

بسم الله الرحمن الرحيم



دانشکده مهندسی عمران

پایان نامه کارشناسی ارشد مهندسی آب و سازه‌های هیدرولیکی

مدل‌سازی عددی سرریز کنگره‌ای انحنادار

نگارنده: فرشته زاهدی

استاد راهنما:

دکتر رامین امینی

دی ۱۳۹۷

شماره: ۹۷/۲۸۷/ج
تاریخ: ۹۷/۱۲/۲۹

باسمه تعالی



فرم شماره (۳) صورتجلسه نهایی دفاع از پایان نامه دوره کارشناسی ارشد

با نام و یاد خداوند متعال، ارزیابی جلسه دفاع از پایان نامه کارشناسی ارشد خانم / آقای فرشته زاهدی با شماره دانشجویی ۹۵۰۷۴۶۴ رشته عمران گرایش سازه‌های هیدرولیکی تحت عنوان مدل سازی عددی سرریز کنگره ای استاندارد که در تاریخ ۹۷/۱۰/۲۴ با حضور هیأت داوران در دانشگاه صنعتی شاهرود برگزار گردید به شرح ذیل اعلام می گردد:

☐ مردود ☒ قبول (با درجه:) ☐ عملی ☒ نظری: نوع تحقیق:			
عضو هیأت داوران	نام و نام خانوادگی	مرتبه علمی	امضاء
۱- استاد راهنمای اول	جناب آقای دکتر رامین امینی	دانشیار	
۲- استاد راهنمای دوم			
۳- استاد مشاور			
۴- نماینده تحصیلات تکمیلی	جناب آقای دکتر مهدی گلی	استادیار	
۵- استاد ممتحن اول	جناب آقای دکتر سعید گلپایان	استادیار	
۶- استاد ممتحن دوم	جناب آقای دکتر رمضان واقعی	استادیار	

نام و نام خانوادگی رئیس دانشکده: جناب آقای دکتر رضا نادری

دانشکده مهندسی عمران

انوش تحصیلات تکمیلی و آموزش عالی دانشگاه صنعتی شاهرود:

تصوه: در صورتی که کسی مردود شود حداکثر یکبار دیگر (در مدت مجاز تحصیل) می تواند از پایان نامه خود دفاع نماید (دفاع مجدد نباید زودتر از ۴ ماه برگزار شود).

تقدیم اثر

ماحصل آموخته هایم را تقدیم می کنم به آنان که مهر آسمانی شان آرام بخش آلام زمینی ام است.

به استوارترین تکیه گاهم، دستان پرمهر مادرم و به سبزترین نگاه زندگیم، چشمان سبز پدرم که هرچه آموختم در مکتب عشق شما آموختم و هرچه بکوشم قطره ای از دریای بی کران مهربانیتان را سپاس نتوانم بگویم. امروز هستی ام به امید شماست و فردا کلید باغ بهشتم رضای شما. آوردی گران- سنگ تر از این ارزان نداشتم تا به خاک پایتان نثارکنم، باشد که حاصل تلاشم نسیم گونه غبار خستگیان را بزدايد. بوسه بر دستان پرمهرتان.

تشکر و قدردانی

شکر شایان نثار ایزد منان که توفیق را رفیق راهم ساخت تا این پایان نامه را به پایان برسانم. از استاد فاضل و اندیشمند جناب آقای دکتر امینی به عنوان استاد راهنما که همواره من را مورد لطف و محبت خود قرار داده اند، کمال تشکر را دارم و همچنین با تمام وجودم قدردان همسر عزیزم هستم به پاس تعبیر عظیم و انسانی‌اش از کلمه ایثار و از خودگذشتگی، به پاس عاطفه‌ی سرشار و گرمای امیدبخش وجودش و به پاس قلب بزرگش که سرگردانی و ترس در پناهش به شجاعت می‌گراید.

تعهد نامه

اینجانب فرشته زاهدی دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته مهندسی عمران- سازه‌های هیدرولیکی دانشکده مهندسی عمران دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان نامه مدل‌سازی عددی سرریز کنگره‌ای انحنادار تحت راهنمایی دکتر رامین امینی متعهد می‌شوم .

- تحقیقات در این پایان‌نامه 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 پایان‌نامه 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 می‌باشد و مقالات مستخرج بانام « دانشگاه صنعتی شاهرود » و یا « Shahrood University of Technolog » به چاپ خواهد رسید .
 - حقوق معنوی تمام افرادی که در به دست آمدن نتایج اصلی پایان‌نامه تأثیرگذار بوده‌اند در مقالات مستخرج از پایان‌نامه رعایت می‌گردد.
 - در کلیه مراحل انجام این پایان‌نامه ، در مواردی که از موجود زنده (یا بافت‌های آن‌ها) استفاده شده است ضوابط و اصول اخلاقی رعایت شده است .
- در کلیه مراحل انجام این پایان‌نامه، 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 فرشته زاهدی

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

سرریزها نقش مهمی در تنظیم سطح آب، ایمنی و همچنین هزینه‌های مربوط به ساخت در سازه‌های هیدرولیکی دارند. یکی از راه‌های افزایش راندمان آن‌ها استفاده از سرریزهای کنگره‌ای می‌باشد که در یک عرض مشخص با افزایش طول سرریز دبی عبوری از آن را بهبود می‌بخشند. حال آنکه ایجاد انحنا یا قوس در پلان سرریز کنگره‌ای طول آن را بیش از پیش افزایش داده و همین امر باعث افزایش دبی عبوری در آن می‌شود. در این پایان نامه، با استفاده از نرم‌افزار FLOW 3D و به کارگیری مدل آشفتگی k-ε RNG ضریب دبی جریان و مقدار دبی عبوری از سرریزهای کنگره‌ای انحنادار (قوسی) دوزنقه‌ای با دیواره‌های قائم و دارای تاج نیم‌دایره و سرریزهای کنگره‌ای انحنادار (قوسی) دوزنقه‌ای با دیواره‌ی شیب‌دار و دارای دو نوع تاج تخت و نیم‌دایره، همچنین سرریز کنگره‌ای انحنادار مثلثی، مستطیلی و دایره‌ای شکل در پلان با تاج نیم‌دایره مورد بررسی قرار گرفته است. بررسی‌ها نشان می‌دهد که به طور متوسط در محدوده‌ی بارهای هیدرولیکی مورد بررسی به ترتیب سرریز کنگره‌ای قوسی مثلثی با زاویه‌ی رأس ۱۱ درجه و بعد از آن سرریز کنگره‌ای قوسی دوزنقه‌ای با دیواره‌ی قائم، سرریز مستطیلی، سرریز دوزنقه‌ای با دیواره‌ی شیب‌دار، سرریز مثلثی با زاویه‌ی رأس ۲۴ درجه و در آخر سرریزهای دایره‌ای شکل در پلان دبی بیشتری نسبت به سرریز خطی از خود عبور می‌دهند. مقایسه‌های به عمل آمده حاکی از آن است که در کلیه‌ی سرریزهای کنگره‌ای مورد مطالعه، در هدهای پایین ضریب دبی جریان با افزایش $\frac{H_t}{P}$ (ارتفاع انرژی کل بالادست به ارتفاع سرریز) روند افزایشی داشته تا به مقدار ماکسیمم خود برسد و پس از آن با افزایش $\frac{H_t}{P}$ ضریب دبی جریان کاهش می‌یابد.

واژگان کلیدی: سرریز کنگره‌ای، ضریب گذردهی، شیب دیواره، FLOW 3D

لیست مقالات مستخرج شده از پایان نامه

مقاله‌ی بررسی عددی تأثیر شیب دیواره و شکل تاج بر عملکرد هیدرولیکی سرریز کنگره‌ای قوسی با پلان دوزنقه‌ای در هفدهمین کنفرانس ملی هیدرولیک ایران.

فهرست

فصل اول..... ۱

۱ - ۱ مقدمه ۲

۱ - ۲ سرریزها ۴

۱ - ۳ بخش های اصلی سرریز ۵

۱ - ۳ - ۱ بخش کنترل کننده یا تاج..... ۵

۱ - ۳ - ۲ مجرای تخلیه یا بخش انتقال آب..... ۵

۱ - ۳ - ۳ سازه پایانه یا بخش تخلیه ۶

۱ - ۴ انواع سرریزها ۶

۱ - ۴ - ۱ سرریزهای خطی (با تاج مستقیم)..... ۶

۱ - ۴ - ۲ سرریزهای غیرخطی (با تاج غیرمستقیم) ۷

۱ - ۵ معادله ی کلی حاکم بر سرریزها..... ۷

۱ - ۶ اهداف پژوهش ۹

۱ - ۷ مراحل انجام پژوهش ۹

۱ - ۸ نحوه ی تدوین پژوهش..... ۱۰

فصل دوم.... ۱۱

۲ - ۱ مقدمه ۱۲

۲ - ۲ معرفی روش های عددی ۱۲

- ۱۳ ۲ - ۲ - ۱ روش تفاضل محدود
- ۱۴ ۲ - ۲ - ۲ روش المان محدود
- ۱۴ ۲ - ۲ - ۳ روش حجم محدود
- ۱۵ ۲ - ۲ - ۴ روش‌های طیفی
- ۱۶ ۲ - ۳ - ۳ معادلات حاکم بر جریان
- ۱۷ ۲ - ۳ - ۱ دینامیک سیالات محاسباتی
- ۱۹ ۲ - ۳ - ۲ معادله پیوستگی برای جریان آشفته
- ۲۱ ۲ - ۳ - ۳ معادلات مومنتوم برای جریان آشفته
- ۲۱ ۲ - ۳ - ۴ تعیین موقعیت سطح آزاد
- ۲۳ ۲ - ۳ - ۴ - ۱ روش حجم سیال
- ۲۴ ۲ - ۳ - ۵ روش FAVOR
- ۲۴ ۲ - ۴ - ۴ معرفی نرم‌افزارهای محاسبات عددی
- ۲۵ ۲ - ۴ - ۱ نرم‌افزار FLUENT
- ۲۶ ۲ - ۴ - ۲ نرم‌افزار ANSYS
- ۲۶ ۲ - ۴ - ۳ نرم‌افزار ANSYS-CFX
- ۲۷ ۲ - ۴ - ۴ نرم‌افزار FLOW 3D
- ۲۸ ۲ - ۵ - ۵ معادلات آشفتگی
- ۳۰ ۲ - ۵ - ۱ مدل طول اختلاط پرانتل

۳۱	۲ - ۵ - ۲ یک معادله‌ای انرژی جنبشی آشفستگی
۳۱	۲ - ۵ - ۳ مدل دو معادله‌ای $k-\varepsilon$
۳۳	۲ - ۵ - ۳ برخی از مشخصات مدل استاندارد $k-\varepsilon$
۳۳	۲ - ۵ - ۴ مدل متلاطم $k-\varepsilon$ RNG
۳۵	۲ - ۵ - ۵ مدل دو معادله‌ای $k-\omega$
۳۶	۲ - ۵ - ۶ مدل شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ
۳۷	۲ - ۶ پارامترهای موثر
۳۷	۲ - ۶ - ۱ سرریز کنگره‌ای مثلثی
۳۹	۲ - ۶ - ۲ سرریز کنگره‌ای دایره‌ای
۴۰	۲ - ۶ - ۳ سرریز کنگره‌ای دوزنقه‌ای و مستطیلی
۴۱	۲ - ۷ مطالعات تحلیلی و آزمایشگاهی بر روی سرریزهای کنگره‌ای
۵۳	۲ - ۸ جمع‌بندی و خلاصه‌ی فصل
۵۵	فصل سوم
۵۶	۳ - ۱ مقدمه
۵۶	۳ - ۲ مشخصات مدل Crookston
۵۹	۳ - ۳ مشخصات میدان حل
۵۹	۳ - ۴ تنظیمات نرم افزار و فیزیک مدل‌سازی
۵۹	۳ - ۵ شبکه‌بندی

