی نوسانات آشفته‌گی در واحد جرم می‌باشد. برای بدست آوردن معادله انرژی جنبشی از تریس (مجموع قطر اصلی ماتریس) تانسور تنش رینولدز استفاده می‌شود. یعنی:

$$\tau_{ii} = -\overline{u_i u_i} = -2K \quad (۳-۵۳)$$

شکل معادله دیفرانسیلی بر حسب تریس تنش رینولدز به صورت زیر می‌باشد:

$$\frac{\partial k}{\partial t} + U_j \frac{\partial k}{\partial x_j} = \tau_{ij} \frac{\partial U_i}{\partial x_i} - \varepsilon + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\nu \frac{\partial k}{\partial x_j} - \frac{1}{2} \overline{u'_i u'_i u'_j} - \frac{1}{\rho} \overline{p' u'_j} \right) \quad (54-3)$$

کمیت ε اتلاف در واحد جرم می‌باشد و به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\varepsilon = \nu \frac{\overline{\partial u'_i \partial u'_j}}{\partial x_k \partial x_k} \quad (55-3)$$

همچنین تقریب زیر، که از شبیه‌سازی عددی مستقیم بدست آمده، اعمال می‌شود:

$$\frac{1}{2} \overline{u'_i u'_i u'_j} + \frac{1}{\rho} \overline{p' u'_j} = - \frac{\nu_T}{\sigma_K} \frac{\partial k}{\partial x_j} \quad (56-3)$$

در نهایت معادله به صورت زیر بدست می‌آید:

$$\frac{\partial k}{\partial t} + U_j \frac{\partial k}{\partial x_j} = \tau_{ij} \frac{\partial U_i}{\partial x_j} - \varepsilon + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\nu + \frac{\nu_T}{\sigma_K} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] \quad (57-3)$$

برای بستن این معادله عبارت τ_{ij} با تقریب بوزینسک (50-3) بدست می‌آید.

۳-۱۳ انواع مدل‌های آشفتگی

مدل‌های آشفتگی زیادی توسط محققین مختلف برای شبیه‌سازی جریان‌های آشفته تدوین شده

است. این مدل‌ها بر اساس روش عمل و تعداد معادلات دیفرانسیل مورد استفاده برای کمیت‌های

آشفتگی به دسته‌های مختلفی تقسیم می‌شوند:

- مدل‌های صفر معادله‌ای
- مدل‌های تک معادله‌ای
- مدل‌های دو معادله‌ای
- مدل‌های دارای معادله‌ی تنش
- مدل‌های شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ

۳-۱۳-۱ مدل‌های صفر معادله‌ای

در این مدل‌ها، برای تعیین کمیت‌های آشفته‌گی از معادلات دیفرانسیلی استفاده نمی‌شود. این مدل‌ها نسبتاً ساده بوده و بر اساس داده‌های تجربی و آزمایشگاهی تدوین می‌شوند. از انواع این مدل‌ها می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

- مدل لزجت گردابه‌ای ثابت
- مدل طول اختلاط پранتل
- مدل لایه‌ی برش آزاد پранتل

۳-۱۳-۲ مدل‌های یک معادله‌ای

در این مدل‌ها از یک رابطه‌ی دیفرانسیلی بر حسب کمیت آشفته‌گی k استفاده می‌شود. K عبارتست از انرژی جنبشی آشفته‌گی که بصورت رابطه‌ی زیر تعریف می‌شود:

$$k = \frac{1}{2}(u'^2 + v'^2 + w'^2) \quad (58-3)$$

مقیاس سرعت، v_t ، بصورت زیر تعریف می‌شود:

$$v_t = \sqrt{k} \quad (59-3)$$

بنابراین مجهول‌های آشفته‌گی به k و l تبدیل می‌شود. کمیت k با حل معادله‌ی ناویراستوکس برای این پارامتر قابل تعیین است.

۳-۱۳-۳ مدل‌های دو معادله‌ای

مقیاس طول در این مدل‌ها، بر خلاف مدل‌های یک معادله‌ای، بدون تکیه به روابط تجربی برآورد می‌شود. در این مدل‌ها، از کمیت‌های آشفته‌گی که از حل معادلات دیفرانسیلی استخراج می‌شوند برای تخمین مقیاس طول و مقیاس سرعت استفاده می‌شود. از انواع این مدل‌ها عبارتند از:

- لزجت گردابه‌ای

- جبری

- تنش رینولدز غیرخطی

در این مدل‌ها، کمیت آشفتگی دیگری نیز تعریف شده و مشابه k با استفاده از معادله‌ی ناویراستوکس برآورد می‌شود. از جمله کمیت‌های تعریف شده در این مدل‌ها، کمیت اتلاف آشفتگی یا ε (m^2/s^3) است. کمیت ε نماینده‌ی مقیاس طول است. در حقیقت، مقیاس طول بیانگر اندازه‌ی گردابه‌های بزرگ دارای انرژی جنبشی است که باعث انتقال آشفتگی در توده‌ی سیال می‌شود.

۳-۱۳-۴ مدل‌های دارای معادله‌ی تنش

این مدل بر پایه‌ی گروه‌های نرمال شده‌ی رینولدز (RNG) استوار است. این رویکرد شامل روش‌های آماری برای استحصال معادلات متوسط‌گیری شده برای کمیت‌های آشفتگی نظیر انرژی جنبشی آشفتگی و نرخ اتلاف آن است.

مدل RNG از روابطی نظیر روابط موجود در مدل $k - \varepsilon$ استفاده می‌کند. با این تفاوت که ضرائب ثابت موجود در مدل $k - \varepsilon$ ، که به روش تجربی استخراج می‌شدند، در مدل RNG بصورت صریح محاسبه می‌شوند.

۳-۱۳-۵ مدل‌های شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ

ایده‌ی اساسی این مدل اینست که تمام ساختارهای تلاطم که قابل محاسبه با استفاده از شبکه‌ی محاسباتی هستند، بطور مستقیم محاسبه شوند و فقط ساختارهای ریزی که قابل محاسبه نیستند، تقریب زده شوند. این مدل اطلاعات بیشتری نسبت به روش RNG تولید می‌کند.

۳-۱۴ مدل های آشفتگی مورد استفاده در $FLOW - 3D$

شبیه سازی آشفتگی در $FLOW - 3D$ با استفاده از یکی از پنج مدل آشفتگی مورد استفاده توسط این نرم افزار صورت می گیرد. مدل های آشفتگی مورد استفاده توسط $FLOW - 3D$ عبارتند از: طول اختلاط پراتنل، یک معادله ای انرژی جنبشی آشفتگی، مدل دو معادله ای $k - \epsilon$ ، مدل گروه های نرمال شده (RNG) و مدل شبیه سازی گردابه های بزرگ.

مدل سازی آشفتگی در $FLOW - 3D$ تا حدی از مدل سازی های قبلی متفاوت است زیرا اثر کسرهای حجمی و سطحی روش $FAVOR$ در معادلات مربوط به مدل های آشفتگی اعمال شده است و تولید یا تنزل آشفتگی بوسیله ی نیروهای شناوری تعمیم یافته اند.

از بین مدل های آشفتگی ذکر شده، مدل مورد استفاده در این پژوهش $k - \epsilon$ RNG انتخاب شده است. دلیل این انتخاب نتایج از تحقیقات محمدیان و همکاران (۱۳۹۳) می باشد که سرریز جانبی لبه تیز مرکب مستطیلی _ مستطیلی را در نرم افزار $FLOW - 3D$ شبیه سازی نمودند و به این نتیجه رسیدند که مدل $k - \epsilon$ RNG از بین مدل های آشفتگی در نرم افزار $FLOW - 3D$ از دقت بالاتری برای محاسبه ضریب تخلیه و نیز شبیه سازی دبی عبوری برخوردار است. بنابراین در ادامه به شرح این مدل آشفتگی می پردازیم.

۳-۱۴-۱ مدل $k - \epsilon$ RNG

شکل این مدل شبیه به مدل $k - \epsilon$ استاندارد می باشد، اما در موارد زیر با هم تفاوت دارند:

- مدل RNG یک ترم اضافی در معادله ϵ دارد که باعث افزایش دقت می شود.
- ثابت های مدل RNG با مدل استاندارد متفاوت می باشد.
- تأثیر گردابه متحرک در آشفتگی در مدل RNG در نظر گرفته می شود، برای جریان های چرخشی به دقت کار کمک می کند.

• در حالی که مدل $k - \varepsilon$ استاندارد برای عدد رینولدز بالا مناسب می‌باشد، مدل RNG برای

اثرات لزجت در عدد رینولدز پایین هم مناسب می‌باشد.

معادلات این مدل به صورت زیر می‌باشد:

لزجت گردابه‌ای سینماتیکی:

$$v_T = \frac{C_\mu k^2}{\varepsilon} \quad (60-3)$$

انرژی جنبشی آشفتگی:

$$\frac{\partial k}{\partial t} + U_j \frac{\partial k}{\partial x_j} = \tau_{ij} \frac{\partial U_i}{\partial x_j} - \varepsilon + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\nu + \frac{v_T}{\sigma_K} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] \quad (61-3)$$

نرخ اتلاف آشفتگی:

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + U_j \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} = C_{\varepsilon 1} \frac{\varepsilon}{k} \tau_{ij} \frac{\partial U_i}{\partial x_j} - C_{\varepsilon 2} \frac{\varepsilon^2}{k} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\nu + \frac{v_T}{\sigma_K} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] - R_\varepsilon \quad (62-3)$$

ضرائب ارتباط دهنده:

$$R_\varepsilon = \frac{C_\mu \eta^3 \left(1 - \frac{\eta}{\eta_0} \right) \varepsilon^2}{1 + \beta \eta^3} \frac{1}{k}, \quad \eta \equiv \frac{S k}{\varepsilon}, \quad \eta_0 = 4.38 \quad \beta = 0.012, \quad C_{\varepsilon 2} = 1.68 \quad (63-3)$$

$$C_{\varepsilon 1} = 1.42, \quad C_\mu = 0.0845, \quad \sigma_K = \sigma_\varepsilon = 0.72 \quad (64-3)$$

فصل چهارم:

بحث و نتایج

۴-۱ مقدمه

این فصل شامل دو بخش است. بخش اول نتایج مدل آزمایشگاهی می‌باشد، هدف از این تحقیق بررسی اثر شیب طولی کانال بر روی سرریزهای جانبی لبه‌تیز مرکب مثلثی - مستطیلی در شرایط زیربحرانی است. به طوری که بتوان با استفاده از نتایج آن روابطی را برای تعیین ضریب دبی ارائه داد و با تعیین دبی عبوری از سرریز مرکب مثلثی - مستطیلی اثر سه شیب $0/001$ ، $0/002$ ، $0/003$ بر دقت محاسبات دبی کنترل نمود. بخش دوم نتایج مدل عددی است که نتایج آن بر حسب دبی خروجی ارزیابی می‌شود و با نتایج بدست آمده در آزمایشگاه صحت‌سنجی می‌گردد.

۴-۲ نتایج مدل آزمایشگاهی

۴-۲-۱ ضریب دبی در سرریز جانبی لبه‌تیز مرکب مثلثی - مستطیلی و محاسبه

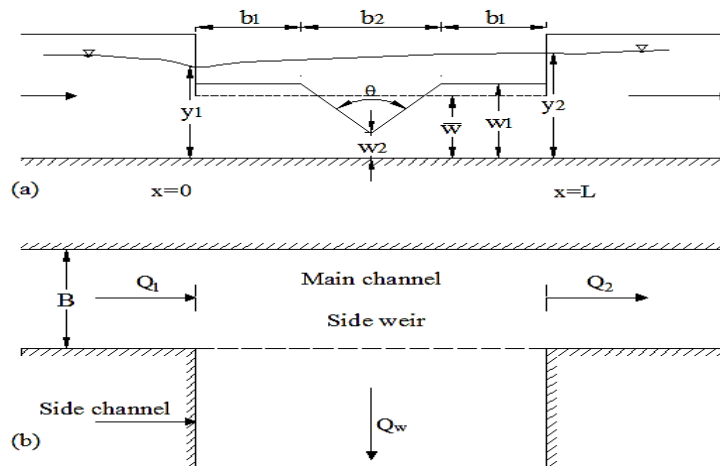
دبی عبوری از آن

این بخش به بررسی سرریزهای لبه‌تیز جانبی مرکب مثلثی - مستطیلی اختصاص دارد که در آن نحوه محاسبه ضریب دبی و دبی کل عبوری به روش‌های مستقیم، دیمارچی تشریح می‌گردد.

۴-۲-۱-۱ ضریب دبی عبوری متوسط سرریز مرکب مثلثی - مستطیلی به روش

مستقیم

در این روش ضریب دبی متوسط برای کل مقطع سرریز مرکب مثلثی - مستطیلی شکل (۴-۱) طوری تعیین می‌شود که کمترین مقدار خطا را نسبت به داده‌های مشاهداتی ایجاد نماید.



شکل (۱-۴) شماتیک سرریز مرکب مثلثی - مستطیلی

متغیر بودن ارتفاع تاج سرریز در قسمت‌های بالایی و زیرین، سبب اشکال در به‌کارگیری روابط می‌گردد. برای رفع این معضل، راه حلی که موردنظر قرار گرفت استفاده از پارامتر ارتفاع وزنی تاج (\bar{W}) است. به عبارتی مقطع مرکب با یک مقطع مستطیلی ساده با ارتفاع تاج (\bar{W}) معادل می‌شود. این پارامتر در سرریز مرکب مثلثی مستطیلی شکل (۱-۴) از رابطه زیر به دست می‌آید که در آن W_2 و W_1 به ترتیب ارتفاع تاج در قسمت‌های مستطیلی و مثلثی مقطع مرکب هستند.

$$\bar{W} = \frac{2w_1b_1 + w_2b_2 + 0.5b_2(w_1 - w_2)}{2b_1 + b_2} \quad (1-4)$$

پس از انجام رگرسیون غیرخطی (در مورد نحوه چگونگی انجام رگرسیون در فصل سوم و بخش نحوه استخراج روابط توضیح داده شده است.) و بررسی پارامترهای مؤثر به کمک آنالیز ابعادی، روابط زیر جهت محاسبه ضریب دبی در سرریزهای مرکب با زوایای رأس ۶۰ و ۹۰ درجه به ترتیب زیر استخراج شدند:

$$\text{برای } \theta = 60^\circ :$$

$$C_d = 0.2045(Fr_1)^{0.1069} + 0.4980\left(\frac{\bar{W}}{y_1}\right)^{0.7160} + 0.1866\left(\frac{l}{y_1}\right)^{0.3791} + 0.2818$$

$$(S_0 = 0.001) \quad (2-4)$$

$$C_d = -0.0618(Fr_1)^{0.8450} + 0.6008\left(\frac{\bar{w}}{y_1}\right)^{0.8828} + 0.0658\left(\frac{l}{y_1}\right)^{0.8423} + 0.221$$

($S_0 = 0.002$) (۳-۴)

$$C_d = -0.0164(Fr_1)^{-0.9888} + 0.4313\left(\frac{\bar{w}}{y_1}\right)^{1.4045} + 0.1665\left(\frac{l}{y_1}\right)^{0.5262} + 0.2106$$

($S_0 = 0.003$) (۴-۴)

: $\theta = 90^\circ$ برای

$$C_d = -0.3291(Fr_1)^{-0.0579} + 0.3109\left(\frac{\bar{w}}{y_1}\right)^{0.7560} + 0.1195\left(\frac{l}{y_1}\right)^{0.5604} - 0.043$$

($S_0 = 0.001$) (۵-۴)

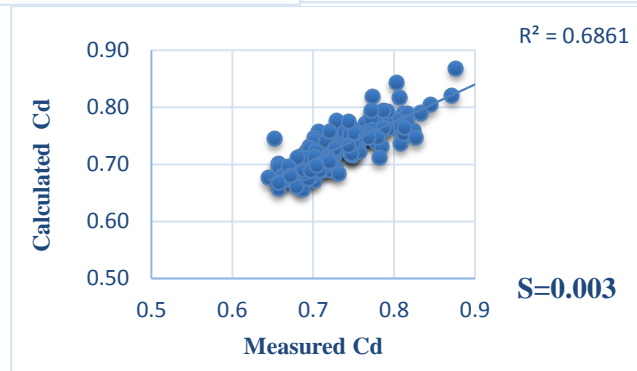
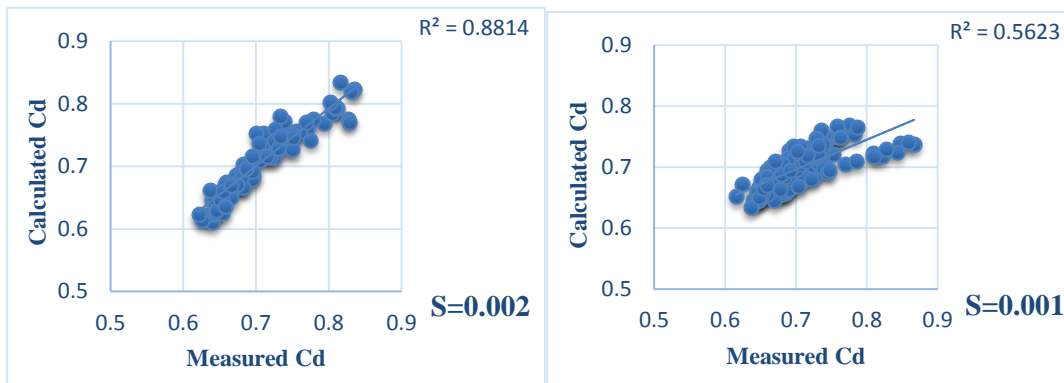
$$C_d = 0.0449(Fr_1)^{0.5418} + 0.4390\left(\frac{\bar{w}}{y_1}\right)^{0.6356} + 0.1514\left(\frac{l}{y_1}\right)^{0.4383} + 0.1627$$

($S_0 = 0.002$) (۶-۴)

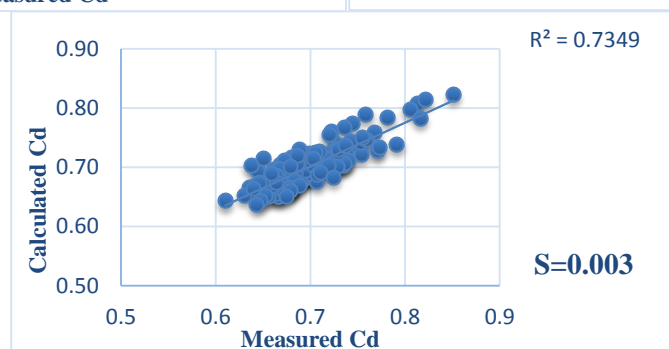
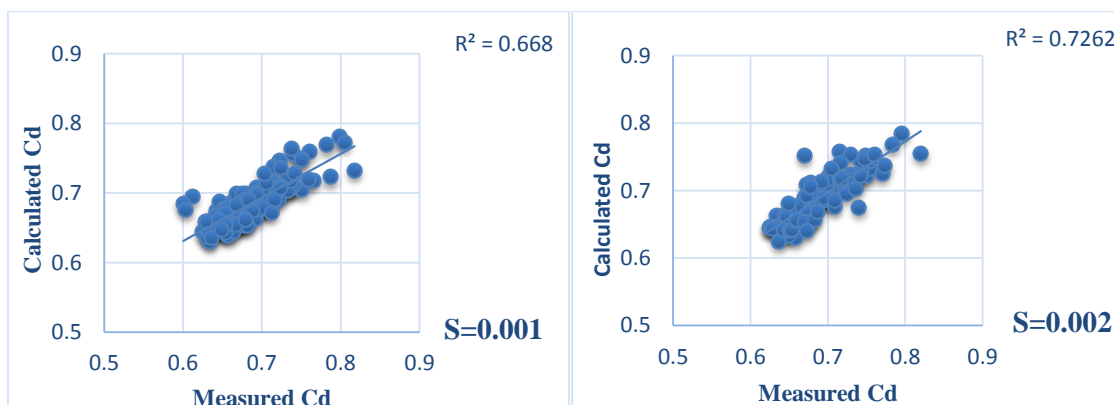
$$C_d = 0.0419(Fr_1)^{0.3540} + 0.4758\left(\frac{\bar{w}}{y_1}\right)^{0.4815} + 0.1407\left(\frac{l}{y_1}\right)^{0.5879} + 0.1573$$

($S_0 = 0.003$) (۷-۴)

لازم به توضیح است که بررسی نتایج نشان داد به دلیل ثابت بودن عرض فلوم تحقیقاتی و همچنین محدوده کم تغییرات طول سرریز، پارامتر (L/B) تأثیر زیادی در کاهش خطای روابط فوق نداشته و در نتیجه از روابط حذف گردید. نمودارهای شکل (۲-۴) و (۳-۴) مقایسه مقادیر ضرایب دبی به دست آمده از روابط اخیر با نتایج آزمایشگاهی برای مقاطع سرریز مرکب را نشان می‌دهد. با کنترل ضریب همبستگی مشخص می‌گردد در هر سه شیب اگرچه کمی پراکندگی در نتایج وجود دارد اما انطباق مناسبی بین مقادیر محاسباتی و داده‌های مشاهداتی برقرار است. لازم به ذکر است با معلوم بودن دبی خروجی از سرریز جانبی لبه‌تیز مرکب مثلثی - مستطیلی و جهت تعیین مقادیر ضریب دبی مشاهداتی برای این سرریز، با معادل نمودن به یک سرریز مستطیلی ساده که در بخش ۳-۲-۱ ارائه شده است، از رابطه (۸-۳) به دست آمد.



شکل (۲-۴) مقایسه ضریب دبی محاسباتی و مشاهداتی با سه شیب مختلف برای مقطع ۶۰ درجه با استفاده از روابط (۲-۴)، (۳-۴) و (۴-۴)



شکل (۳-۴) مقایسه ضریب دبی محاسباتی و مشاهداتی با سه شیب مختلف برای مقطع ۹۰ درجه با استفاده از روابط (۵-۴)، (۶-۴) و (۷-۴)

اما رابطه کلی با سه شیب مختلف برای دو تیپ مقطع با زوایای رأس ۶۰ و ۹۰ درجه قابل کاربرد است با تجمیع داده‌های آزمایشگاهی و انجام محاسبات، به صورت زیر پیشنهاد می‌گردد.