۶۲.....	۳ - ۵ - ۱ نسبت اندازه و نسبت شکل
۶۲	۳ - ۵ - ۱ - ۱ نسبت اندازه
۶۳	۳ - ۵ - ۱ - ۲ نسبت شکل
۶۴.....	۳ - ۶ شرایط مرزی میدان
۶۵.....	۳ - ۶ - ۱ شرط مینیمم x
۶۶.....	۳ - ۶ - ۲ شرط ماکزیمم x
۶۶.....	۳ - ۶ - ۳ شرط مرزی در جهت y
۶۷.....	۳ - ۶ - ۴ شرط مرزی مینیمم z
۶۷.....	۳ - ۶ - ۵ شرط مرزی ماکزیمم z
۶۷.....	۳ - ۷ زمان شبیه سازی
۶۸.....	۳ - ۸ تعریف شرایط اولیه
۶۹.....	۳ - ۹ مدل آشفستگی
۶۹.....	۳ - ۱۰ روش عددی تحلیل مدل
۷۰	۳ - ۱۱ بررسی نتایج و صحت سنجی
۷۲	۳ - ۱۲ تأثیر مدل آشفستگی
۷۳	۳ - ۱۳ جمع بندی و خلاصه ی فصل
۷۵	فصل چهارم
۷۶.....	۴ - ۱ مقدمه

۷۶	۴ - ۲ بیان مسئله
۸۱	۴ - ۳ نتایج
۸۱	۴ - ۳ - ۱ مقایسه ی جریان عبوری از سرریز
۸۳	۴ - ۴ مقایسه ی منحنی دبی - $\frac{H_t}{P}$ در مدل های مختلف
۸۳	۴ - ۴ - ۱ سرریز مثلثی
۸۴	۴ - ۴ - ۲ سرریز دایره ای
۸۵	۴ - ۴ - ۳ سرریز دوزنقه ای با دیواره ی شیب دار دارای تاج نیم دایره و تخت
۸۶	۴ - ۴ - ۴ سرریز دوزنقه ای و مستطیلی
۸۷	۴ - ۵ مقایسه منحنی ضریب گذردهی - $\frac{H_t}{P}$
۸۷	۴ - ۵ - ۱ سرریز مثلثی
۸۸	۴ - ۵ - ۲ سرریز دایره ای
۸۹	۴ - ۵ - ۳ سرریز دوزنقه ای با دیواره ی شیب دار دارای تاج نیم دایره و تخت
۹۰	۴ - ۵ - ۴ سرریز دوزنقه ای و مستطیلی
۹۰	۴ - ۶ منحنی های کارآیی
۹۵	۴ - ۷ فرمول محاسبه ی C_d
۹۷	۴ - ۸ جمع بندی و خلاصه ی فصل
۹۹	فصل پنجم
۱۰۰	۵ - ۱ مقدمه

۵ - ۲ نتیجه گیری ۱۰۰

۵ - ۳ پیشنهادات ۱۰۳

منابع ۱۰۵

فهرست تصاویر

شکل ۱-۱. سرریز خطی و کنگره ای ۳

شکل ۱-۲. تغییرات پارامتر φ نسبت به زمان ۲۰

شکل ۲-۲. محاسبه تابع حجم سیال در روش VOF ۲۴

شکل ۳-۲. مدل های آشفتگی ۳۰

شکل ۴-۲. پلان و مقطع طولی سرریز مثلی انحنا دار ۳۸

شکل ۵-۲. پلان سرریز کنگره ای دایره ای انحنا دار ۳۹

شکل ۶-۲. پلان سرریز کنگره ای دوزنقه ای و مستطیلی انحنا دار ۴۰

شکل ۷-۲. برخی اشکال سرریز کنگره ای ۴۱

شکل ۸-۲. پارامترهای موجود در رابطه ی قدسیان ۴۵

شکل ۹-۲. اجرای ابزار هیدرودینامیکی در بالادست سرریز کنگره ای دوزنقه ای ۴۷

شکل ۱۰-۲. نتایج ضریب گذردهی سرریز در برابر نسبت $\frac{H_o}{p}$ (حیدر پور و همکاران) ۴۸

شکل ۱۱-۲. شیب بالادست و پایین دست مقطع ۴۹

- شکل ۲-۱۲. تغییرات ضریب گذردهی در برابر نسبت $\frac{H_t}{P}$ به ازاء شیب‌های مختلف مقطع ۴۹
- شکل ۳-۱. تصویر مخزن ساخته‌شده در دانشگاه یوتا برگرفته از Crookston, 2010 ۵۶
- شکل ۳-۲. نحوه‌ی قرار گیری سرریز کنگره ای در مخزن برگرفته از Crookston, 2010 ۵۷
- شکل ۳-۳. پارامترهای سرریز ذوزنقه‌ای انحنادار، مدل‌سازی شده توسط Crookston, 2010 ... ۵۸
- شکل ۳-۴. نتایج آزمایشگاهی Crookston, 2010 ۵۸
- شکل ۳-۵. تغییر شکل موانع به دلیل تقاطع چندگانه در شبکه‌بندی FLOW 3D ۶۰
- شکل ۳-۶. تأثیر مش زنی بر هندسه احجام: یک شکل مخروطی با ۱۰۰۰۰۰ مش و همان شکل با ۱۰۰۰۰۰۰ مش ۶۱
- شکل ۳-۷. مشخصات Mesh Block ۶۴
- شکل ۳-۸. شبکه حل برای مدل ۶۴
- شکل ۳-۹. شرایط مرزی Mesh block ها ۶۷
- شکل ۳-۱۰. پیغام پایداری در نرم افزار ۶۸
- شکل ۳-۱۱. دبی خروجی برحسب زمان ۶۸
- شکل ۳-۱۲. روش عددی GMRES برای تحلیل مدل ۷۰
- شکل ۳-۱۳. مقایسه‌ی نتایج مدل عددی با نتایج ارائه‌شده توسط کروکستون ۷۱
- شکل ۴-۱. نمای سه بعدی و پارامترهای مؤثر در سرریزهای ذوزنقه ای (Trapezoidal weir) .. ۷۸
- شکل ۴-۲. نوع و اندازه‌ی تاج ۷۸
- شکل ۴-۳. نمای سه‌بعدی و پارامترهای مؤثر در سرریزهای دایره‌ای (Circular weir) ۷۹

- شکل ۴-۴. نمای سه بعدی و پارامترهای موثر در سرریزهای مثلثی (Triangular weir) ۷۹
- شکل ۴-۵. نمای سه بعدی و پارامترهای موثر در سرریز مستطیلی (Rectangular weir) ۸۰
- شکل ۴-۶. نمای سه بعدی سرریز خطی (Linear Weir) ۸۰
- شکل ۴-۷. جریان عبوری از سرریزها ۸۲
- شکل ۴-۸. مقایسه ی دبی سرریزهای مثلثی و خطی ۸۳
- شکل ۴-۹. مقایسه ی دبی سرریزهای دایره ای و خطی ۸۴
- شکل ۴-۱۰. مقایسه ی دبی بین سرریز دوزنقه ای دارای دیواره ی قائم با تاج نیم دایره و سرریز دوزنقه ای دارای دیواره شیب دار با تاج تخت و تاج نیم دایره ۸۵
- شکل ۴-۱۱. مقایسه ی دبی سرریزهای مستطیلی و دوزنقه ای و خطی ۸۶
- شکل ۴-۱۲. مقایسه ی ضریب گذردهی سرریزهای مثلثی ۸۷
- شکل ۴-۱۳. مقایسه ی ضریب گذردهی سرریزهای دایره ای ۸۸
- شکل ۴-۱۴. مقایسه ی ضریب گذردهی بین سرریز دوزنقه ای دارای دیواره ی قائم با تاج نیم دایره و سرریز دوزنقه ای دارای دیواره ی شیب دار با تاج تخت و تاج نیم دایره ۸۹
- شکل ۴-۱۵. مقایسه ی ضریب گذردهی سرریزهای مستطیلی و دوزنقه ای ۹۰
- شکل ۴-۱۶. تاثیر نسبت $L_{C-cycle}/w_c$ بر دبی عبوری ۹۱
- شکل ۴-۱۷. مقایسه ی تاثیر سیکل در برابر $\frac{H_t}{p}$ برای سرریزها بر اساس کار کروکستون (Crookston 2013) ۹۳
- شکل ۴-۱۸. معادله ی پیش بینی C_d ۹۵

فهرست جداول

جدول ۱-۲. ضرایب تجربی معادله ϵ و k	۳۲
جدول ۲-۲. ضرایب تجربی روش RNG معادله ϵ و k	۳۵
جدول ۱-۳. مشخصات سرریز کنگره ای قوسی با پلان دوزنقه ای (Crookston, 2010) استفاده شده جهت صحت سنجی	۵۷
جدول ۲-۳. شرایط مرزی موجود در نرم افزار FLOW 3D	۶۵
جدول ۳-۳. مقایسه مقادیر دبی حاصل از مدل عددی با دبی آزمایشگاه	۷۱
جدول ۱-۴. مشخصات سرریزهای مدل سازی شده	۷۷
جدول ۲-۴. محاسبه ی طول سرریز	۸۱
جدول ۳-۴. ضرایب معادلات C_d	۹۶

نشانه گذاری

C_d	ضریب گذردهی
Q	دبی عبوری
L_c	طول سرریز
$L_{C-cycle}$	طول یک سیکل سرریز
Q_L	دبی عبوری از سرریز خطی
H_t	بار هیدرولیکی کل
H	ارتفاع آب روی سرریز
g	شتاب ثقل
W	عرض سرریز
W_c	عرض سیکل
R	شعاع کمان
P	ارتفاع سرریز
d	اختلاف ارتفاع تاج سرریز از بستر پایین دست
H_d	هد کل جریان در پایین دست سرریز
P	جرم مخصوص سیال
Θ	زاویه انحنای مرکزی سرریز
θ	زاویه انحنای سیکل
θ'	زاویه‌ی هر کمان در سرریز دایره‌ای شکل
α	زاویه‌ی داخلی دیوار جانبی سرریز دوزنقه‌ای و زاویه‌ی راس سرریز مثلثی

α'	زاویه‌ی خارجی دیوار جانبی سرریز دوزنقه‌ای
N	تعداد سیکل
A	طول وجه داخلی دماغه یک سیکل سرریز
D	طول وجه خارجی یک سیکل سرریز
t_w	ضخامت سرریز
μ	لزجت دینامیکی
μ_t	لزجت آشفتگی
μ_{eff}	لزجت گردابه‌ای موثر
K	انرژی جنبشی آشفتگی
ε	اتلاف انرژی جنبشی آشفتگی
SM	نیروهای داخلی
ω	نرخ استهلاک انرژی ویژه
G_K	نشان‌دهنده تولید انرژی جنبشی آشفته ناشی از گرادیان متوسط سرعت
G_ω	نشان‌دهنده‌ی تولید ω
Y_ω و Y_K	نشان‌دهنده‌ی اتلاف مقدار K و ω ناشی از تلاطم
$\mathcal{T}_\omega$ و $\mathcal{T}_K$	نشان‌دهنده پخشیدگی K و ω
l_m	طول آشفتگی
E_{ij}	مولفه‌ی متوسط نرخ تغییر شکل المان
U	سرعت آشفتگی
S	فاکتور تعیین کننده‌ی شیب دیواره سرریز
S_e	فاکتور تعیین کننده شکل مقطع تاج

S_o	شیب کف
σ	ضریب کشش سطحی
F	درصد حجم سیال
$\alpha\varepsilon$ و αk	مقادیر معکوس عدد پرانتل آشفتگی
R^2	ضریب همبستگی
ε'	پارامتر کارایی سیکل