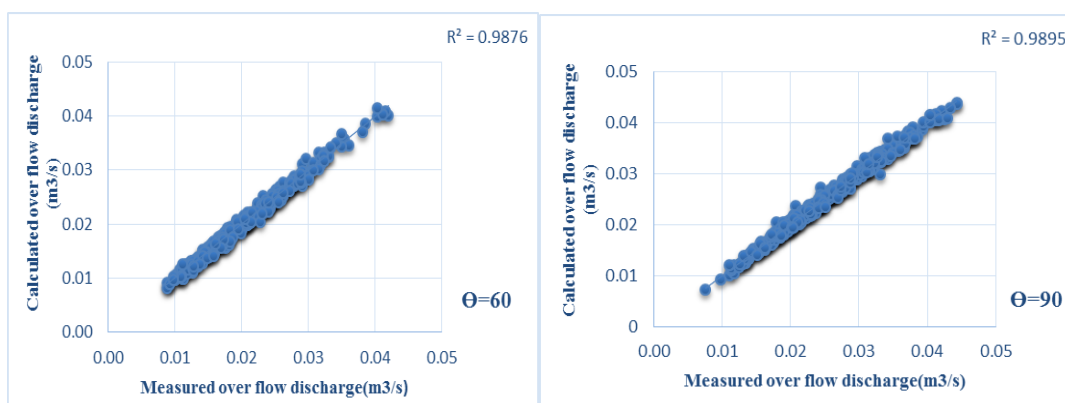
$$C_d = -0.3493(Fr_1)^{0.1198} + 0.6080\left(\frac{\bar{w}}{y_1}\right)^{0.7269} + 0.2546\left(\frac{l}{y_1}\right)^{0.3166} + 0.2651$$

$$\theta = 60^\circ \quad (۸-۴)$$

$$C_d = 0.0282(Fr_1)^{0.0047} + 0.3334\left(\frac{\bar{w}}{y_1}\right)^{0.8195} + 0.1392\left(\frac{l}{y_1}\right)^{0.4613} + 0.2623$$

$$\theta = 90^\circ \quad (۹-۴)$$

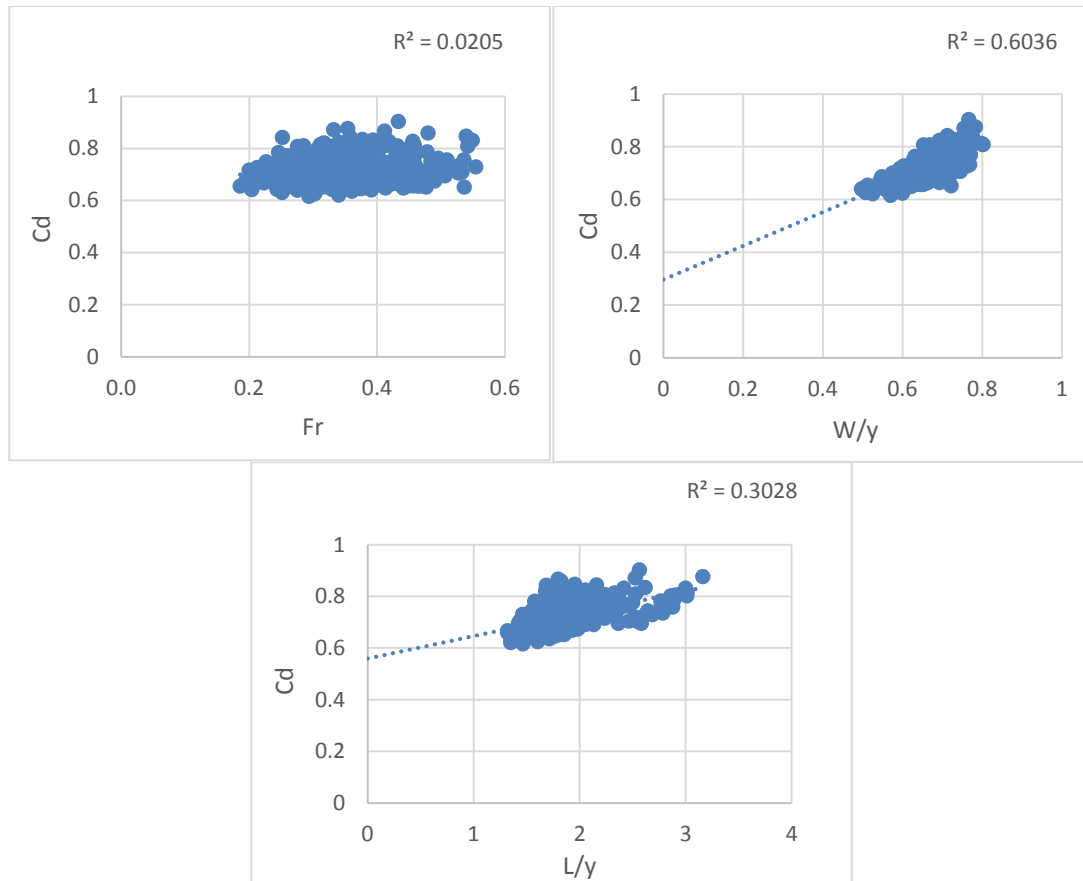
نمودارهای شکل (۴-۴) مقایسه مقادیر دبی به دست آمده از روابط اخیر با نتایج آزمایشگاهی را نشان می‌دهد. با بررسی‌های ضریب همبستگی (R^2) در شکل (۴-۴) و جدول (۱-۴) ملاحظه می‌شود که استفاده از رابطه کلی (۸-۴) و (۹-۴) مقادیر خطا را برای شیب ۰/۰۰۲ کمی افزایش و در شیب ۰/۰۰۱، ۰/۰۰۳ کاهش داده است.



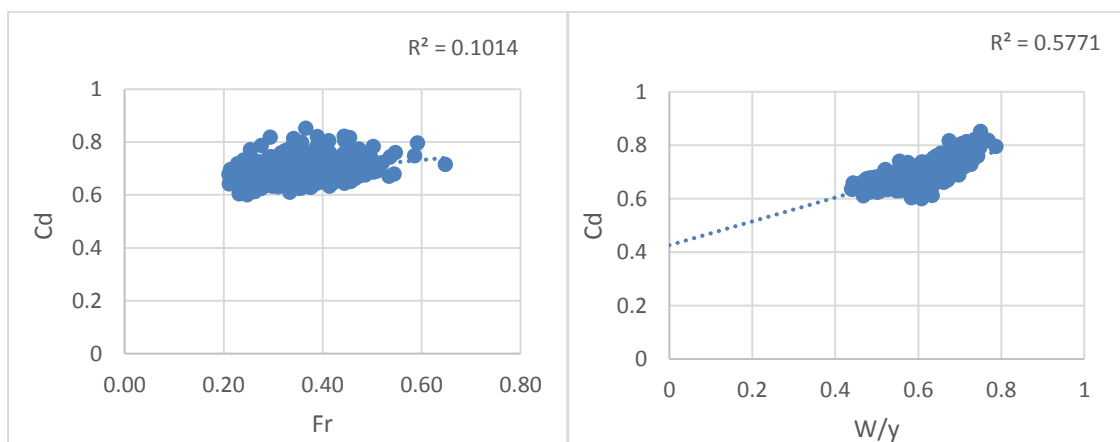
شکل (۴-۴) مقایسه دبی بر اساس رابطه (۸-۴) و (۹-۴) با مقادیر مشاهداتی

نمودارهای شکل (۴-۵) و (۴-۶) ارتباط پارامترهای Fr_1 ، $\frac{\bar{w}}{y_1}$ ، $\frac{l}{y_1}$ با ضریب دبی برای سرریز با زاویه رأس ۶۰ و ۹۰ برای هر سه شیب را نشان می‌دهد. در اشکال (۴-۵) و (۴-۶) ملاحظه می‌شود که ضریب همبستگی (هر اندازه ضریب همبستگی به ۱ نزدیک‌تر باشد، مناسب‌تر است). ارتفاع وزنی تاج به عمق بالادست سرریز نسبت به دو پارامتر عدد فرود جریان و طول سرریز به عمق جریان در بالادست

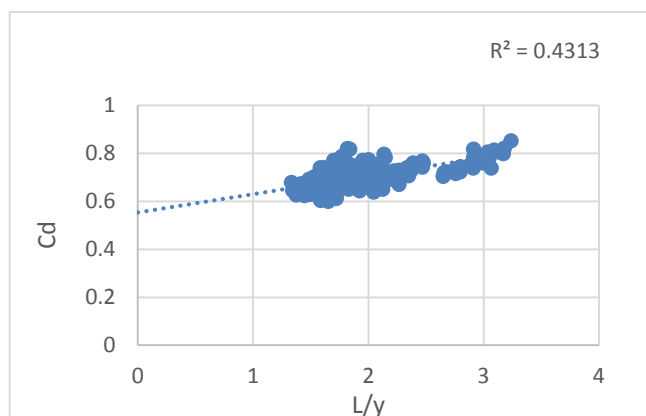
سرریز بیشتر است و همپوشانی مناسبی با ضریب دبی مشاهداتی دارد. به همین دلیل ضریب دبی مستقیم وابستگی بیشتری به ارتفاع وزنی تاج به عمق بالادست سرریز نسبت به دو پارامتر دیگر دارد.



شکل (۵-۴) نمودارهای ضریب دبی در مقابل پارامترهای Fr_1 , $\frac{\bar{w}}{y_1}$, $\frac{l}{y_1}$ با استفاده از رابطه (۴-۸)



شکل (۶-۴) نمودارهای ضریب دبی در مقابل پارامترهای Fr_1 , $\frac{\bar{w}}{y_1}$, $\frac{l}{y_1}$ با استفاده از رابطه (۴-۹)



ادامه شکل (۴-۶)

همان‌گونه که در این نمودارها ملاحظه می‌گردد ضریب دبی تابعی از سه پارامتر بدون بعد عدد فرود جریان (\overline{Fr}_1) نسبت ارتفاع وزنی تاج سرریز به عمق جریان ($\frac{\bar{w}}{y_1}$) و نسبت طول سرریز به عمق جریان ($\frac{1}{y_1}$) در بالادست سرریز است و با افزایش این پارامترهای بی‌بعد ضریب دبی نیز بیشتر می‌شود. اما در جدول (۱-۴) مقادیر انواع آماره‌های ارزیابی شامل درصد میانگین مطلق خطا (MAPE)، متوسط خطا (ME)، حداکثر خطای نسبی (MRE)، مجذور میانگین مربعات خطا (RMSE) و ضریب همبستگی (R^2) برای روابط پیشنهادی محاسبه و ارائه شده است.

جدول (۱-۴) مقادیر انواع آماره‌های ارزیابی دبی محاسباتی سرریز جانبی لبه تیز مرکب مثلثی - مستطیلی

خطاها	روابط پیشنهادی							
	(۲-۴)	(۳-۴)	(۴-۴)	(۵-۴)	(۶-۴)	(۷-۴)	(۸-۴)	(۹-۴)
MAPE(%)	2.53	2.1	2.79	2.15	2.48	2.22	2.94	2.45
ME	0.00049	0.00044	0.001	0.00049	0.00062	0.00054	0.00057	0.00058
MRE	0.1486	0.073	0.1424	0.1413	0.1226	0.1027	0.1206	0.1456
RMSE	0.0007	0.00059	0.00067	0.0007	0.0008	0.0008	0.00072	0.00075
R²	0.983	0.9964	0.9844	0.9893	0.9935	0.9875	0.9876	0.9895

۲-۱-۲-۴ ضریب دبی عبوری دیمارچی در سرریز مرکب مثلثی - مستطیلی

در سرریز لبه تیز مرکب مثلثی - مستطیلی با استفاده از معادلات اساسی دیمارچی به شیوه‌ایی که در فصل قبل ارائه شد نسبت به تعیین ضریب دبی متوسط اقدام گردید. جهت حل مشکل تغییر ارتفاع تاج در طول سرریز، مقطع مرکب مثلثی - مستطیلی با یک سرریز مستطیلی ساده به ارتفاع تاج (\bar{w}) به کمک رابطه (۱-۴) معادل می‌شود. پس از محاسبه ضریب دبی به کمک نتایج آزمایش‌ها برای تمامی داده‌ها، ضرایب رابطه پیشنهادی با انجام رگرسیون غیرخطی مشخص می‌گردند. لازم به یادآوری است که مطابق توضیحات ارائه شده در فصل سوم جهت تعیین رابطه ضریب دبی، ابتدا با استفاده از تحلیل ابعادی باکینگهام پارامترهای مهم و تأثیرگذار مشخص می‌شوند. در نهایت روابط زیر جهت محاسبه ضریب دبی دیمارچی در سرریزهای مرکب با زوایای رأس ۶۰ و ۹۰ درجه به ترتیب زیر استخراج شدند:

برای $\theta = 60^\circ$:

$$C_m = 0.8541F_r + 0.6728\left(\frac{\bar{w}}{y_1}\right)^{1.6016} + 0.1809\left(\frac{l}{y_1}\right)^{0.0038} + 0.3625$$

($S_0 = 0.001$) (۱۰-۴)

$$C_m = -1.0955F_r + 0.9301\left(\frac{\bar{w}}{y_1}\right)^{1.6584} + 0.4363\left(\frac{l}{y_1}\right)^{0.0272} + 0.0597$$

($S_0 = 0.002$) (۱۱-۴)

$$C_m = 0.9790F_r - 0.4272\left(\frac{\bar{w}}{y_1}\right)^{-0.9380} + 0.6528\left(\frac{l}{y_1}\right)^{0.0904} + 0.9007$$

($S_0 = 0.003$) (۱۲-۴)

برای $\theta = 90^\circ$:

$$C_m = 1.2936F_r + 0.7930\left(\frac{\bar{w}}{y_1}\right)^{1.2089} + 0.1371\left(\frac{l}{y_1}\right)^{-0.0877} + 0.4343$$

$$(S_0 = 0.001) \quad (13-4)$$

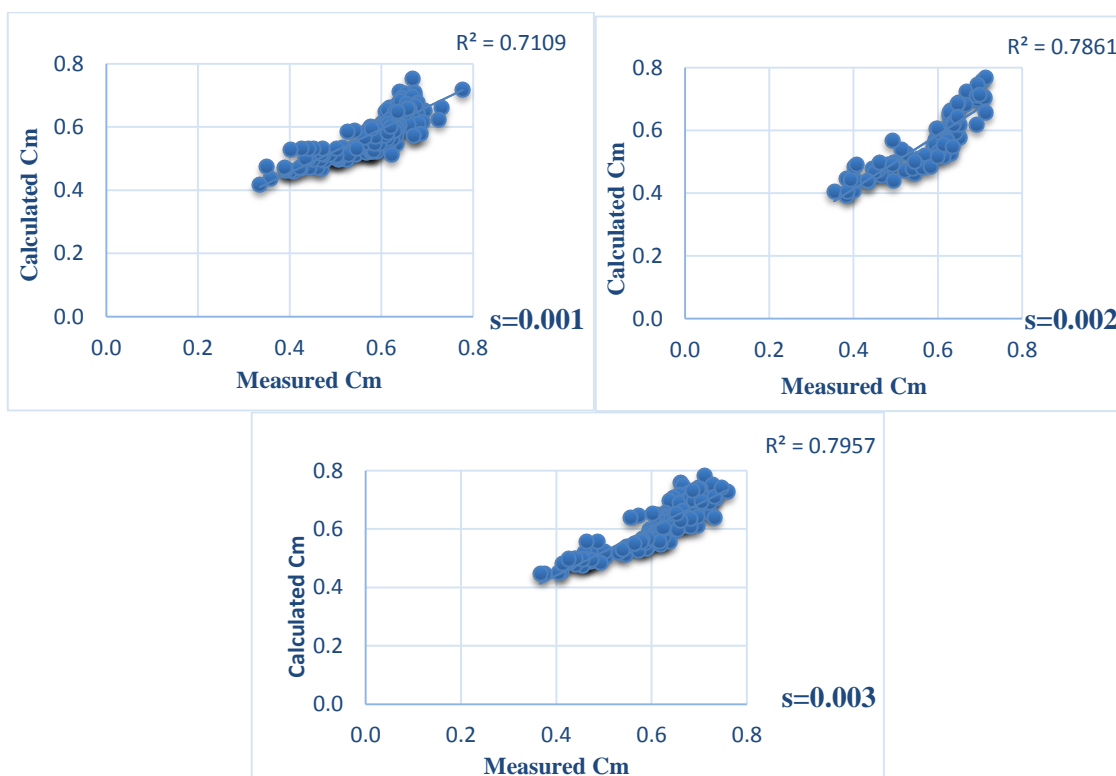
$$C_m = -1.8217F_r + 1.2788\left(\frac{\bar{w}}{y_1}\right)^{2.6370} + 0.7360\left(\frac{l}{y_1}\right)^{0.4621} - 0.0666$$

$$(S_0 = 0.002) \quad (14-4)$$

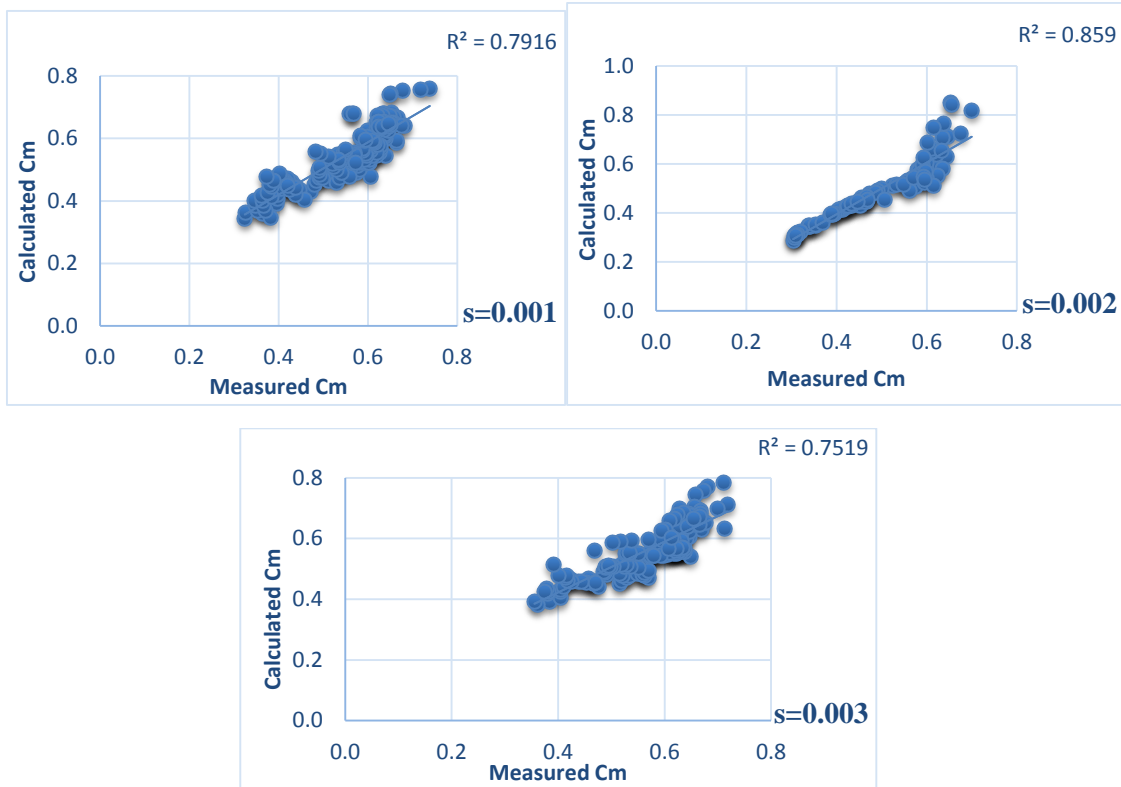
$$C_m = 1.1836F_r + 0.8671\left(\frac{\bar{w}}{y_1}\right)^{2.0134} + 0.2177\left(\frac{l}{y_1}\right)^{0.0772} + 0.4229$$

$$(S_0 = 0.003) \quad (15-4)$$

نمودارهای شکل (۷-۴) و (۸-۴) مقایسه مقادیر ضرایب دبی به دست آمده از روابط اخیر با نتایج آزمایشگاهی برای مقاطع سرریز مرکب را نشان می‌دهد.



شکل (۷-۴) مقایسه ضریب دبی محاسباتی و مشاهداتی با سه شیب مختلف برای مقطع ۶۰ درجه با استفاده از روابط (۱۰-۴)، (۱۱-۴) و (۱۲-۴)



شکل (۸-۴) مقایسه ضریب دبی محاسباتی و مشاهداتی با سه شیب مختلف برای مقطع ۹۰ درجه با استفاده از روابط (۱۳-۴)، (۱۴-۴) و (۱۵-۴)

اما رابطه کلی با سه شیب مختلف برای دو تیپ مقطع با زوایای رأس ۶۰ و ۹۰ درجه قابل کاربرد است با تجمیع داده‌های آزمایشگاهی و انجام محاسبات، به صورت زیر پیشنهاد می‌گردد:

$$C_m = 0.9975F_r + 0.8339\left(\frac{\bar{w}}{y_1}\right)^{1.5173} + 0.2763\left(\frac{l}{y_1}\right)^{0.0464} + 0.2197$$

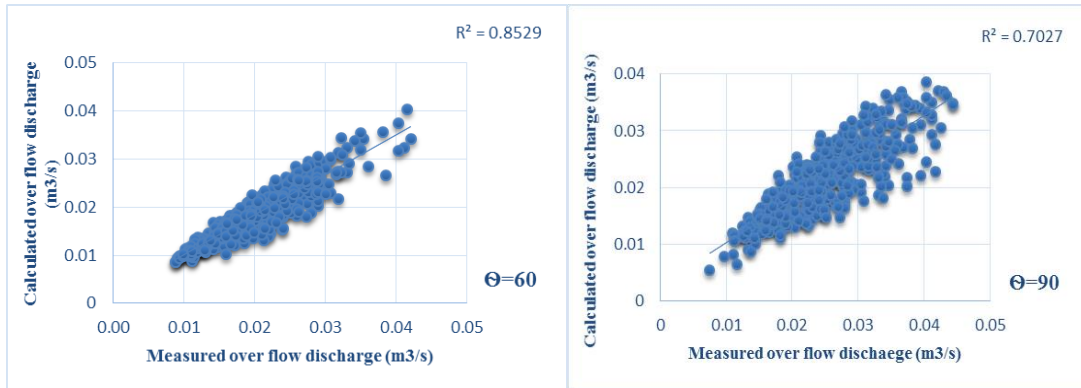
$$\theta = 60^\circ \quad (16-4)$$

$$C_m = 1.2989F_r + 1.0492\left(\frac{\bar{w}}{y_1}\right)^{1.0835} - 0.0785\left(\frac{l}{y_1}\right)^{-0.2296} + 0.4644$$

$$\theta = 90^\circ \quad (17-4)$$

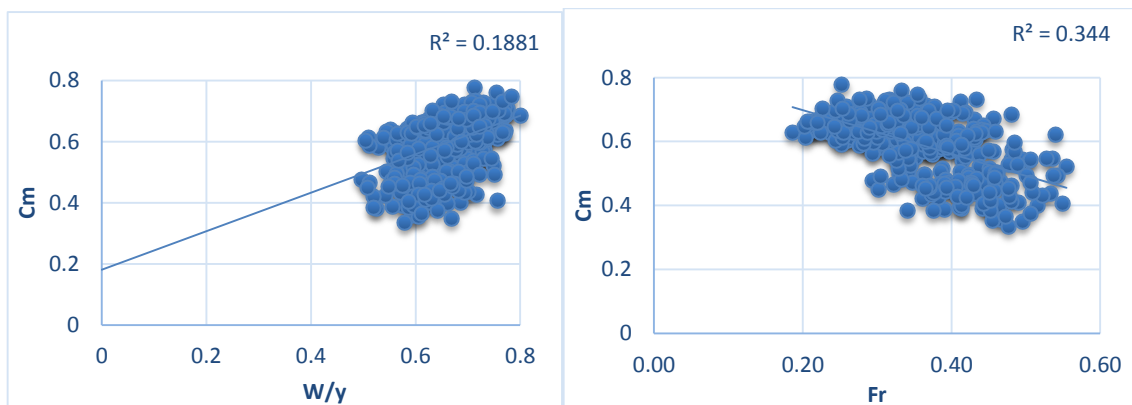
نمودارهای شکل (۹-۴) مقایسه مقادیر دبی به دست آمده از روابط اخیر با نتایج آزمایشگاهی را نشان می‌دهد. با بررسی‌های ضریب همبستگی (R^2) در شکل (۹-۴) و جدول (۲-۴) ملاحظه می‌شود که استفاده از رابطه (۱۶-۴) مقادیر خطا را برای شیب ۰/۰۰۲ کمی افزایش و در شیب ۰/۰۰۱، ۰/۰۰۳

کاهش و رابطه (۱۷-۴) مقادیر خطا را برای شیب ۰/۰۰۲ کمی کاهش و در شیب ۰/۰۰۱، ۰/۰۰۳ افزایش داده است.