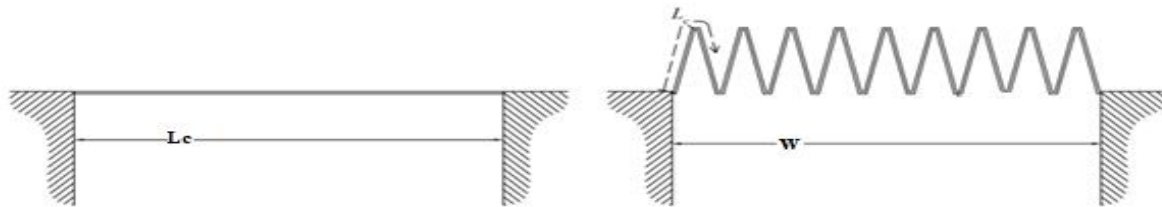
فصل اول

کلیات

امروزه کشورهای صنعتی به دنبال یافتن راه‌هایی برای پاسخگویی به افزایش مصرف انرژی هستند، به نحوی که محیط زیست در این فعل و انفعالات به مخاطره نیفتد. انرژی الکتریکی تولیدی توسط نیروگاه‌های برقی یکی از منابع غیر مخرب و سالم انرژی می‌باشد که در اکثر نقاط جهان قابل دستیابی است. علاوه بر این تأمین آب برای مصارف مختلف نظیر آبیاری، مصارف خانگی و شهری و صنعت از اهمیت زیادی برخوردار است. از روش‌های متداول تأمین آب مورد نیاز، به کار بردن تأسیسات و سازه‌های هیدرولیکی مناسب می‌باشد. از جمله این سازه‌های هیدرولیکی سدها و تأسیسات مربوط به آن مانند سرریزها هستند. سرریز در سدها به منظور انتقال سیلاب‌های بزرگ بدون ایجاد مخاطره در سد و تأسیسات وابسته و جلوگیری از بروز آسیب غیرقابل جبران در سیستم‌های هیدرولیکی مورد استفاده قرار می‌گیرد. انتخاب سرریز مناسب برای تأمین اهداف احداث سد از اهمیت زیادی برخوردار است. در فرایند انتخاب نوع سرریز باید عوامل اقتصادی، مشخصات طرح، شرایط محل، میزان اطمینان، دقت در برآورد سیل طرح، نوع سد، زمان و تناوب بهره‌برداری و سایر موارد در نظر گرفته شوند. سرریزها باید پاسخگوی نیاز اولیه یعنی انتقال مطلوب و مطمئن سیل طرح و تخلیه‌ی آب به نقطه‌ی مطمئنی در پایاب سد باشند. همچنین گفته شده که شکسته شدن یک‌سوم از سدهای تخریب‌شده، به عدم کفایت سرریزشان برمی‌گردد، به همین خاطر ایمنی سدها ارتباط مستقیم و تنگاتنگی با کفایت سرریزها داشته و بخش قابل توجهی از هزینه‌های مربوط به ساخت سد به آن‌ها اختصاص دارد. به این ترتیب کارشناسان برای اطمینان از ایمنی سدها مجبور به انتخاب سیلاب‌های با دوره بازگشت بالا، به عنوان سیلاب طراحی سرریزها هستند. در صورتی که عرض کانال یا مخزنی که سرریز بر روی آن اجرا می‌شود با توجه به شرایط توپوگرافی محدود باشد، یکی از راهکارهای افزایش ظرفیت، افزایش طول تاج سرریز با زیگزاگ کردن سرریز در پلان می‌باشد؛ که درواقع همان سرریز کنگره‌ای است، معمولاً سرریزهای کنگره‌ای به عنوان گزینه‌ای مناسب برای اصلاح سرریزهایی که برای عبور دبی ماکزیمم محتمل با مشکل روبرو هستند، مطرح می‌شوند. سرریز کنگره‌ای یکی از سرریزهایی

است که با توجه به طول زیاد آن تغییرات ارتفاع آب بالادست نسبت به دبی در آن کمتر می‌باشد و برای استفاده در کانال‌ها و مخازن سدها مناسب است.

از مزایای این نوع سرریزها می‌توان به بالا بودن ظرفیت سرریز، هوادهی آسان جریان و پایین بودن نوسانات سطح آب در آستانه‌ی عبوری جریان از روی سرریز اشاره کرد. ضریب گذردهی سرریز تابعی از ارتفاع کل جریان، ارتفاع سرریز، ضخامت سرریز و شکل پروفیل تاج و... می‌باشد و دبی جریان در سرریزها به‌طور مستقیم متناسب با طول تاج سرریز است.



شکل ۱-۱. سرریز خطی و کنگره‌ای

بنابراین، استفاده از بهینه‌ترین شکل هندسی که بیشترین گذردهی جریان تحت شرایط خاص هیدرولیکی همراه با کاهش هزینه‌ی ساخت را داشته باشد، امری ضروری است. استفاده از سرریزهای کنگره‌ای به دلیل کاهش قابل توجه هزینه‌ها و مشکلات اجرایی در مقایسه با سایر انواع سرریزها، مورد توجه طراحان این گونه سازه‌ها می‌باشد.

تحقیقات متعددی به مسئله‌ی سرریزها، انواع، ساختار و نحوه‌ی طراحی آن‌ها با عناوین مختلف پرداخته است، با این وجود آن‌چنان که پیداست بر روی این نوع از سرریزها مطالعات کمی انجام شده است. همچنین در اغلب این تحقیقات با استفاده از ساخت مدل‌های آزمایشگاهی و بررسی بر روی پارامترهای مختلف سعی در بهبود کارایی این سازه‌ها داشته‌اند و این نتیجه‌ها به مدل‌های واقعی تعمیم داده شده است. استفاده از مدل‌های فیزیکی در آزمایشگاه از لحاظ تأثیر عامل مقیاس محدودیت‌هایی داشته و این اثرگذاری بر نتایج آزمایش هم قابل توجه است. با توجه به پیچیده بودن جریان در مجاورت

این سرریز، برخی از خصوصیات جریان یا قابل اندازه گیری نبوده یا به تجهیزات پیشرفته‌ای نیازمند می‌باشد که به راحتی در اختیار نیست. همچنین مدل سازی‌های آزمایشگاهی دارای هزینه‌های اقتصادی و زمانی بوده‌اند لذا شبیه سازی عددی جریان در اطراف این سازه می‌تواند ابهامات موجود را کاهش دهد. با پیشرفت فناوری و افزایش یافتن قدرت کامپیوترهای امروزی استفاده از روش‌های عددی برای شبیه سازی‌ها توجه بیشتری پیدا کرده است و نرم افزارهای متعددی در این مورد به وجود آمده‌اند که از آن جمله نرم افزار FLOW 3D می‌باشد که مبتنی بر اصول دینامیک سیالات محاسباتی (CFD) طراحی شده است. مدل سازی‌های عددی نسبت به مدل‌های آزمایشگاهی این ترجیح را دارند که سازه‌ها را با همان مقیاس واقعی مدل می‌کنند و در زمان و هزینه‌های اقتصادی هم ارزان تر می‌باشند. با افزایش روند پیشرفت کامپیوترها به نظر می‌رسد استفاده از روش‌های عددی جایگزین مناسبی برای مدل‌های فیزیکی باشد.

از جمله مزایای شبیه سازی عددی کاهش هزینه‌های آزمایشگاهی تعیین اطلاعات جریان در هر نقطه از هندسه جریان، نداشتن محدودیت آزمایشگاهی و از بین رفتن خطاهای آزمایشگاهی، می‌باشد.

۱-۲ سرریزها

برای عبور آب‌های اضافی و سیلاب‌ها از بالادست به پائین دست سدها از سازه‌ای به نام سرریز استفاده می‌شود که یکی از سازه‌های مهم هر سد می‌باشد که این امر مستلزم داشتن سازه‌ای قوی، مطمئن و با کارایی بالاست تا در هر لحظه بتواند قابل استفاده باشد. سرریزها دارای استفاده‌های متعددی هستند که به چند مورد از آن در ادامه اشاره شده است. از جمله موارد استفاده از سرریزها می‌توان به نکات زیر اشاره کرد:

(۱) آب مازاد درون مخزن سد ناشی از سیلاب‌ها که در حجم محدود دریاچه سدهای ذخیره‌ای و تنظیمی جای داده نمی‌شوند، از طریق سرریزها تخلیه می‌گردند. این تخلیه از قسمت فوقانی دریاچه‌ی

سد انجام گرفته و از طریق یک کانال به رودخانه و یا زهکش‌های طبیعی هدایت می‌شود. این کاربرد سرریزها به‌ندرت و فقط در مواقع وقوع سیلاب بوده است.

۲) در سدهای انحرافی، به دلیل آنکه فقط درصدی از آب رودخانه به کانال‌های مجاور بازگردانده می‌شود و همین‌طور محدود بودن ظرفیت ذخیره مخازن، گذردادن جریان‌های مازاد بر ظرفیت انتقال در این‌گونه سدها بر عهده‌ی سرریزها است. این سرریزها به‌صورت دائمی مورد بهره‌برداری قرار می‌گیرند.

۳) به‌منظور بالا آوردن و تثبیت تراز سطح آب در کانال‌ها و رودخانه‌ها

۴) کاهش شدت فرسایش ناشی از جریان‌های آب در رودخانه‌های پرشیب مناطق کوهستانی با احداث سرریزهای متوالی

۱- ۳ بخش‌های اصلی سرریز

به‌طور کلی ساختمان هر سرریز را می‌توان به سه بخش تقسیم کرد:

۱- ۳- ۱ بخش کنترل‌کننده یا تاج

تاج در هر سرریز، قسمتی در بالای دیوار یا بدنه‌ی سرریز است که آب از روی آن جریان می‌یابد. این عضو یکی از مهم‌ترین قسمت‌های یک سرریز محسوب می‌شود. چون بخش کنترل‌کننده‌ی سرریز بوده و تنظیم و کنترل میزان دبی خروجی از مخزن بر عهده‌ی این قسمت هست. این بخش مانع از خروج جریان از مخزن در زمانی که سطح آب در ترازهای پائین قرار دارد می‌شود و اگر سطح آب از سطح مشخصی بالاتر رود، قسمت کنترل‌کننده، جریان خروجی را کنترل خواهد کرد.

۱- ۳- ۲ مجرای تخلیه یا بخش انتقال آب

مجرای تخلیه یا بخش انتقال آب، کانال یا آبراهی است که جریانی که از روی تاج عبور می‌کند را به پائین‌دست سد در بستر رودخانه بریزد. این بخش می‌تواند قسمتی از بدنه‌ی پائین‌دست سد بتنی و یا یک کانال روباز باشد. همین‌طور ممکن است تأسیسات انتقال آب برای تخلیه‌ی جریان یک مجرای بسته

که از زیر یا بدنه سد عبور می‌کند و یا یک تونل که از تکیه‌گاه سد می‌گذرد باشد. همچنین موارد استثنایی مثل ریزش آب از روی تاج سد بتنی قوسی و یا عبور مستقیم آب در طول تکیه‌گاه و ریزش نهایی آن به صورت آبشار نیز می‌تواند مورد استفاده قرار گیرد. کانال تخلیه می‌تواند دارای مقاطع مستطیلی، دوزنقه‌ای، دایره‌ای و یا شکل‌های دیگر باشد. شیب کانال تخلیه آب نیز می‌تواند دارای شیب ملایم و یا تند باشد و همچنین کانال تخلیه عریض، باریک، طویل یا کوتاه باشد.

۱-۳-۳ سازه پایانه یا بخش تخلیه

سقوط جریان از مخزن توسط سرریز به سطح آزاد آب در پائین‌دست، با تبدیل انرژی پتانسیل به انرژی جنبشی همراه است. این انرژی به صورت سرعت زیاد جریان ظاهر می‌شود که آثار مخربی برای پائین‌دست رودخانه دارد و سبب فرسایش بستر رودخانه می‌شود. این سازه‌ها در پائین‌دست سرریزها برای جلوگیری از آثار مخرب در محل مناسب تعبیه می‌شوند. انواع حوضچه‌های آرامش و کاهنده‌های انرژی از جمله این سازه‌ها می‌باشند.

۱-۴-۴ انواع سرریزها

سرریزها را می‌توان از جهات مختلف تقسیم‌بندی نمود. این تقسیم می‌تواند بر اساس سازه‌ی کنترل-کننده و یا مجرای تخلیه باشد. انواع سرریز بر اساس مجهز بودن به دریچه و یا نداشتن دریچه به صورت سرریز کنترل دار و بدون کنترل، تقسیم‌بندی می‌شوند. همچنین می‌توان با توجه به شکل تاج سرریزها را به دو قسمت سرریزهای خطی یا سرریزهای با تاج مستقیم و سرریزهای غیرخطی یا سرریزهای با تاج غیرمستقیم تقسیم‌بندی کرد.

۱-۴-۱ سرریزهای خطی (با تاج مستقیم)

این نوع سرریزها دارای تاج به صورت مستقیم و بدون شکستگی و انحنا در آن هستند. این سرریزها به انواع گوناگون تقسیم می‌شوند که از آن جمله به موارد زیر می‌توان اشاره کرد:

سرریزهای ریزشی آزاد (سقوط) یا لبه تیز

سرریزهای اوجی یا آبریز

سرریزهای جانبی یا سرریزهای با کانال جانبی

سرریزهای شیب‌دار، شوت یا سرسره‌ای

سرریزهای پلکانی

۱-۴-۲ سرریزهای غیرخطی (با تاج غیرمستقیم)

این نوع سرریزها دارای تاجی است که دارای شکستگی یا انحنا بوده و به صورت خط راست نیست. در این نوع سرریزها با افزایش عامل طول، میزان دبی خروجی از سرریز افزایش می‌یابد، از این جمله می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

سرریز نیلوفری

سرریزهای منقاری

سرریز بادبزی

سرریز V شکل

سرریز کنگره‌ای (لابیرنت)

۱-۵ معادله‌ی کلی حاکم بر سرریزها

معادله‌ی حاکم بر ظرفیت دبی عبوری سرریزها به صورت کلی در رابطه‌ی ۱-۱ نشان داده شده است:

$$Q = \frac{2}{3} C_d L_c \sqrt{2g} H_t^{1.5} \quad (1-1)$$

در رابطه‌ی فوق، C_d ضریب گذردهی، Q دبی، L_c طول تاج سرریز، H_t بار هیدرولیکی کل و g شتاب ثقل می‌باشد. به‌طور کلی دبی با سه پارامتر موجود در رابطه فوق نسبت مستقیم دارد. بدین ترتیب برای بالا بردن ظرفیت سرریز دو روش به نظر می‌رسد:

روش اول، کاهش ارتفاع تاج سرریز که باعث پائین آمدن ارتفاع سطح آب مخزن سد می‌گردد و این امر ظرفیت ذخیره‌سازی مخزن را کاهش می‌دهد که مقرون‌به‌صرفه نیست و روش دوم، افزایش طول به‌صورت خطی که با توجه به هندسه‌ی محل ساخت سد در غالب موارد شدنی نیست. افزایش طول سرریز همچنین میزان هزینه‌ی ساخت را نیز افزایش می‌دهد. یک گزینه برای افزایش دبی افزایش طول به‌صورت غیرخطی می‌باشد. طرح سرریز غیرخطی با ثابت نگه‌داشتن ابعاد سرریز، پارامتر طول سرریز را که بر دبی تخلیه‌ی آب بر روی سرریز مؤثر است، افزایش می‌دهد و می‌توان گفت استفاده از این گزینه نسبت به گزینه‌های دیگر به‌صرفه‌تر و با اثرگذاری بهتر همراه است.

ایده‌های مختلفی برای طرح سرریزهای غیرخطی توسط محققین بررسی گشته که از آن جمله طرح

سرریزهای

چندوجهی یا کنگره‌ای بوده است سرریزهای کنگره‌ای از دیوارهای متصل به هم که در پلان معمولاً به‌صورت دوزنقه، مثلث، مستطیل و... دیده می‌شوند تشکیل شده و محور تاج آن‌ها به‌صورت غیرخطی می‌باشد. این نوع سرریزها در یک عرض معین نسبت به سرریزهای با تاج خطی دارای طول بیشتری بوده، تحت ارتفاع تخلیه‌ی معادل دبی بیشتری را از خود عبور می‌دهند. سرریزهای کنگره‌ای به دلیل زیاد بودن دبی عبوری از روی آن‌ها تحت بارهای هیدرولیکی کم و نیاز به‌جا و مکان کمتر نسبت به انواع دیگر، سرریزهایی اقتصادی محسوب می‌شوند و کاربرد آن‌ها از جنبه‌های مختلف روزبه‌روز توسعه یافته است.

۱ - ۶ اهداف پژوهش

امروزه با مشخص شدن معادله‌های حاکم بر جریان سیال‌ها و روش‌های حل عددی این معادله‌ها و پیدایش کامپیوترهای قوی، امکان شبیه‌سازی بسیاری از مسائل فیزیک، وجود دارد.

با توجه به مطالب مطرح شده در قسمت‌های قبلی مهم‌ترین اهداف تحقیق حاضر عبارت‌اند از:

شبیه‌سازی انواع اشکال مختلف سرریز کنگره‌ای، انتخاب درست شرایط مرزی، هندسه‌ی جریان، شبکه‌ی محاسباتی مناسب و مقایسه‌ی آن با حالت آزمایشگاهی و به دست آوردن خطاها.

همچنین در این پژوهش تأثیر هندسه‌های مختلف بر روی ضریب تخلیه‌ی سرریز و کارایی آن‌ها مشخص می‌گردد.

۱ - ۷ مراحل انجام پژوهش

در این تحقیق از نرم‌افزار FLOW 3D که برای حل عددی معادلات حاکم بر جریان سیالات بر مبنای روش حجم محدود به کار می‌رود، استفاده می‌شود. در ابتدا یک مدل عددی مطابق با مدل فیزیکی که توسط Brian Mark Crookston در Utah State University ساخته شده است، ایجاد می‌گردد. این مدل در نرم‌افزار Autocad ساخته شده و به نرم‌افزار FLOW 3D فراخوانی می‌شود سپس با تعریف شبکه‌ی حل و اعمال شرایط مرزی و معرفی فیزیک مدل‌سازی از جمله نوع سیال، انتخاب مدل‌های آشفتنی مناسب و تمهیدات لازم برای تعریف خروجی مناسب در نرم‌افزار، شبیه‌سازی سرریز انجام می‌گیرد و پس از آن نتایج صحت سنجی شده و با نتایج به دست آمده از مطالعه‌ی آزمایشگاهی مقایسه می‌گردد. سپس هدف اصلی پروژه یعنی ساخت هندسه‌های مختلف و مطالعات پارامتریک برای رسیدن به حالت‌هایی با عملکرد بهتر انجام خواهد شد.

۱ - ۸ نحوه تدوین پژوهش

فصل اول - معرفی کلی مسئله.

فصل دوم - مرور معادلات حاکم بر جریان و سابقه پژوهشی و مطالعات انجام شده بر روی سرریز کنگره‌ای.

فصل سوم - مشخصات عددی و نحوه ساختن مدل ، شرایط مرزی، وارد نمودن پارامترهای نرم افزار FLOW 3D و حالت‌های شبیه‌سازی شده.

فصل چهارم - در این فصل، نتیجه‌ها در قالب جدول، نمودار و شکل ارائه گردیده و سپس روابطی ارائه می‌شود و دقت آن مورد ارزیابی قرار می‌گیرد.

فصل پنجم - نتیجه‌گیری کلی از پژوهش حاضر ارائه گردیده و پیشنهادهایی در خصوص پژوهش‌های آینده، مطرح خواهد شد.

فصل دوم

پیشینه‌ی پژوهش

۲-۱ مقدمه

در ابتدا جریان حاکم بر روی سرریزهای کنگره‌ای مورد مطالعه قرار می‌گیرد. در ادامه به معرفی سرریز کنگره‌ای پرداخته و مروری بر پژوهش‌های صورت گرفته بر روی این سرریزها انجام می‌شود.

۲-۲ معرفی روش‌های عددی

حل عددی یک معادله دیفرانسیل، از یک دسته اعداد تشکیل یافته که با استفاده از آن‌ها می‌توان توزیع متغیر وابسته را به دست آورد. به بیان دیگر، راه حل عددی شبیه یک تجربه‌ی آزمایشگاهی است که طی آن قرائت‌هایی از روی دستگاه انجام می‌گیرد و در نتیجه توزیع کمیت‌های اندازه گرفته شده در محدوده‌ی مورد بررسی، برقرار می‌شود. البته حداقل در مقاصد علمی باید تعداد این مقادیر به اندازه‌ی کافی بزرگ باشد. ساختار برنامه‌های CFD که در بخش بعد بیشتر راجع به آن توضیح داده می‌شود، روش عددی بوده و فهم مناسب الگوریتم حل عددی یک مسئله مهم است. سه ایده‌ی ریاضی در مشخص کردن کارایی یا عدم کارایی هر یک از الگوریتم‌ها مفید است که شامل سازگاری، پایداری و همگرایی است. سازگاری را به این صورت می‌توان توصیف کرد که تقریب تفاضل محدود یک معادله دیفرانسیل پاره‌ای در صورتی سازگار است که اگر اندازه‌ی شبکه به سمت صفر میل داده شود، معادله تقریبی به سمت معادله دیفرانسیل پاره‌ای میل کند. پایداری در روش عددی با میرایی خطا همراه است. یک روش عددی در صورتی پایدار است که خطای ناشی از حل معادله تفاضل محدود بزرگ نشود. در تعریف همگرایی نیز می‌توان گفت که یک روش تفاضل محدود در صورتی همگراست که با میل دادن اندازه شبکه به سمت صفر، حل معادله تفاضل محدود و معادله دیفرانسیل پاره‌ای یکسان شود. به طور کل چهار روش حل مجزا برای روش‌های عددی وجود دارد که شامل روش تفاضل محدود، روش المان محدود، روش حجم محدود و روش‌های طیفی هستند.

تفاوت‌های اصلی میان این چهار روش به روشی که در آن متغیرهای جریان تقریب می‌خورند و فرآیند گسسته سازی صورت می‌گیرد، مربوط می‌شود. از میان این چهار روش، دو روش حجم‌های

محدود و المان محدود در بسته‌های نرم‌افزاری کاربرد بیشتری دارند. در روش المان محدود معادلات دیفرانسیل پاره‌ای در مکانیک سیالات و انتقال حرارت به صورت انتگرالی نوشته می‌شوند و برای تبدیل فرم انتگرالی به فرم معادلاتی جبری از توابع پیوسته چند تکه‌ای همجوار (خطی یا درجه دوم) برای تقریب کمیت‌های مجهول استفاده می‌گردد. روش حجم‌های محدود در واقع نوعی از روش المان محدود است که در آن روش تقریب این انتگرال‌ها با روش المان محدود متفاوت است. در ادامه به تفصیل به توضیح این چهار روش پرداخته می‌شود:

۲-۲-۱ روش تفاضل محدود

روش تفاضل محدود یکی از روش‌هایی است که از فرم دیفرانسیلی معادلات استفاده می‌کند. در این روش هر ترم معادله‌ی دیفرانسیل با یک عبارت جبری تقریب زده می‌شود. همچنین فقط در مواردی می‌توان از این شبکه‌بندی با ساختار استفاده کرد که مرزهای محیط دارای شکل هندسی ساده‌ی منظمی باشند. در این روش برای گسسته سازی معادلات از سری تیلور یا برازش یک منحنی برای مقدار تقریبی مشتق و تابع استفاده می‌شود. معادلات جبری به دست آمده با دو روش قابل حل هستند:

- روش صریح
- روش ضمنی

در روش صریح، مقدار پارامتر موردنظر در هر نقطه با استفاده از مقادیر پارامترهای نقاط مجاور آن نقطه که در گام قبلی محاسبه شده‌اند، به دست می‌آید. یعنی در هر گام از محاسبه، تنها یک مجهول در معادله وجود دارد که به راحتی به دست می‌آید. اما در روش ضمنی هر مرحله از محاسبات دارای چندین مجهول است، زیرا پارامتر موردنظر با استفاده از مقادیر نقاط مجاور که مقدار آن‌ها در

گام فعلی به دست می‌آید، تعیین می‌گردد. یعنی در این روش، در هر گام محاسباتی، با حل یک دستگاه معادلات، مقدار پارامتر موردنظر در تمام نقاط به دست می‌آید.