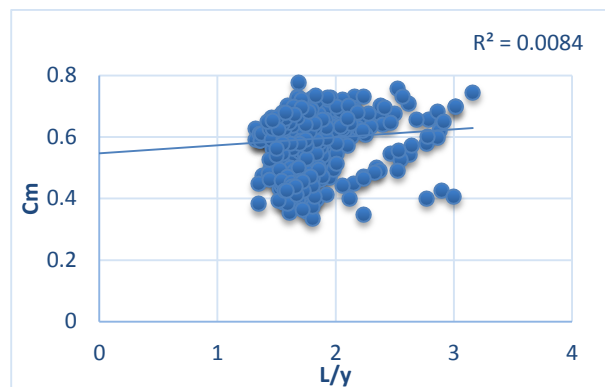


شکل (۹-۴) مقایسه دبی بر اساس رابطه (۱۶-۴) و (۱۷-۴) با مقادیر مشاهدات

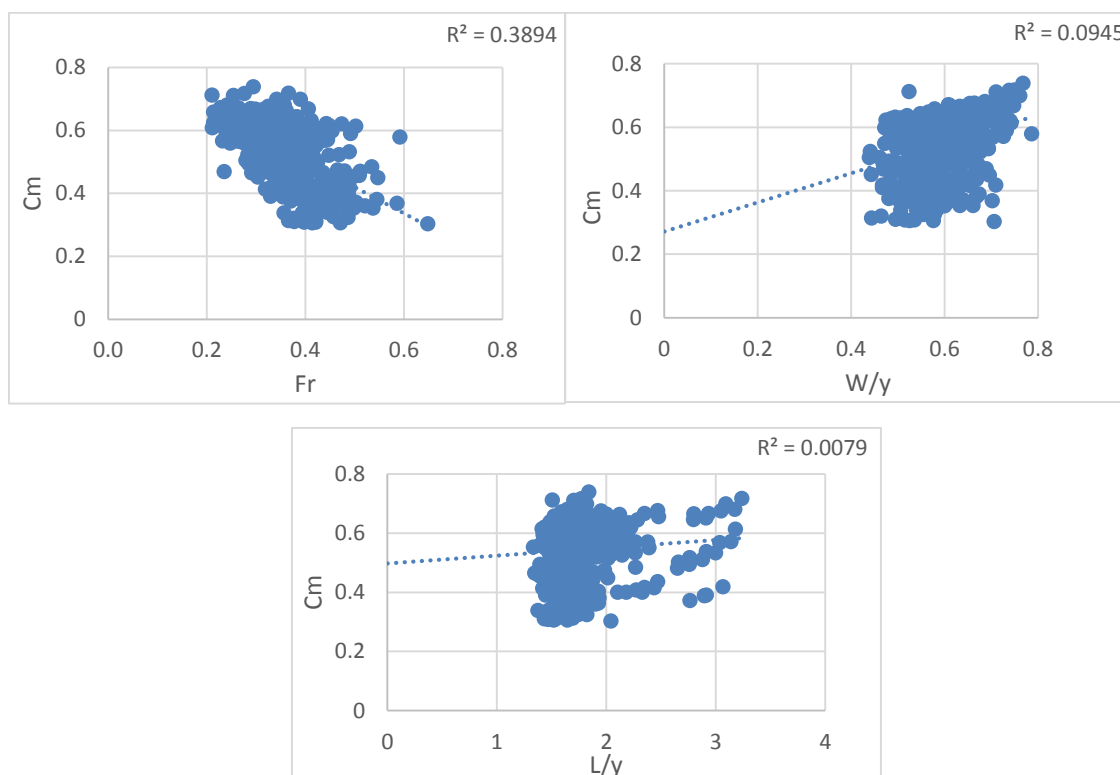
نمودارهای شکل (۱۰-۴) و (۱۱-۴) ارتباط پارامترهای Fr_1 ، $\frac{\bar{w}}{y_1}$ ، $\frac{l}{y_1}$ با ضریب دبی دیمارچی برای سرریز با زاویه رأس ۶۰ و ۹۰ برای هر سه شیب را نشان می‌دهد. در اشکال (۱۰-۴) و (۱۱-۴) ملاحظه می‌شود که ضریب همبستگی (هر اندازه ضریب همبستگی به ۱ نزدیک‌تر باشد، مناسب‌تر است). عدد فرود جریان در بالادست سرریز نسبت به دو پارامتر ارتفاع وزنی تاج به عمق بالادست سرریز و طول سرریز به عمق جریان در بالادست سرریز بیشتر است و همپوشانی مناسبی با ضریب دبی دارد. به همین دلیل ضریب دبی دیمارچی وابستگی بیشتری به عدد فرود جریان در بالادست سرریز نسبت به این دو پارامتر دارد.



شکل (۱۰-۴) نمودارهای ضریب دبی در مقابل پارامترهای Fr_1 ، $\frac{\bar{w}}{y_1}$ ، $\frac{l}{y_1}$ با استفاده از رابطه (۱۶-۴)



ادامه شکل (۴-۱۰)



شکل (۴-۱۱) نمودارهای ضریب دبی در مقابل پارامترهای Fr_1 ، $\frac{\bar{w}}{y_1}$ ، $\frac{l}{y_1}$ با استفاده از رابطه (۴-۱۷)

همان‌گونه که در این نمودارها ملاحظه می‌گردد ضریب دبی تابعی از سه پارامتر بدون بعد فرود جریان (Fr_1)، نسبت ارتفاع وزنی تاج سرریز به عمق جریان ($\frac{\bar{w}}{y_1}$) و نسبت طول سرریز به عمق جریان ($\frac{l}{y_1}$) در بالادست سرریز است. با افزایش پارامتر (Fr_1) ضریب دبی کمتر و با افزایش دو پارامتر ($\frac{\bar{w}}{y_1}$) و ($\frac{l}{y_1}$) ضریب دبی نیز بیشتر می‌شود. اما در جدول (۴-۲) مقادیر انواع آمارهای ارزیابی شامل درصد

میانگین مطلق خطا ($MAPE$)، متوسط خطا (ME)، حداکثر خطای نسبی (MRE)، مجذور میانگین مربعات خطا ($RMSE$) و ضریب همبستگی (R^2) برای روابط پیشنهادی محاسبه و ارائه شده است.

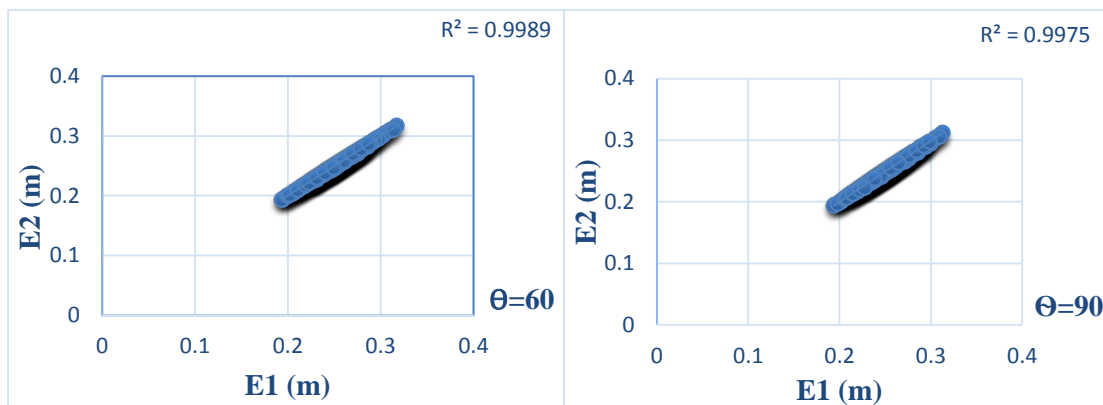
جدول (۲-۴) مقادیر انواع آماره‌های ارزیابی دبی محاسباتی سرریز جانبی لبه تیز مرکب مثلثی - مستطیلی به روش دیمارچی

خطاها	روابط پیشنهادی							
	(۱۰-۴)	(۱۱-۴)	(۱۲-۴)	(۱۳-۴)	(۱۴-۴)	(۱۵-۴)	(۱۶-۴)	(۱۷-۴)
$MAPE(\%)$	6.17	6.67	5.68	6.70	4.95	6.52	6.34	7.54
ME	0.00193	0.00303	0.00171	0.0036	0.00613	0.00313	0.00214	0.00409
MRE	0.3894	0.3521	0.3297	0.4062	0.4776	0.4132	0.3894	0.4641
$RMSE$	0.0028	0.0041	0.0024	0.0047	0.0078	0.0041	0.003	0.0054
R^2	0.8128	0.9018	0.8528	0.7103	0.7026	0.7816	0.8529	0.702

۴-۲-۱-۳ کنترل فرض ناچیز بودن انرژی در طول سرریز جانبی مرکب مثلثی -

مستطیلی

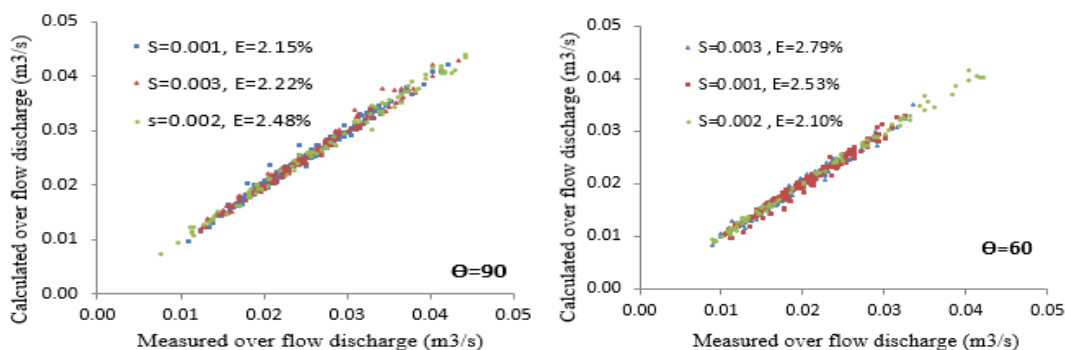
جهت بررسی فرضیه دیمارچی در مورد سرریزهای مرکب مقادیر انرژی مخصوص مقاطع بالادست و پایین دست سرریز محاسبه و نمودار تغییرات آن با تجمیع سه شیب طولی مختلف برای هر دو مقطع با زوایای رأس ۶۰ و ۹۰ درجه مطابق شکل (۱۲-۴) ترسیم شد.