۲-۲-۲ روش المان محدود

روش المان محدود از شکل انتگرالی معادلات استفاده می‌کند. یعنی از معادلات حاکم، بر روی محدوده‌ی موردنظر حل، انتگرال گیری می‌شود. در نتیجه تنها برای گسسته‌سازی ترم‌های مکانی معادلات به کار می‌رود و برای گسسته‌سازی ترم‌های زمانی از روش حجم‌های محدود استفاده می‌گردد. در این روش معادله در یک ضریب وزنی ضرب می‌شود. این ضریب نقش یک تابع درونیابی را دارد که می‌تواند همان تابع شکل باشد. سپس از معادله‌ی به دست آمده روی محیط حل، انتگرال گیری می‌شود. تابع شکل می‌تواند به صورت خطی، درجه دو یا با درجات بالاتر باشد که هرچه این تابع با درجه‌ی بالاتری باشد، دقت حل بیشتر می‌گردد. هرچند که با این کار حجم و زمان محاسبات نیز افزایش می‌یابد. تابع شکل در گره‌ی که تعریف می‌گردد برابر یک بوده و در بقیه‌ی گره‌ها صفر است. پس از به دست آمدن تابع شکل، با ضرب آن در معادلات جریان، انتگرال گیری از روی عبارات انتگرال انجام می‌گیرد. این روش دارای گستردگی زیادی با توجه به شرایط مسئله و نوع المان‌های موردنظر است.

۲-۲-۳ روش حجم محدود

در روش حجم محدود که یکی از حالات ویژه‌ی باقیمانده‌ی وزنی است، درک مستقیم حالت فیزیکی مسئله آسان است. در این روش ابتدا دامنه به تعدادی حجم کنترل غیر پوشان تقسیم شده به نحوی که هر حجم کنترل حول یک نقطه از میدان قرار می‌گیرد و آنگاه از معادله‌ی دیفرانسیل روی حجم کنترل انتگرال گیری شده و معادلات به صورت عددی گسسته‌سازی می‌شوند. ایده‌ی اصلی در این روش گسسته‌سازی، تقریب معادلات دیفرانسیل جزئی در نقاط گسسته نیست، بلکه شرط برقراری، اصل بقاء جرم است. پس از انتگرال گیری بر روی حجم کنترل موردنظر مربوط به هر گره، عبارتی که در معادلات دیفرانسیل مربوطه وجود دارند باید به نحوی گسسته شوند که فرمول

حاصل پایدار و دقیق باشد. قوانین بقای حرکت سیال را می‌توان به یکی از شکل‌های جبری، دیفرانسیلی و یا انتگرالی بیان نمود. برای حل معادلات دیفرانسیلی، همان‌طور که قبلاً تشریح شده، محدوده‌ی حل را شبکه‌بندی نموده و معادلات دیفرانسیلی با کمک روش‌های حجم‌های محدود گسسته سازی شده و روی حجم کنترل موردنظر حل می‌گردد. در روش حجم محدود نیازی به شبکه‌های با سازمان وجود ندارد. همچنین چون معادلات انتگرالی را به‌طور مستقیم در قلمرو فیزیکی به کار می‌بریم، دیگر تبدیل مختصات لازم نیست. در این روش نیز مانند روش المان محدود برای انتقال متغیر از مراکز سلول‌های مجاور به یک گره، روش‌های مختلفی وجود دارد. اما هر کدام از این روش‌ها نیز به‌نوبه‌ی خود دارای پیچیدگی هستند. برای غلبه بر این مشکل می‌توان در هنگام محاسبه فرض کرد که هر حجم کنترل از مجموعه‌ای از چند سلول ریزتر تشکیل شده است. یعنی به بیان دیگر هر چند سلول مثلثی تشکیل یک حجم کنترل چندضلعی را می‌دهند که برای انجام محاسبات از حجم کنترل بزرگ‌تر استفاده می‌گردد. در این روش که معروف به روش رئوس سلول است، متغیر وابسته در رئوس المان محاسبه و لذا آن را رئوس سلول می‌نامند و از معادلات حاکم بر جریان در محدوده‌ی حل، انتگرال گرفته می‌شود.

۲-۲-۴ روش‌های طیفی

روش‌های طیفی از جمله پر دقت‌ترین شیوه‌های عددی برای حل معادلات دیفرانسیل با مشتقات جزئی است. شیوه‌های عددی طیفی را می‌توان بر طبق پایه‌های مورد استفاده در آن‌ها تقسیم‌بندی کرد:

- روش‌های طیفی فوریه
- روش‌های طیفی چبیشف

روش‌های طیفی فوریه برای حل دقیق معادلات دیفرانسیل پاره‌ای تحت دامنه‌های تناوبی در بعد مکان مورد استفاده قرار می‌گیرد. این روش‌ها با تبدیل و انتقال سریع مقادیر گسسته‌ی توابع از فضای فیزیکی مسئله‌ی داده‌شده به فضای فوریه، انجام آسان و سریع پردازش‌های مورد نیاز در

آنجا و سپس تبدیل سریع و معکوس فوریه به فضای فیزیکی اجرا می‌گردد. روش‌های طیفی چبیشف برای حل دقیق معادلات دیفرانسیل پاره‌ای تحت دامنه‌های غیر تناوبی مورد استفاده قرار می‌گیرد. برخلاف روش المان محدود، تقریب‌ها محلی نبوده، اما برای تمامی ناحیه‌های محاسباتی معتبر هستند.

در حالت کلی روش‌های تفاضل محدود برای هندسه‌ها و قلمروهای پیچیده ذاتاً ضعیف هستند و فقط باید از شبکه‌های با سازمان برای حل به وسیله آنها استفاده کرد. اما روش‌های حجم محدود یا المان محدود دارای چنین ضعفی نیستند و قابلیت حل در دامنه‌های پیچیده را افزایش می‌دهند. در ضمن چون در این روش‌ها معادله‌های انتگرالی مستقیماً در قلمروی فیزیکی بکار می‌روند، لذا نیازی به تبدیل‌های ریاضی برای تغییر مختصات (تبدیل فضای فیزیکی به محاسباتی) نمی‌باشد، در حالیکه برای استفاده از روش تفاضل محدود به این مساله زیاد بر می‌خوریم. البته در روش حجم محدود هم از شبکه با سازمان و هم بی سازمان استفاده می‌شود. در هر حال گفتنی است که اگر بتوانیم دامنه‌ی مساله را بصورت شبکه با سازمان در آوریم. روش تفاضل محدود به علت راندمان بهتر آن در مقایسه با روش‌های حجم محدود و المان محدود برتر است.

۲-۳ معادلات حاکم بر جریان

در قرن هیجده و نوزده میلادی، برای توصیف حرکت سیالات به صورت ریاضی کارهای زیادی انجام شد. دانیل برنولی، (۱۷۸۲-۱۷۰۰) معادله مشهور برنولی را به دست آورد و لئونارد اوایلر، (۱۷۸۳-۱۷۰۷) معادلات اوایلر را که قانون بقای مومنتوم و جرم را در سیالات غیر لزج بیان می‌کنند، پیشنهاد و برای اولین بار تئوری پتانسیل سرعت را بیان کرد. کلود ناویر، (۱۸۳۹-۱۷۸۵) و جورج استوکس، (۱۸۱۹-۱۹۰۳) ترم‌های لزجت را به معادله اوایلر اضافه کردند و بدین ترتیب معادله مشهور ناویر-استوکس را ارائه کردند. این معادلات ریاضی دیفرانسیلی که توسط این دانشمندان عرضه شد، در واقع مبنای دینامیک سیالات محاسباتی (CFD) امروزی می‌باشد.

۲- ۳- ۱ دینامیک سیالات محاسباتی

دینامیک سیالات محاسباتی علم پیش‌بینی جریان سیال، انتقال حرارت، انتقال جرم، واکنش‌های شیمیایی و پدیده‌های وابسته به آن به‌وسیله حل معادلات ریاضی، که قوانین فیزیکی را بیان می‌کنند، با استفاده از یک فرآیند عددی است. دینامیک سیالات را می‌توان به سه بخش تقسیم کرد:

• دینامیک سیالات تجربی

• دینامیک سیالات تئوری

• دینامیک سیالات محاسباتی

مهندسی مدرن امروزی در بخش سوم (دینامیک سیالات محاسباتی) عمل می‌کند که به‌سرعت دیگر ابعاد تجربی و تئوری خالص را تکمیل می‌کند. در اصل دینامیک سیالات محاسباتی حل عملی معادلات دقیق حاکم را برای داده‌های مسئله‌ی کاربردی مهندسی تکمیل می‌کند.

دینامیک سیالات محاسباتی عبارت از تحلیل سیستم‌های شامل جریان سیال، انتقال حرارت و پدیده‌های همراه نظیر واکنش‌های شیمیایی بر اساس شبیه‌سازی کامپیوتری است. در حقیقت دینامیک سیالات محاسباتی علم جایگزینی معادلات دیفرانسیل مشتق جزئی حاکم با اعداد و پیشروی این اعداد در مکان و یا زمان برای به دست آوردن یک توصیف عددی نهایی از میدان جریان کامل دلخواه، در مقابل حل تحلیلی در شکل بسته است.

در سال‌های اخیر علم دینامیک سیالات محاسباتی راه خود را در مهندسی هیدرولیک پیدا کرده و شمار زیادی از مشکلات هیدرولیکی با استفاده از دینامیک سیالات محاسباتی (CFD) حل شده است. مدل‌های CFD باهدف بسیار عمومی برای استفاده در مهندسی مکانیک ساخته شده‌اند. امروزه علم دینامیک سیالات محاسباتی (CFD) به‌صورت یک ابزار توانا برای تحلیل جریان سیال و انتقال حرارت در سیستم‌های با هندسه ناموزون و معادلات حاکم پیچیده برای محققان و مهندسان می‌باشد و در

دهه‌ی گذشته پیشرفت چشمگیری داشته است. پیچیدگی معادلات حاکم بر مسئله، تأثیر متقابل فیزیکی مختلف، گذرا بودن اغلب مسائل مهندسی، بالا بودن هزینه‌های مربوط به تجهیزات آزمایشگاهی و محدودیت استفاده از دستگاه‌های اندازه‌گیری در بسیاری از کاربردهای علمی، ازجمله دلایلی هستند که استفاده از روش‌های تحلیلی و آزمایشگاهی را در مقایسه با روش‌های عددی محدود می‌کنند. زمان اولین مدل مدرن ساخته‌شده در دینامیک سیالات محاسباتی به آغاز قرن بیستم، با کار لودویگ پرانتل بازمی‌گردد. وی راهی برای برقراری ارتباط بین روش‌های کاملاً تجربی مهندسی هیدرولیک و روش‌های کاملاً تئوری و ریاضیاتی مکانیک منطقی ایجاد نمود.

دلایل دیگر رشد استفاده از دینامیک سیالات محاسباتی را می‌توان در ارائه‌ی حل تقریبی برای معادلات ناویر-استوکس، کاهش بازه‌ی زمانی برای تغییر پارامترها، طراحی و توسعه‌ی ابزارها، ارزان‌تر بودن نسبت به مدل‌سازی آزمایشگاهی و نیز قابلیت بالای آن برای شبیه‌سازی شرایط جریانی که انجام آن در آزمایشگاه امکان‌پذیر نیست، دانست. حل مسائل سیال در دینامیک سیالات محاسباتی به کمک روش‌های عددی در قالب الگوریتم‌هایی صورت می‌پذیرد و برنامه‌ی (CFD) خوب، شامل تعادل بین حل دقیق و پایداری جواب است. بررسی اعتبار CFD نیازمند اطلاعات بالا در جزئیات مربوط به شرایط مرزی مسئله و حجم بالایی از نتایج است. برای بررسی اعتبار از یک راه معنی‌دار، ضروری است که داده‌های تجربی در یک میدان تشابه به دست آیند.

معادلات حاکم بر جریان سیال بیان‌گر قوانین فیزیکی بقاء به‌صورت عبارات ریاضی می‌باشد که برخی از این قوانین عبارت‌اند از:

* جرم سیال همواره ثابت می‌باشد.

* نرخ تغییر اندازه حرکت با برآیند نیروهای وارد بر ذره سیال برابر است (قانون دوم نیوتن).

معادله بقای جرم (معادله پیوستگی) در حالت دائمی:

برای سیالات تراکم پذیر:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \text{div}(\rho \vec{u}) = 0 \quad (1-2)$$

برای سیالات تراکم ناپذیر:

$$\text{div}(\vec{u}) = 0 \quad (2-2)$$

معادلات بقای مومنتوم (معادلات ناویر-استوکس):

$$\rho \frac{Du}{Dt} = -\frac{\partial p}{\partial t} + \text{div}((\mu \text{ grad } u)) + S_{Mx} \quad (3-2a)$$

$$\rho \frac{Dv}{Dt} = -\frac{\partial p}{\partial t} + \text{div}((\mu \text{ grad } v)) + S_{My} \quad (3-2b)$$

$$\rho \frac{Dw}{Dt} = -\frac{\partial p}{\partial t} + \text{div}((\mu \text{ grad } w)) + S_{Mz} \quad (3-2c)$$

۲ - ۳ - ۲ معادله پیوستگی برای جریان آشفته

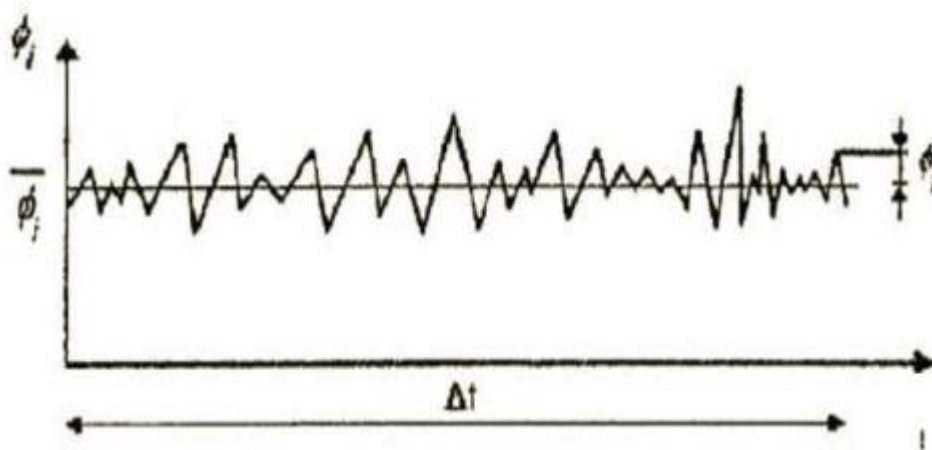
چنانچه مقادیر لحظه‌ای سرعت و فشار یا هر کمیت دیگری مانند φ را به مقدار متوسط

و زمانی مطابق شکل تفکیک کنیم، در این صورت روابط زیر را خواهیم داشت:

$$u(t) = \bar{u} + u'(t) \quad (4-2)$$

$$P(t) = \bar{P} + P'(t) \quad (5-2)$$

$$\varphi(t) = (\bar{\varphi}) + \varphi'(t) \quad (6-2)$$



شکل ۱-۲. تغییرات پارامتر ϕ نسبت به زمان

مقدار متوسط کمیت‌های ذکرشده در روابط بالا، در رابطه‌ی ۷-۲ بیان شده است:

$$\bar{\phi} = \frac{1}{\Delta t} \int_{t_i}^{t_i + \Delta t} \phi dt \quad (۷-۲)$$

در روابط فوق، Δt دوره تناوبی است که نوسانات آشفته‌گی را بیان می‌کند و به اندازه‌ی کافی بزرگ است، ولی در مقایسه با زمان لازم برای جریان غیردائمی کوچک است. با متوسط گیری از روابط پیوستگی و اندازه حرکت، در معادله پیوستگی تغییری ایجاد نشده، ولی در معادله‌ی اندازه حرکت پارامتر $\rho \overline{u'_i u'_j}$ اضافه می‌شود.

برای جریان تراکم پذیر داریم:

$$\text{div}(\rho \vec{U}) = 0 \quad (۸-۲)$$

برای جریان تراکم ناپذیر معادله فوق به صورت زیر درخواهد آمد:

$$\text{div}(\vec{U}) = 0 \quad (۹-۲)$$

۲-۳-۳ معادلات مومنتوم برای جریان آشفته

$$\rho \frac{DU}{Dt} = -\frac{\partial P}{\partial t} + \text{div}(\mu(\text{grad } U)) + \left[-\frac{\partial(\overline{\rho u'^2})}{\partial x} - \frac{\partial(\overline{\rho u'v'})}{\partial y} - \frac{\partial(\overline{\rho u'w'})}{\partial z} \right] + S_{Mx} \quad (10-2a)$$

$$\rho \frac{DV}{Dt} = -\frac{\partial P}{\partial t} + \text{div}(\mu(\text{grad } V)) + \left[-\frac{\partial(\overline{\rho u'v'})}{\partial x} - \frac{\partial(\overline{\rho v'^2})}{\partial y} - \frac{\partial(\overline{\rho v'w'})}{\partial z} \right] + S_{My} \quad (10-2b)$$

$$\rho \frac{DW}{Dt} = -\frac{\partial P}{\partial t} + \text{div}(\mu(\text{grad } W)) + \left[-\frac{\partial(\overline{\rho u'w'})}{\partial x} - \frac{\partial(\overline{\rho v'w'})}{\partial y} - \frac{\partial(\overline{\rho w'^2})}{\partial z} \right] + S_{Mz} \quad (10-2c)$$

پارامترهای بزرگ نوشته شده متوسط گیری شده‌اند و تنها تفاوت معادلات مومنتوم فوق با معادلات مومنتوم با کمیت‌های لحظه‌ای، اضافه شدن عبارت آخر در سمت راست معادله یعنی $\overline{\rho u'_i u'_j}$ می‌باشد. این عبارت را اصطلاحاً تنش آشفتگی یا تنش رینولدز می‌گوییم. تنها تفاوت معادلات جریان آرام با آشفته نیز فقط حضور همین عبارت می‌باشد. به‌طور کلی این عبارت از لحاظ فیزیکی یک تنش نمی‌باشد، بلکه بیانگر اثر تبادل اینرسی (مومنتوم) می‌باشد. فراموش نکنیم که این عبارت از سمت چپ معادله‌ی مومنتوم یعنی جایی که با عبارت‌های اینرسی سروکار داریم به سمت راست منتقل شده است. بنابراین ریشه و بنیان این عبارت از جنس اینرسی مومنتوم می‌باشد. در اثر جریان‌های آشفته، مقدار تنش رینولدز بسیار بیشتر از تنش ناشی از لزجت مولکولی دینامیکی است. تعیین پارامتر تنش رینولدز مشکل است و به همین منظور مدل‌های آشفتگی متفاوتی برای این کار توسعه داده شده‌اند.

۲-۳-۴ تعیین موقعیت سطح آزاد

در تحلیل جریان‌های دارای سطح آزاد، علاوه بر میدان‌های سرعت، فشار و آشفتگی، موقعیت مکانی و زمانی سطح آزاد نیز یکی از مجهول‌های مورد بررسی است و تعیین آن در زمان‌های مختلف از اهمیت خاصی برخوردار است، زیرا در این شبیه‌سازی‌ها، موقعیت و در نتیجه مرزهای سطح آزاد در زمان‌های مختلف تغییر می‌کنند؛ بنابراین برای آن‌که بتوان شرایط مرزی مناسب مربوط به سطح آزاد را اعمال نمود، موقعیت مکانی و زمانی سطح آزاد باید به‌طور کامل و دقیق مشخص گردد. موضوع

مهم در رابطه با روش‌های تقریب سطح آزاد این است که روش‌های تقریب سطح آزاد باید قادر به پیش بینی هرگونه شکلی اعم از افقی، عمودی، چرخی و ریزشی در سطح آزاد به صورت بهینه و مستقل از متغیرهای شرطی باشند. تاکنون روش‌های زیادی برای تعیین موقعیت سطح آزاد در شبیه‌سازی‌های عددی جریان‌های روباز صورت گرفته است. محققین بر اساس دیدگاه‌های مختلف اولیری و لاگرانژی، الگوریتم‌های عددی متفاوتی را ارائه کرده‌اند. این روش‌ها به دودسته‌ی کلی تقسیم‌بندی می‌شوند. دسته‌ی اول به روش‌های فصل مشترک خطی معروف هستند. در این روش‌ها، سطح آزاد به صورت خط یا نشانگرهایی بیان می‌شود که مشخصات این نشانگرها در مدت محاسبه در حافظه ذخیره می‌شود. از این نوع روش‌ها می‌توان به روش تابع ارتفاع که توسط Hirt (1975) ارائه شد و یا روش خطوط نشانه اشاره نمود. ضعف این روش‌ها در توصیف سطوحی است که دارای اشکال پیچیده مثل چرخش و یا ریزش بر روی خود هستند، بنابراین مثلاً شکل شکست موج را نمی‌توانند شبیه‌سازی کنند. روش‌های دیگر به نام روش‌های ناحیه‌ای و یا حجمی معروف هستند. این روش‌ها در تعریف سطوحی که یک مرز آزاد دارند خیلی مناسب هستند. اولین روش از این نوع، روش MAC است که توسط Welch (1966) ارائه شد. در این روش از ذرات نشانه‌گذار بدون جرم برای تعیین موقعیت سطح آزاد استفاده می‌شود. این ذرات نشانه‌گذار همراه با سطح آزاد حرکت می‌کنند و مشخص می‌نمایند که در هر زمان کدام یک از سلول‌های محاسباتی پر، خالی و یا دربرگیرنده‌ی سطح آزاد هستند. مشکلی که در این روش وجود دارد این است که برای تعیین دقیق موقعیت سطح آزاد به خصوص در مورد جریان‌هایی که در آن‌ها سطح آزاد تغییر شکل‌های پیچیده‌ای را تجربه می‌کند، نیاز به تعداد بسیار زیادی از این ذرات نشانه‌گذار است. این امر حافظه‌ی لازم برای ذخیره‌سازی اطلاعات و نیز زمان محاسبات را بسیار افزایش می‌دهد.

از همین نوع، روش دیگری به نام روش حجم سیال (VOF) توسط Nichols و Hirt ارائه گردید که از همان ایده‌ی روش قبل پیروی می‌کرد با این تفاوت که در این روش از کسر اشغال‌شده‌ی سلول

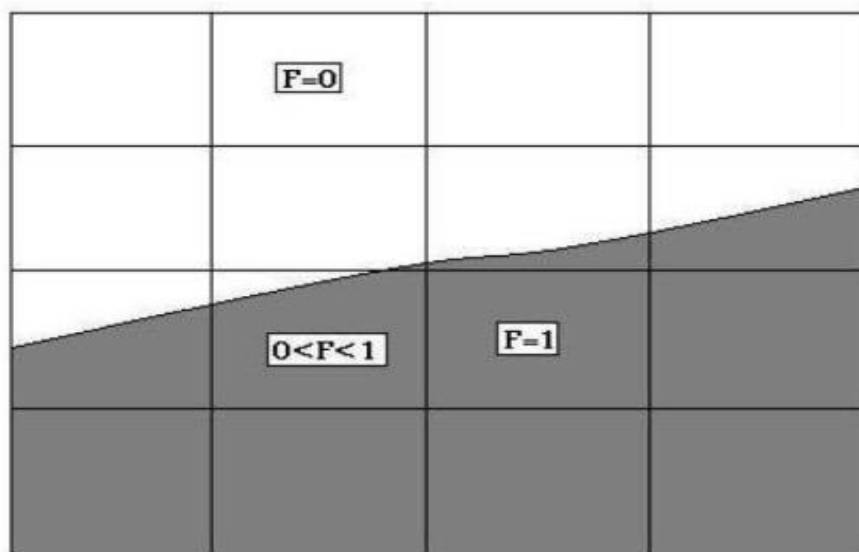
محاسباتی توسط سیال به عنوان عامل مشخص کننده ی سطح آزاد استفاده می شود. این روش امروزه به عنوان یکی از کارآمدترین روش های تحلیل جریان های دارای سطح آزاد، نه تنها در مباحث هیدرولیکی بلکه در مباحث دیگری همچون حرکت مذاب در مهندسی ریخته گری در شبیه سازی های عددی مورد استفاده قرار می گیرد.