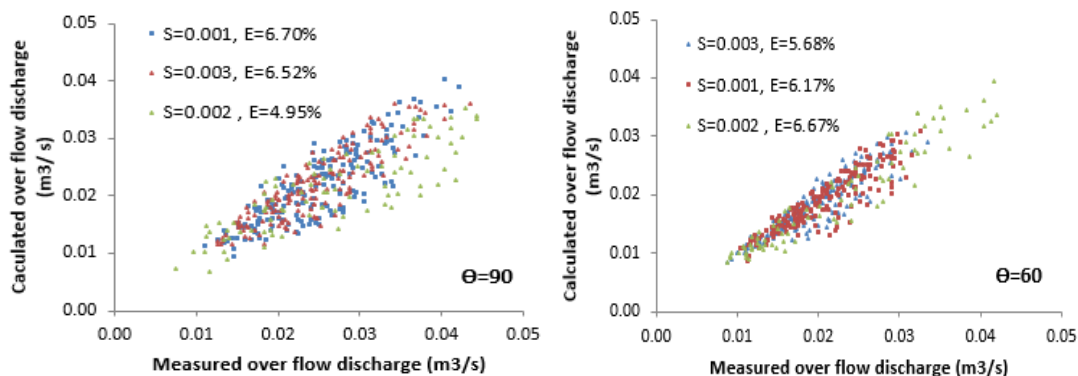
شکل (۱۲-۴) تغییرات انرژی مخصوص بالادست و پایین‌دست جریان در سرریزهای مرکب مثلثی - مستطیلی

۲-۲-۴ بررسی اثر شیب طولی کانال بر دقت محاسبات دبی

جهت کنترل اثر شیب طولی کانال بر مقادیر ضریب دبی مستقیم و دیمارچی ارائه شده برای سرریز جانبی لبه تیز مرکب مثلثی - مستطیلی در این تحقیق، آزمایش‌ها با شیب طولی ۰/۰۰۱، ۰/۰۰۲، ۰/۰۰۳ انجام شد. شکل (۱۳-۴) و (۱۴-۴) مقایسه دبی عبوری محاسبه شده با استفاده از رابطه ضریب دبی مستقیم و دیمارچی با مقادیر مشاهداتی برای دو سرریز مرکب مثلثی - مستطیلی با زوایای رأس ۹۰ و ۶۰ درجه را نشان می‌دهد. این نمودارها برای سه شیب طولی ۰/۰۰۱، ۰/۰۰۲، ۰/۰۰۳ ترسیم شده است. بررسی نمودارهای مذکور نشان می‌دهد تأثیر شیب طولی کانال بر مقادیر دبی محاسباتی با به‌کارگیری ضرایب آبدگری مستقیم و دیمارچی پیشنهادی ناچیز بوده و حذف آن از آنالیز ابعادی تأثیری بر دقت محاسبات سرریز جانبی لبه تیز مثلثی - مستطیلی نداشته است.



شکل (۱۳-۴) مقایسه دبی محاسباتی و مشاهداتی بر اساس ضرایب دبی مستقیم پیشنهادی برای سه شیب طولی مختلف



شکل (۴-۱۴) مقایسه دبی محاسباتی و مشاهداتی بر اساس ضرایب دبی دیمارچی پیشنهادی برای سه شیب طولی مختلف

۴-۳ نتایج مدل عددی

۴-۳-۱ مشخصات مدل برای شبیه‌سازی

در این تحقیق برای مدل‌سازی، مدلی از سرریز به‌ی‌زای دبی ورودی ثابت ۵۶ لیتر بر ثانیه برای سه شیب طولی ۰/۰۰۱، ۰/۰۰۲، ۰/۰۰۳ با مشخصات پارامترهای هندسی در جدول (۴-۳) آورده شده است، استفاده گردید. دلیل انتخاب این مقطع سرریز که در شکل (۳-۱۰) نشان داده شده است، دقت بالای اندازه‌گیری جریان روی سرریز در مدل آزمایشگاهی می‌باشد.

جدول (۴-۳) مشخصات هندسی سرریز مورد مطالعه

ردیف	پارامتر هندسی	نماد پارامتر هندسی	اندازه
۱	طول سرریز	L	۴۰ (cm)
۲	طول تاج سرریز بالایی	b_1	۸ (cm)
۳	طول تاج سرریز پایینی	b_2	۲۴ (cm)
۴	ارتفاع تاج سرریز بالایی	w_1	۱۸/۳۰ (cm)
۵	ارتفاع تاج سرریز پایینی	w_2	۶/۳۰ (cm)
۶	ضخامت سرریز	T	۲ (mm)
۷	زاویه رأس سرریز	θ	۹۰°

۴-۳-۲ زمان شبیه‌سازی

زمان ۱۵ ثانیه برای شبیه‌سازی به مدل معرفی می‌شود. این زمان می‌تواند یک حدس اولیه بر اساس تجربیات آزمایشگاهی باشد و بیانگر زمانی است که پیش‌بینی می‌شود پدیده‌ی مورد نظر برای شبیه‌سازی در این زمان پایدار و یا کامل شود.

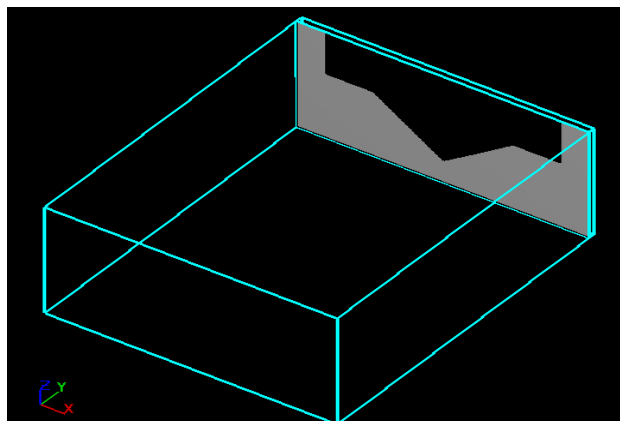
۴-۳-۳ تنظیمات نرم‌افزار و فیزیک مدل‌سازی

در ابتدای مدل‌سازی می‌بایست مفروضات مدل‌سازی برای نرم‌افزار تعریف شود. که واحد شبیه‌سازی بر حسب SI و واحد دما بر حسب درجه سلسیوس می‌باشد. سیال تراکم ناپذیر در نظر گرفته می‌شود و همچنین با توجه به اطلاعات نرم‌افزار در مورد انواع سیالات، آب در دمای ۲۷۳ درجه کلوین برای سیال مورد مدل‌سازی قرار گرفته انتخاب می‌شود.

در قسمت فیزیک نرم‌افزار شتاب ثقل را به دو مؤلفه تجزیه می‌کنیم، در جهت X مساوی است با $g \sin \theta$ و در جهت Z ، $-g \cos \theta$ می‌باشد. جریان را بصورت viscous در نظر می‌گیریم. همچنین فشار هیدرواستاتیک را در جهت محور Z تعریف می‌کنیم.

۴-۳-۱ تنظیمات اندازه‌گیری دبی خروجی

برای اندازه‌گیری دبی خروجی از روی سرریز از قسمت Baffles استفاده می‌کنیم. Baffle ایجاد شده به عنوان یک صفحه‌ی مجازی خواهد بود که در طول شبیه‌سازی می‌توان اطلاعات مربوط به دبی عبوری از آن و نیروهای وارد بر آن را به طور مستمر ثبت کرد. محل قرارگیری این صفحه باید بر روی تاج سرریز باشد. با توجه به شکل (۴-۱۵) مدل از یک صفحه Baffle برای اندازه‌گیری دبی استفاده شده است. در نمایش حالت FAVOR محل قرارگیری Baffle ها نیز نمایش داده می‌شود.

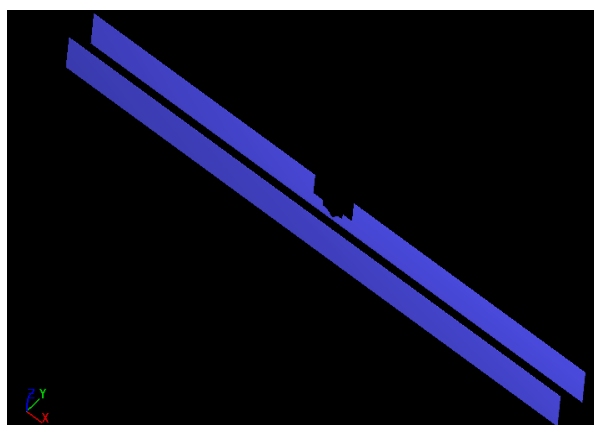


شکل (۴-۱۵) محل قرارگیری Baffle در روی تاج سرریز در حالت FAVOR

۴-۳-۴ مشخصات میدان حل

۴-۳-۴-۱ مدل سازی

ابتدا هندسه فیزیک سرریز با توجه به ابعاد مدل آزمایشگاهی در نرم افزار Autocad ساخته شد. برای وارد کردن مدل به نرم افزار FLOW-3D می بایست فایل را با فرمت stl از Autocad استخراج و در نرم افزار FLOW-3D وارد کنیم. در شکل (۴-۱۶) مدل ساخته شده در نرم افزار را مشاهده می کنید.

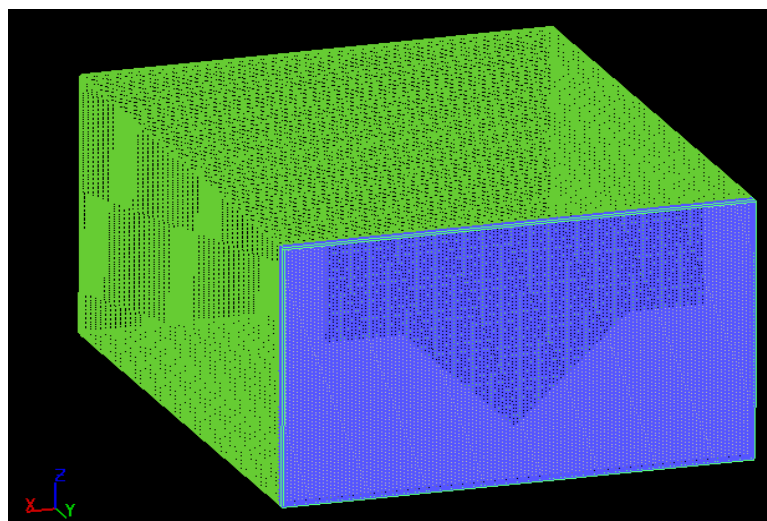


شکل (۴-۱۶) مدل ساخته شده در نرم افزار

۴-۷-۲ شبکه‌بندی

برنامه FLOW-3D، فقط قابلیت تولید شبکه‌های حل منظم (مکعبی) را دارد. شاید در نگاه اول، این شیوه‌ی عمل به عنوان یک محدودیت برای این برنامه مطرح شود در حالیکه استفاده از شبکه‌های مکعبی، همچنان که قابلیت تولید نتایج مطلوب را حفظ می‌کند، سرعت تولید شبکه‌ی حل را نیز بسیار بالا می‌برد.