۲-۳-۴-۱ روش حجم سیال

در روش حجم سیال (VOF) برای هر درصد حجم سلول یک معادله ی دیفرانسیلی حل می شود که در نهایت مقدار درصد حجم سیال در هر سلول معین می گردد. روش های توسعه یافته بر اساس روش حجم سیال با توجه به دیدگاه اویلری نسبت به میدان جریان، کارایی بیشتری دارند. در تعیین سطح آزاد به روش حجم سیال از یک تابع به نام درصد حجم سیال F استفاده می شود (Volume of fraction) شکل دیفرانسیلی تابع F در حالت سه بعدی در رابطه ی زیر آمده است:

$$\frac{\partial F}{\partial t} + u \frac{\partial F}{\partial x} + v \frac{\partial F}{\partial y} + w \frac{\partial F}{\partial z} = 0 \quad (2-11)$$

در این رابطه u ، v و w به ترتیب مؤلفه های سرعت در جهات x ، y و z هستند. وقتی که جریان دارای سطح آزاد است، تمام سلول ها پر از سیال نیستند و تعدادی از سلول ها که در سطح جریان قرار دارند، نیمه پر هستند. در حل معادله ی فوق در سلولی که پر از سیال باشد، مقدار F برابر یک است و در سلول های خالی از سیال این مقدار برابر صفر است و در سلول های نیمه پر، مقدار F عددی بین صفر و یک است. با دانستن مقادیر F می توان محل سطح آزاد و زاویه آن را در میان سلول های میدان حل مشخص کرد.



شکل ۲-۲. محاسبه تابع حجم سیال در روش VOF

۲-۳-۵ روش FAVOR

روش FAVOR یکی دیگر از فنون جز حجمی است که برای تعیین هندسه به کار می‌رود، همان‌طور که جز حجمی سیال در داخل هر سلول شبکه برای تعیین موقعیت سطح سیال به کار 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. زمانی که در هر سلول حجم اشغال‌شده توسط بدنه‌ی صلب مشخص باشد با روشی مشابه روش F می‌تواند مرز صلب را در داخل شبکه ثابت مشخص کرد.

زمانی که دو روش FAVOR و VOF باهم ترکیب شوند، جز حجمی سیال F به‌عنوان جز خالی سلول (V_f) توسط بدنه‌ی صلب اشغال نشده است، تعریف می‌شود.

۲-۴ معرفی نرم‌افزارهای محاسبات عددی

در راستای استفاده از دینامیک سیالات محاسباتی، چندین نرم‌افزار توسط شرکت‌های نرم‌افزاری با قابلیت حل معادلات مربوط به دینامیک سیالات تولیدشده که هر یک مزایا و معایب مربوط به خود را

دارا هستند. در ادامه به برخی از این نرم‌افزارها اشاره شده و توضیحاتی در مورد آن‌ها ارائه می‌شود. همانطور که گفته شد با پیشرفت روزافزون مسائل مهندسی، پیچیده‌تر شدن مسائل و افزایش هزینه‌ها در بهره‌گیری از نتایج آزمایشگاهی و نیز نیاز به کسب نتایج بهتر، دقیق‌تر و با جزئیات بیشتر از مسائل مورد آزمایش، استفاده از علم دینامیک سیالات محاسباتی رو به افزایش نموده است. از طرفی با توجه به این نکته که دسترسی به جواب‌های دقیق به دلیل پیچیده بودن محاسبات از طریق روش‌های تحلیلی امکان‌پذیر نیست و یا اینکه استفاده از این روش‌ها مستلزم ساده‌سازی بیش‌ازحد مسائل است، روش‌های عددی جواب‌های بهتری در اختیار قرار می‌دهد. برای بهره‌گیری از روش‌های عددی، به دلیل بالا بودن حجم محاسبات، ناگزیر به استفاده از نرم‌افزارهای محاسباتی هستیم. این نرم‌افزارهای محاسباتی، امکان به دست آوردن اطلاعات کامل با جزئیات دقیق‌تر و بیشتری را فراهم می‌کنند. به‌طور مثال به کمک آن‌ها حتی می‌توان مواردی از قبیل تغییرات سرعت، فشار و درجه‌ی حرارت را در کل حوزه‌ی مورد مطالعه به دست آورد. درحالی‌که کسب این نتایج در شرایط آزمایشگاهی امکان‌پذیر نیست.

۲-۴-۱ نرم‌افزار FLUENT

نرم‌افزار FLUENT یکی از مشهورترین نرم‌افزارهای صنعتی برای مدل‌سازی دو و سه‌بعدی مسائل است. این نرم‌افزار بر پایه‌ی روش حجم محدود عمل نموده و قابلیت‌های فراوانی از جمله مدل‌سازی جریان‌های دائم و غیردائم، جریان لزج و غیرلزج، احتراق، جریان مغشوش، حرکت جامد و قطرات مایع در یک‌فاز پیوسته را دارا است. این نرم‌افزار از مدل‌های یک، دو، سه، چهار و هفت معادله‌ای در کنار سایر مدل‌ها در مدل‌سازی جریان آشفته استفاده می‌کند. همچنین امکان استفاده از دو نوع محاسبه‌گر یک دقته (One Precision) و دو دقته (Double Precision) را برای کاربران فراهم می‌کند. در اغلب موارد، محاسبه‌گر یک دقته در حل مسائل از دقت خوبی برخوردار است، اما در برخی از مسائل خاص استفاده از محاسبه‌گر دو دقته مفیدتر خواهد بود. این نرم‌افزار تحلیل جریان با شبکه‌های غیر ساخت‌یافته برای هندسه‌های پیچیده را فراهم می‌سازد. همچنین FLUENT به کاربر اجازه‌ی بهبود

شبکه مثلاً ریزتر کردن و درشت‌تر کردن شبکه در مرزها و مکان‌های لازم در هندسه را می‌دهد. این نرم‌افزار این قابلیت را در اختیار کاربران حرفه‌ای قرار می‌دهد که بتوانند صفحات کاربری را با تعریف توابع و ماکروهای جدید به‌دلخواه تنظیم نمایند. نرم‌افزار FLUENT از مش‌های بی‌سازمان برای کاهش زمانی که برای حل شبکه مصرف می‌شود، بهره می‌برد و نیز مدل‌سازی هندسی و پروسه‌ی تولید مش را ساده می‌کند و می‌توان مدل‌های پیچیده‌تر را نیز در آن پیاده کرد. محیط گرافیکی این نرم‌افزار در نسخه‌های مختلف آن متفاوت بوده، به‌گونه‌ای که در نسخه‌های اولیه‌ی این نرم‌افزار تا حدودی کار در محیط آن مشکل است اما با بهبود محیط گرافیکی آن در نسخه‌های اخیر، کار با این نرم‌افزار و برقراری ارتباط بین استفاده‌کننده و محیط نرم‌افزار آسان‌تر شده است.

۲ - ۴ - ۲ نرم‌افزار ANSYS

این نرم‌افزار در سال ۱۹۷۱ توسط شرکت آمریکایی Swanson به‌عنوان یکی از پیشگامان نرم‌افزارهای اجزا یا المان محدود ساخته شد و مورد استفاده‌ی محققان قرار گرفت و جزء اولین نرم‌افزارهایی است که آنالیزهای غیرخطی، مکانیک شکست، مخازن و سایر آنالیزها را در بسته‌ی نرم‌افزاری خود قرارداد. نرم‌افزار ANSYS یکی از نرم‌افزارهای کاربردی اجزا محدود جهت تحلیل مسائل است. این نرم‌افزار نخست برای تحلیل مسائل سازه‌ای طراحی گردید و سپس برای استفاده در تحلیل مسائل دینامیک سیالات محاسباتی نیز توسعه داده شد. نخستین بسته‌ی نرم‌افزار ANSYS برای تحلیل مسائل مربوط به سیالات با نام تجاری FLOTRAN عرضه گردید. این نرم‌افزار قابلیت مدل نمودن مسائل استاتیک و دینامیک سازه‌ای، انتقال حرارت و مسائل مربوط به سیالات را دارد. به‌علاوه ANSYS می‌تواند مسائل مربوط به آکوستیک و الکترومغناطیس را نیز در نظر بگیرد.

۳ - ۴ - ۲ نرم‌افزار ANSYS-CFX

نرم‌افزار ANSYS-CFX شکل توسعه‌یافته و پیشرفته‌ی بسته‌ی نرم‌افزاری ANSYS بوده که توانایی تحلیل مسائل دینامیک سیالات محاسباتی در آن وارد شده است. این نرم‌افزار ابتدا با نام CFD-FLOW

3D توسط شرکت UKAEA عرضه شد، سپس تغییر نام یافت و در نهایت در سال 2003 توسط شرکت نرم‌افزاری ANSYS خریداری گردید. از توانایی‌های این نرم‌افزار می‌توان به کارایی آن روی شبکه‌های مرکب از المان‌های چهاروجهی، شش‌وجهی، منشوری و یا هرمی اشاره کرد. این نرم‌افزار قابلیت تحلیل جریان آرام و آشسته، سیالات تراکم پذیر و تراکم ناپذیر، سیالات نیوتنی و غیر نیوتنی (سیالی که از یک رابطه‌ی خطی بین تنش برشی و کرنش برشی پیروی نمی‌کند) و جریان با سطح آزاد را دارد و در زمینه‌های گوناگون نظیر هوا-فضا، مهندسی عمران، مهندسی محیط‌زیست، مسائل دریایی نیز کاربرد دارد. نرم‌افزار ANSYS-CFX یک نرم‌افزار باهدف عمومی دینامیک سیالات محاسباتی است که یک حل‌گر پیشرفته را باقابلیت‌های پیش و پس‌پردازشگر قدرتمند ترکیب کرده و توانایی مدل کردن مواردی از قبیل جریان‌های پایدار و ناپایدار، جریان‌های آرام و آشسته، جریان‌های مادون صوت، در حد صوت و مافوق صوت، نیروی شناوری، جریان‌های غیر نیوتنی، انتقال مؤلفه‌های اسکالر فاقد عکس‌العمل، جریان‌های چند فازی، مسائل احتراق را دارا است. ANSYS-CFX شامل چهار مدل نرم‌افزاری است که یک هندسه و یک شبکه‌بندی را دریافت نموده و اطلاعات موردنیاز را برای انجام یک تحلیل CFD انتقال می‌دهد.

۲-۴-۴ نرم‌افزار FLOW 3D

FLOW 3D که در کد نویسی عددی موفقیت چشم‌گیری داشته است. نرم‌افزاری قوی در زمینه‌ی مکانیک سیالات می‌باشد که تولید، توسعه و پشتیبانی آن توسط شرکت Flow Science Inc صورت گرفته است. این نرم‌افزار همان‌طور که از نام تجاری آن پیداست، جریان‌های سه‌بعدی را به خوبی مدل‌سازی کرده و در تحلیل مسائل جریان‌های با سطح آزاد قابلیت ویژه‌ای دارد. نرم‌افزار FLOW 3D نیز همانند نرم‌افزار FLUENT از روش حجم محدود در محاسبات خود در شبکه‌بندی منظم مستطیلی بهره می‌گیرد. شاید این نوع شبکه در نگاه اول به‌عنوان یک محدودیت مطرح شود در صورتی‌که اولاً به دلیل تولید آسان این نوع شبکه نظم مناسب و نیاز به حافظه کمتر در آن و ثانیاً به دلیل

به کارگیری دو ابزار مفید VOF و FAVOR در مدل FLOW 3D شبکه حل به فرم مذکور یک مزیت خواهد بود. این بهینه سازی برای حل و شبکه، قابلیت در اختیار کاربر قرار می دهد که نتایج را در ناحیه هایی که دارای گردابه های بزرگ (مانند لایه ی مرزی و ...) باشند، دقیق تر سازد. این قابلیت ها مدت زمانی را که برای تولید یک شبکه ی خوب احتیاج می باشد در مقایسه با حل در شبکه های ساخت یافته به صورت قابل ملاحظه ای کاهش می دهد.