مش‌زنی یکی از مهم‌ترین قسمت‌های یک مدل‌سازی می‌باشد از یک طرف ابعاد بزرگ برای سلول‌های مش ممکن است بخش جامد و سیال را به خوبی نمایش ندهند که این امر مدل‌سازی را ناقص و نتایج را نامناسب می‌کند. برای مش‌زنی مدل می‌توان از دو روش استفاده کرد، هم می‌توانیم تعداد سلول را مشخص کنیم و هم ابعاد سلول را به نرم‌افزار بدهیم. در این مدل‌سازی ابعاد سلول را مشخص کردیم. در شکل (۴-۱۷) مش‌ها را مشاهده می‌کنید. به منظور کاهش تعداد سلول‌های محاسباتی و به تبع آن کاهش زمان محاسبات، از ابتدای سرریز تا انتهای سرریز جانبی مورد بررسی قرار گرفت. یکی از مهم‌ترین نکاتی که در شبیه‌سازی‌های عددی باید مورد توجه قرار گیرد، شبکه‌بندی مناسب برای حل دقیق معادلات حاکم است. ساختن شبکه مناسب، فرآیند آماده‌سازی اطلاعات ورودی برای مدل عددی FLOW-3D است که دقت محاسبات، همگرایی و زمان محاسبات را تحت تأثیر قرار می‌دهد. جهت افزایش دقت و در عین حال کاهش زمان، از شبکه‌بندی غیریکنواخت برای شبیه‌سازی عددی استفاده شده است. بدین منظور در نواحی نزدیک سرریز جانبی از سلول‌های بیشتر و ریزتر، و برای نواحی دیگر، از مش‌های درشت‌تر استفاده گردید.



شکل (۱۷-۴) مش‌های مدل‌سازی

۴-۷-۳ شرایط مرزی

با توجه به شکل (۱۷-۴)، پس از شبکه‌بندی میدان توسط نرم‌افزار شرایط مرزی برای هر بلوک مش بندی شده تعریف می‌شود. در این مدل دو بلوک مش‌بندی شده وجود دارد که هر بلوک آن شش وجه دارد و شش شرط مرزی به آن‌ها داده می‌شود. این شرایط به صورت شرط‌های ماکزیمم و مینیمم در جهات X ، Y و Z معرفی می‌شوند. شرط مرزی مینیمم در جهت X مربوط به ورودی جریان و شرط ماکزیمم در جهت X برای خروجی جریان می‌باشد. شروط مینیمم و ماکزیمم در جهت Y برای دو سمت جانبی مدل و شرط مینیمم در جهت Z مربوط به کف کانال و شرط ماکزیمم در جهت Z سقف مدل می‌باشد.

✓ مش بلوک سبز رنگ

شرط مینیمم X :

این شرط مربوط به بالادست جریان می‌باشد. در این مرز از شرط مرزی دبی ورودی (Volume flow rate) استفاده می‌شود. در این نوع شرایط می‌توان عمقی را برای عبور دبی از مرز اختصاص داد، اگر

عمقی در نظر گرفته نشود دبی از کل وجه مربوطه وارد شبکه خواهد شد. جدول (۴-۴) عمق بالادست سرریز و دبی ورودی را نشان می‌دهد.

جدول (۴-۴) مقادیر شرایط مرزی مینیمم X در سه شیب طولی مختلف

شیب طولی کانال	عمق بالادست سرریز (m)	دبی ورودی (m ³ /s)
۰/۰۰۱	۰/۲۲۷۵	۰/۰۵۶۹۰
۰/۰۰۲	۰/۲۲۳۳	۰/۰۵۶۶۵
۰/۰۰۳	۰/۲۲۴۶	۰/۰۵۶۴۲

شرط ماکزیمم X:

این شرط مربوط به انتهای پایین دست جریان می‌باشد. در این مرز از شرط مرزی فشار ثابت (specified pressure) استفاده می‌شود. فشار در میدان حل به صورت رقم سطح سیال به نرم‌افزار داده می‌شود. جدول (۵-۴) مقادیر عمق جریان در انتهای پایین دست کانال را نشان می‌دهد.

جدول (۵-۴) مقادیر عمق جریان در انتهای پایین دست کانال برای سه شیب طولی مختلف

شیب طولی کانال	عمق پایین دست سرریز (m)
۰/۰۰۱	۰/۲۲۸۱
۰/۰۰۲	۰/۲۲۶۰
۰/۰۰۳	۰/۲۲۶۴

شرط مینیمم Y :

این شرط مربوط به سمت جانبی کانال می باشد که از شرط مرزی wall نرم افزار استفاده می کنیم، دقیقاً مشابه یک دیوار عمل می کند. وجهی از شبکه ی حل که شرط مرزی wall به آن اختصاص داده می شود، مشابه یک دیوار مجازی عمل خواهد کرد.

شرط ماکزیمم Y :

در این مرز از شرط مرزی متقارن (symmetry) استفاده گردید. این نوع شرط مرزی، شرایط بیرون شبکه ی حل را دقیقاً مشابه شرایط روی مرز داخلی شبکه در نظر می گیرد.

شرط مینیمم Z :

این شرط مربوط به کف کانال می باشد که از شرط مرزی wall نرم افزار استفاده می کنیم، دقیقاً مشابه یک دیوار عمل می کند. وجهی از شبکه ی حل که شرط مرزی wall به آن اختصاص داده می شود، مشابه یک دیوار مجازی عمل خواهد کرد.

شرط ماکزیمم Z :

در این مرز از شرط مرزی متقارن (symmetry) استفاده گردید. کاربرد دیگر این نوع شرط مرزی در سطح آزاد سیال است. وقتی شرط مرزی روی مرز z max، symmetry در نظر گرفته شود، تا وقتی که جریان سیال به این مرز نرسد، شرایط بالای سطح سیال تا بی نهایت مشابه شرایط اتمسفر در نظر گرفته می شود.

✓ مش بلوک آبی رنگ

شرط مینیمم X و ماکزیمم X :

در این شرط از شرط مرزی wall نرم افزار استفاده می کنیم، دقیقاً مشابه یک دیوار عمل می کند. وجهی از شبکه‌ی حل که شرط مرزی wall به آن اختصاص داده می شود، مشابه یک دیوار مجازی عمل خواهد کرد. ضخامت این بلوک ۱۲ میلی متر می باشد.

شرط مینیمم y :

در این مرز از شرط مرزی متقارن (symmetry) استفاده گردید. در میدان های با بلوک های مجاور هم، هر دو بلوک مجاور باید در یک مرز مشترک باشند تا از طریق این مرز، اطلاعات را به هم منتقل کنند.

شرط ماکزیمم y :

شرط مرزی در این مرز Outflow می باشد. این شرط بیشتر با هدف عدم تأثیرپذیری جریان در شبکه‌ی حل از شرایط مرز خروجی ایجاد شده است. جریانی که به این مرز می رسد، شرایط در مرز خود را طوری تطبیق می دهد که جریان بدون هیچ تأثیری از مرز عبور کند.

شرط مینیمم z :

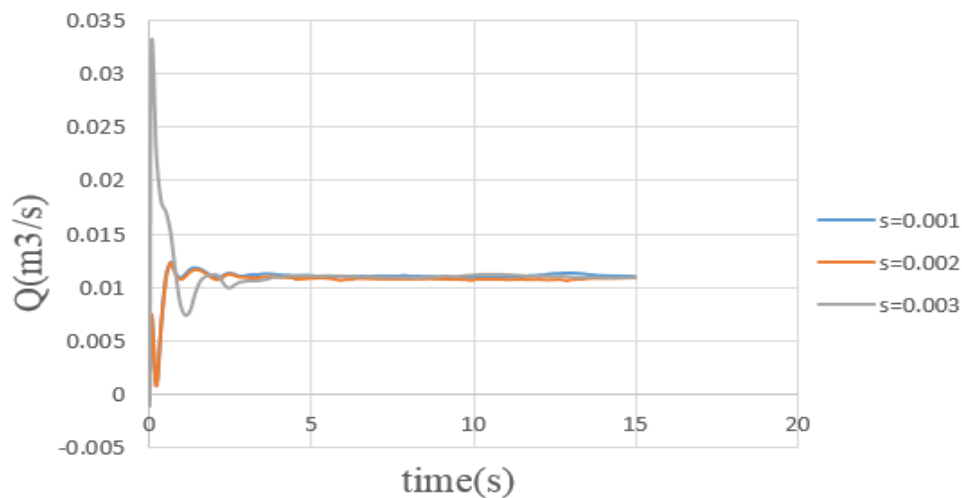
این مرز همانند مرز y max، از شرط مرزی Outflow استفاده شده است.

شرط ماکزیمم z :

در این مرز از شرط مرزی متقارن (symmetry) استفاده گردید. کاربرد دیگر این نوع شرط مرزی در سطح آزاد سیال است. وقتی شرط مرزی روی مرز z max، symmetry در نظر گرفته شود، تا وقتی که جریان سیال به این مرز نرسد، شرایط بالای سطح سیال تا بی نهایت مشابه شرایط اتمسفر در نظر گرفته می شود.

۸-۴ بررسی نتایج و صحت‌سنجی

مدل‌سازی برای مدت ۱۵ ثانیه در نرم‌افزار انجام گرفت و نتایج بر اساس میزان دبی عبوری از روی تاج سرریز مشخص گردید. در شکل (۱۸-۴) نمودار تغییرات دبی نسبت زمان در نرم‌افزار به‌ی‌زای یک دبی ورودی ثابت برای هر سه شیب است. مقایسه نتایج مدل عددی نشان داد که شیب طولی کانال تقریباً تأثیری بر دبی عبوری از روی تاج سرریز ندارد.



شکل (۱۸-۴) نمودار تغییرات دبی عبوری از سرریز مرکب نسبت به زمان

برای صحت‌سنجی نتایج به‌دست آمده از مدل عددی با نتایج آزمایشگاهی در جدول (۶-۴) مورد مقایسه قرار گرفته است. با توجه به نتایج جدول (۶-۴) می‌بینیم که میزان خطای بین نتایج مدل عددی با نتایج آزمایشگاهی بین ۰/۸۳ تا ۱/۴۴ می‌باشد که این میزان نشان‌دهنده تطابق مناسب نتایج و موید صحت مدل‌سازی عددی می‌باشد. میزان خطای مدل‌سازی را با روش زیر محاسبه می‌کنیم:

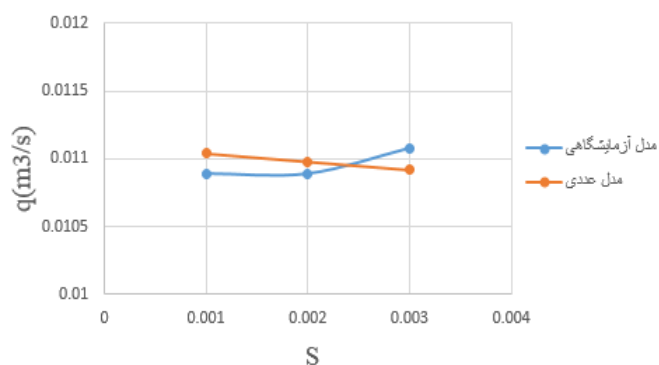
$$\text{خطا} = (Q_{num} - Q_{exp}) / Q_{exp} \quad (18-4)$$

که در آن Q_{num} نشان‌دهنده دبی در مدل عددی، Q_{exp} دبی آزمایشگاهی می‌باشد.

جدول (۴-۶) مقایسه نتایج مدل عددی و نتایج آزمایشگاهی

شیب طولی کانال (S)	مدل آزمایشگاهی q (m^3/s)	مدل عددی q (m^3/s)	خطا (%)
۰/۰۰۱	۰/۰۱۰۸۹	۰/۰۱۱۰۴	۱/۳۸
۰/۰۰۲	۰/۰۱۰۸۹	۰/۰۱۰۹۸	۰/۸۳
۰/۰۰۳	۰/۰۱۱۰۸	۰/۰۱۰۹۲	۱/۴۴

نتایج مدل عددی در نمودار شکل (۴-۱۹) نشان‌دهنده‌ی انطباق مناسب آن با نتایج مدل آزمایشگاهی است.



شکل (۴-۱۹) نمودار تغییرات دبی نسبت به شیب طولی کانال

فصل پنجم:

خلاصه نتایج و پیشنهادات

۵-۱ خلاصه نتایج

این بخش شامل پاسخ به سؤالات اولیه اهداف تحقیق است به صورت مختصر ارائه می‌شود.

۱. در این تحقیق تأثیر شیب طولی کانال (S_0) بر ضریب دبی عبوری از سرریز مرکب مورد بررسی قرار گرفت. آزمایش‌ها در سرریز جانبی لبه‌تیز مرکب مثلثی - مستطیلی برای سه شیب متفاوت ۰/۰۰۱، ۰/۰۰۲، ۰/۰۰۳ انجام گرفت و بررسی‌ها نشان داد که اثر شیب طولی کانال بر ضریب دبی مستقیم و دیمارچی ناچیز است. این مطلب نظر برقی و همکاران (۲۰۰۳) مبنی بر عدم تأثیر شیب طولی کانال بر ضریب دبی سرریزهای جانبی لبه‌تیز ساده را تأیید می‌کند.

۲. ضریب دبی در روش‌های مستقیم و دیمارچی به پارامترهای مؤثر بی‌بعد مطابق زیر وابسته است:

در هر دو روش ضریب دبی به پارامترهای $\frac{L}{y}$ ، $\frac{\bar{w}}{y}$ ، Fr_1 وابسته است. اما در روش مستقیم میزان تأثیرگذاری ارتفاع وزنی تاج به عمق بالادست سرریز نسبت به دو پارامتر $\frac{L}{y}$ ، Fr_1 بیشتر است و در روش دیمارچی تأثیر عدد فرود جریان بالادست سرریز بیشتر از این دو پارامتر می‌باشد.

۳. برای مدل‌سازی از نرم‌افزار FLOW-3D استفاده شد. هندسه مدل بر اساس مدل سرریز جانبی لبه‌تیز مرکب مثلثی - مستطیلی که در آزمایشگاه مورد بررسی قرار گرفت، انتخاب شد. این مدل با استفاده از نرم‌افزار AutoCad ساخته شده و به نرم‌افزار وارد می‌گردد. دو مش با سلول‌هایی با ابعاد مختلف تشکیل شد و در هر مش شرایط مرزی استفاده شده است. جریان روی سرریز به صورت آشفته با مدل آشفته‌گی RNG معرفی و صفحه Baffle در ناحیه سرریز جانبی تعبیه شد. مدل برای مدت ۱۵ ثانیه روی سرریز شبیه‌سازی و نتایج بر حسب دبی عبوری

از روی تاج سرریز نشان داد که این نرم‌افزار قابلیت خوبی برای شبیه‌سازی سه بعدی جریان روی سرریز دارد.

۴. مدل حرکت جریان روی سرریز در سه شیب طولی مختلف اجرا گردید و نتایج همگرایی مناسبی داشته و زمان ۱۵ ثانیه در محدوده مشخص همگرا شده است. پس از استخراج نتایج و تطبیق آن با نتایج آزمایشگاهی مشاهده گردید که تطبیق مناسبی با نتایج آزمایشگاه دارد. این نتایج در جدول (۴-۶) موجود می‌باشد و حداکثر ۱/۴۴٪ خطا بین مدل عددی و آزمایشگاهی است.

۲-۵ پیشنهادات

برای توسعه تحقیقات عددی بر روی این سرریز مرکب مثلثی _ مستطیلی، حالت‌های متعددی از مقاطع سرریز با زوایای رأس ۶۰، ۱۲۰ درجه قابل بررسی و پیشنهاد می‌باشد.

اثر تغییر عرض کانال اصلی بر ضرایب دبی سرریزهای مرکب مورد تحقیق به صورت آزمایشگاهی بررسی شود و پیشنهاد می‌گردد با شبیه‌سازی سه‌بعدی جریان بر روی این سرریز با استفاده از نرم‌افزار FLOW-3D، برای صحت‌سنجی مدل عددی نتایج آن را با مدل آزمایشگاهی مقایسه نمود.

منابع

- برقی، س. م. و صالحی، ح. ۱۳۸۲ "بررسی ضریب دبی سرریز جانبی با استفاده از مدل فیزیکی" ششمین کنفرانس بین‌المللی مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی اصفهان، جلد ۳، ص. ۱۰-۳.
- جلیلی قاضی‌زاده، م. ر. و سمیرا فرهادی راد و سید محمود برقی، ۱۳۹۰. "تعیین ضریب دبی سرریز جانبی مستطیلی براساس مشخصات کانال پایین‌دست"، اولین کنفرانس بین‌المللی و سومین کنفرانس ملی سد و نیروگاه‌های برق آبی.
- حسینی، م. و جلیل ابریشمی، (۱۳۷۹)، "هیدرولیک کانال‌های باز"، چاپ پانزدهم، دانشگاه امام رضا (ع) - مشهد.
- عباسپور، ا. و یاسی، م. ۱۳۸۰ "جریان بر روی سرریز مرکب مثلثی - مستطیلی بدون فشردگی جانبی" سومین کنفرانس هیدرولیک ایران، دانشگاه تهران، ایران، آبان ۱۳۸۰، ص ۱۵۳-۱۴۵.
- عامری، م. احمد احمدی، امیر احمد دهقانی، ۱۷ و ۱۸ اردیبهشت ماه ۱۳۹۳ "تعیین ضریب دبی سرریز جانبی لبه تیز مرکب" هشتمین کنگره ملی مهندسی عمران، دانشکده مهندسی عمران، بابل.
- عامری، م. احمد احمدی، امیر احمد دهقانی، ۱۳۹۴ "تعیین ضریب دبی سرریزهای جانبی لبه تیز مرکب مثلثی - مستطیلی" نشریه پژوهش‌های حفاظت آب و خاک جلد بیست و دوم، شماره سوم، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان.
- قنادان، ر. و عبدالرضا ظهیری، مهدی کاهه، محمدصادق جلال‌الدینی. کرمان - ۸ و ۹ اسفند ماه ۱۳۹۱ "شبیه‌سازی عددی سرریز جانبی لبه پهن با استفاده از مدل FLOW-3D" همایش ملی مهندسی آب و فاضلاب، دانشگاه تحصیلات تکمیلی صنعتی و فناوری پیشرفته - پژوهشگاه علوم و تکنولوژی پیشرفته و علوم محیطی.
- قاسم‌زاده، ف. و صلاح کوچک‌زاده، (۱۳۹۲) "شبیه‌سازی مسائل هیدرولیکی در FLOW-3D" چاپ دوم، انتشارات نوآور، تهران.
- محمدیان، ب. و عبدالرضا ظهیری، مهدی مفتاح هلقی، هدی طوفانی موقر. ۱۳ و ۱۲ و ۱۱ شهریور ماه ۱۳۹۳، "شبیه‌سازی عددی جریان از روی سرریز جانبی لبه تیز مرکب با استفاده از نرم‌افزار

FLOW-3D" پانزدهمین کنفرانس دانشجویان عمران سراسر کشور، دانشگاه ارومیه.

Borghei, S.M., Jalili, M.R., and Ghodsian, M. 1999. **“Discharge coefficient for sharp crestedside weirs in subcritical flow”**. J. Hydraul. Eng. ASCE. 125: 10. 1051-1056.

De Marchi, G. 1934. **“Essay on the performance of lateral weirs”**. L EnergiaElectrica Milano.11: 11. 849-860.

El-Khashab, A. and Smith, K.V.H.; **“Experimental investigation of flow over side weirs”**; Journal of Hydraulic Engineering, ASCE102, No. 9 (1976) 1255-1268

Ghodsian, M., 2004. Flow over Triangular Side weir. Scientia Iranica, sharif university of Technology, Vol. 11, Nos. 1&2, 114-120.

Hager, W.H., 1987. **“Lateral outflow of side weirs”**. J. hydraul. Eng., ASCE 113 (4),491 – 504.

Izadjoo, F., and Shafai Bajestan, M. 1996. **“Experimental investigation of discharge coefficient in side weirs”**, P 29-44. In: 4th River Engineering Conference, Ahwaz. (In Persian)

Jan, C.D., Chang, C.D., and Lee, M.H. 2006. Discussion of **“Design and calibration of a compound sharp-crested weir”**, by Martinez, J., Recca, J., Morillas, M. T. and Lopez, J. G. J. Hydr. Eng. 132: 8. 868-872.

Kumar, C.P., and Pathak, S.K. 1987. **“Triangular side weirs”**. J. Irrig. Drain. Eng. ASCE.113: 1. 98- 105.

Martinez, J., Recca, J., Morillas, M.T., and Lopez, J.G. 2005. **“Design and calibration of a compound sharp-crested weir”**. J. Hydraul. Eng. ASCE. 131: 2. 112-116.

Piratheepan, M., Winston, N.E.F., and Pathirana, K.P.P. 2006. **“Discharge measurements in open channels using compound sharp-crested weirs”**. J. Ins. Eng. Sri Lanka. No. 03, 31p.

Reda M. Abd El-Hady Rady. **“2D-3D Modeling of Flow Over Sharp-Crested Weirs”** Journal of Applied Sciences Research, 7(12): 2495-2505, 2011 ISSN 1819-544X.

Subramanya, K., and Awasthy, S.C. 1972. **“Spatially varied flow over side weirs”**. J. Hydraul.Eng. ASCE. 98: 1. 1-10.

Singh, R., Manivannan, D., and Satyanarayana, T. 1994. **“Discharge coefficient of rectangular side weirs”**. J. Irr. Drain. Eng. ASCE. 120: 4. 814-819.

United States Bureau of Reclamation (USBR), 1963. **“Compound weir study”** Hydraulic Laboratory Report No. Hyd. 505, 34 p.

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.

Zahiri, A., Azamathulla, H.Md., and Bagheri, S.M. 2013. **“Discharge coefficient for compound sharp crested side weirs in subcritical flow conditions”**. J. Hydrol. 480: 162.

Abstract

Side weirs are common structures, used as control structures in irrigation system and conveyance channels. The fluid flow of side weirs is a spatially varied flow with reducing discharge. Numerous physical models of these weirs were built and considered in experimental studies. Compound triangular-rectangular sharp crested side weirs are known as one of side weirs. In this research, the parameters affect the discharge coefficient of side weirs were investigated. These parameters include longitudinal slope of channel (s_0), the flow upstream Froude number (Fr_1), the ratio of weighted crest height of the weir to upstream water depth ($\frac{\bar{w}}{y}$) and the proportion of weir length to flow depth ($\frac{l}{y}$) in upstream of weir. The experimental results for three slopes (0.001, 0.002, 0.003) in subcritical conditions showed that the effect of channel longitudinal slope on computational discharge values was insignificant and could be neglected in dimensional analysis which does not effect on accuracy of computation. To estimate the discharge of compound side weir, the discharge coefficient was obtained and compared with experimental results which showed an appropriate accuracy of calculation. To benefit from the advantage of time saving and economic considerations, the flow-3d software was used to simulate the flow around the side weir. The RNG K- ϵ turbulence model was employed in numerical modeling. The purpose of this research was to compare the numerical and experimental results based on the value of weir discharge. This comparison showed maximum that the difference between experimental and numerical results was %0.83 – %1.44 showing confirming the validation of modeling procedure.

Key words: compound side weir, weighted crest height, longitudinal slope of channel, dimensional analysis, experimental model, subcritical flow, flow-3d, RNG K- ϵ turbulence model.



Shahrood University of Technology

Faculty of civil Engineering

MSc Thesis in Hydraulic Structures

**Experimental and Numerical study of the effect of channel's slope on
discharge coefficient of compound triangular-rectangular sharp
crested side weirs**

By: Sina Shokri

Supervisor(s):

Dr. Amir abas Abedini

Dr. Ahmad Ahmadi

Advisor:

Dr. Mojtaba ameri

July 2016