این نرم افزار از چندین مدل آشفتگی چون مدل پرانتل، مدل یک معادله ای مانند k و مدل چند معادله ای مانند $k-\varepsilon$ RNG، $k-\varepsilon$ و LES استفاده می کند. این نرم افزار ابزار مدل سازی توانمندی است که دید مهندسی با ارزشی را درباره ی بسیاری از فرآیندهای فیزیکی جریان در اختیار ما قرار می دهد. علاوه بر قابلیت های ویژه برای پیشگویی دقیق جریان های با سطح آزاد، FLOW 3D نرم افزاری ایده آل برای استفاده در طراحی و در فرآیندهای بهینه سازی تولید است.

۲- ۵ معادلات آشفتگی

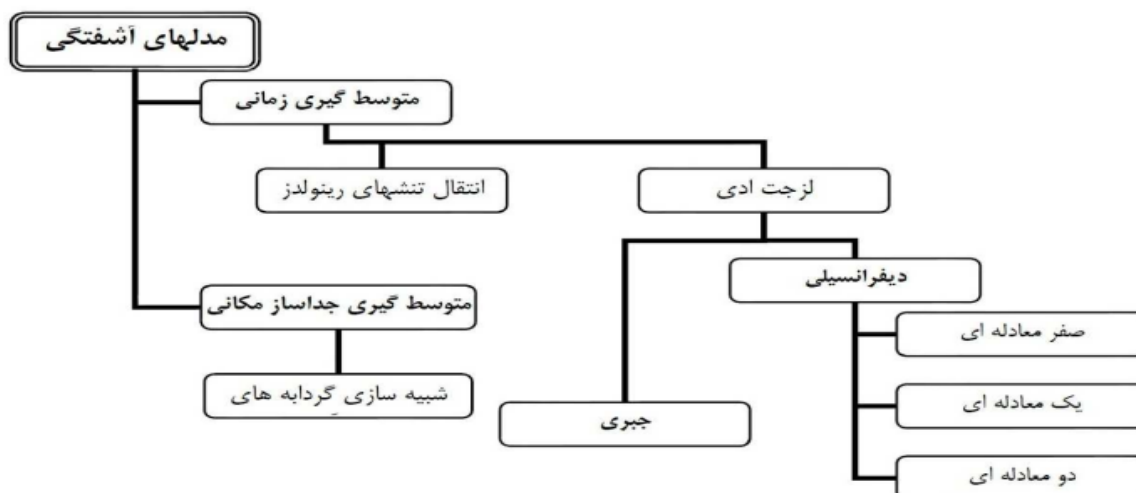
هنگامی که یک نیروی خارجی مثل یک گرادیان فشار به سیالی که با سرعت متوسط V در حرکت است، وارد می شود؛ باعث افزایش سرعت و در نتیجه تغییر اندازه حرکت ذرات سیال می گردد. در اثر این افزایش مومنوم که توسط نیروی اینرسی خارجی ایجاد شده است، ذرات سیال که به صورت موازی در جهت جریان متوسط حرکت می کنند، مسیر حرکت خود را در جهت عمود بر این جهت تغییر می دهند و از لایه ای به لایه ی دیگر می روند. این حرکت تصادفی ذرات سیال باعث تغییر شکل های برشی و چرخشی و تشکیل چرخابه ها در جریان می شود.

در حالت کلی تلاطم یا اغتشاش حرکت سیال، به شرایط غیرمنظم جریان گفته می شود که در آن مقادیر پارامترهایی مانند سرعت، فشار، غلظت، دما و غیره به صورت تصادفی نسبت به زمان و مکان تغییر می کند.

همچنین تلاطم را می‌توان به صورت دیگری نیز تعریف کرد و آن عبارت است از حرکت گرداب با طیف وسیعی از اندازه گرداب و متعاقباً تکرار نوسانات آن. حرکت گرداب همیشه به صورت چرخشی است. معمولاً برای تعیین شکل گردابه‌های بزرگ (نوسانات با فرکانس کم) از اثر لزجت صرف نظر و برای گردابه‌های کوچک‌تر (نوسانات با فرکانس بزرگ) از نیروهای لزجت استفاده می‌شود. منشأ اولیه تلاطم جریان ناشی از ناپایداری در جریان می‌باشد و معمولاً مرتبط با عدد رینولدز است.

به منظور حل میدان جریان متلاطم، نیاز است تا تنش‌های رینولدز در معادلات به روش خاصی مدل شوند. در این صورت در حالت جریان سه‌بعدی با وجود چهار معادله (یک پیوستگی و سه مومنوم) چهار مجهول میدان جریان (سرعت‌ها در جهت x ، جهت y ، جهت z و فشار) معین می‌شوند. جهت بیان تنش‌های رینولدز و یا به عبارت بهتر، بستن سیستم معادلات فوق از مدل‌های آشفتگی استفاده می‌شود. به همین منظور مدل‌های تلاطم مختلف با میزان پیچیدگی و توانایی متفاوت ارائه شده است.

در شکل ۲-۳ یک تقسیم‌بندی کلی از مهم‌ترین مدل‌های آشفتگی ارائه می‌شود. در گروه اول این تقسیم‌بندی که به مدل‌های متوسط گیری شده‌ی زمانی معروف هستند، اساس کار بر مبنای متوسط گیری معادلات ناویر-استوکس در زمان و محاسبه‌ی تنش‌های رینولدز است. این مدل‌ها به دودسته مدل‌های لزجت گردابه‌ای و مدل‌های انتقال تنش رینولدز تقسیم‌بندی می‌شوند. در دسته‌ی اول تانسور تنش رینولدز بر اساس گرادیان سرعت متوسط بیان می‌شود؛ اما در مدل‌های انتقال تنش‌های رینولدز به جای استفاده از مفهوم لزجت گردابه‌ای، معادلات کامل انتقال تنش‌های رینولدز بسط داده و تحلیل می‌گردند. در گروه دوم در تقسیم‌بندی کلی که به متوسط‌گیری جداساز مکانی معروف هستند، میانگین‌گیری بر روی مکان انجام می‌گیرد که به میانگین‌گیری مکانی فیلتر کردن نیز می‌گویند.



شکل ۲-۳. مدل های آشفتگی

شبیه سازی آشفتگی در FLOW 3D با استفاده از یکی از شش مدل آشفتگی مورد استفاده توسط این نرم افزار صورت می گیرد. همان طور که پیش از این ذکر شد مدل های آشفتگی مورد استفاده توسط FLOW 3D عبارت اند از: طول اختلاط پранتل، یک معادله ای انرژی جنبشی آشفتگی، مدل دو معادله ای $k-\epsilon$ ، مدل دو معادله ای $k-\omega$ ، مدل گروه های نرمال شده $(k-\epsilon \text{ RNG})$ و مدل شبیه سازی گردابه های بزرگ.

۲-۵-۱ مدل طول اختلاط پранتل

مدل طول اختلاط پранتل یک مدل تلاطم صفر معادله ای می باشد. مدل های صفر معادله ای ساده ترین مدل آشفتگی می باشد که از ایده بوزینسک در محاسبه تنش رینولدز استفاده می کند. در این مدل ها هیچ گونه معادله دیفرانسیلی برای کمیت های آشفتگی ارائه نمی شود. این مدل ها نسبتاً ساده بوده و داده های تجربی و آزمایشگاهی در آن ها نقش اساسی داشته و تنش های آشفتگی در هر جهت متناسب با گرادیان سرعت می باشد. مدل پранتل به فرضیه طول آمیختگی نیز معروف است. این مدل به صورت زیر می باشد.

$$\mu_t = \rho l_m^2 \left(\frac{\partial u}{\partial y} \right) \quad (2-12)$$

که در آن lm طول آمیزشی است و به کمک اطلاعات تجربی به طریق جبری مشخص می‌شود.

۲-۵-۲ یک معادله‌ای انرژی جنبشی آشفتگی

مدل یک معادله‌ای، شامل یک معادله انتقال برای انرژی جنبشی تلاطم (k) است. این معادله انتقال شامل عبارت‌های جابه‌جایی و پخش انرژی جنبشی آشفتگی است. همچنین مدل شامل تولید انرژی جنبشی آشفتگی در اثر برش و شناوری و پخش و اتلاف آن در اثر افت‌های لزجت در بین گردابه‌ها است. تولید شناوری زمانی اتفاق می‌افتد که دانسیته غیریکنواخت در جریان وجود داشته باشد و شامل شتاب‌های غیر اینرسی و گرانش است.

در این مدل‌ها یک رابطه‌ی دیفرانسیلی برحسب کمیت آشفتگی k مورد استفاده قرار می‌گیرد. k عبارت است از انرژی جنبشی آشفتگی که به صورت رابطه‌ی زیر تعریف می‌شود:

$$k = \frac{1}{2}(\overline{u_1'^2} + \overline{u_2'^2} + \overline{u_3'^2}) \quad (۱۳-۲)$$

۲-۵-۳ مدل دو معادله‌ای $k-\epsilon$

$k-\epsilon$ معروف‌ترین مدل دو معادله‌ای می‌باشد زیرا درک آن آسان‌تر و استفاده از آن در برنامه‌نویسی ساده‌تر می‌باشد. مدل استاندارد در اعداد رینولدز بالا بیشتر مورد استفاده قرار می‌گیرد و چنین فرض می‌شود که جریان کاملاً متلاطم بوده و اثر لزجت مولکولی بسیار ناچیز است، در مدل‌های ویسکوزیته ادی $k-\epsilon$ ، میدان آشفتگی برحسب دو متغیر بیان می‌شود:

الف) انرژی جنبشی جریان آشفته k

$$k = \frac{1}{2}(\overline{u_1'^2} + \overline{u_2'^2} + \overline{u_3'^2}) \quad (۱۴-۲)$$

^۱ Turbulent Kinetic Energy

ب) نرخ اضمحلال ویسکوز انرژی جنبشی آشفته^۱ ε

$$\varepsilon = 2 \nu \overline{e'_{ij} \cdot e'_{ij}} \quad (۱۵-۲)$$

در مدل استاندارد $k - \varepsilon$ مقادیر k و ε توسط معادله‌های نیمه تجربی زیر به دست می‌آیند.

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \text{div}(\rho k U) = \text{div} \left[\frac{\mu_t}{\sigma_k} \text{grad } k \right] + 2\mu_t E_{ij} \cdot E_{ij} - \rho \varepsilon \quad (۱۶-۲)$$

$$\frac{\partial(\rho \varepsilon)}{\partial t} + \text{div}(\rho \varepsilon U) = \text{div} \left[\frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \text{grad } \varepsilon \right] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} 2\mu_t E_{ij} \cdot E_{ij} - C_{2\varepsilon} \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (۱۷-۲)$$

$$\mu_t = C_\mu \rho \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (۱۸-۲)$$

که ضرایب تجربی موجود عبارت‌اند از:

جدول ۱-۲. ضرایب تجربی معادله k و ε

C_μ	$C_{1\varepsilon}$	$C_{2\varepsilon}$	σ_ε	σ_k
۰٫۰۹	۱٫۴۴	۱٫۹۲	۱٫۳	۱

این مدل به‌خصوص می‌تواند در جریان‌های محصور که در آن‌ها تنش‌های برشی بسیار با اهمیت است نیز مورد استفاده قرار گیرد.

در بخش عمده از جریان‌ها، نرخ تولید انرژی جنبشی آشفته‌گی بسیار کمتر از نرخ اضمحلال آن است و برای غلبه بر چنین مشکلی نیازمند تنظیمات بسیار ماهرانه و کارشناسی شده بر روی ثوابت C هستیم.

^۱ Viscous Dissipation Rate of Turbulent Kinetic Energy

۲-۵-۳ برخی از مشخصات مدل استاندارد $k-\epsilon$

۱- سرعت آشفتگی و طول مشخصه به‌طور جداگانه محاسبه می‌گردد.

۲- توانایی، اقتصادی و دقت بالا در شبیه‌سازی جریان‌های صنعتی و انتقال حرارت

۳- در این مدل از عدد پرانتل ثابت استفاده می‌شود.

برخلاف بسیاری از موفقیت‌های مدل استاندارد $k-\epsilon$ ، این مدل دارای جواب‌های نه‌چندان قوی در

بحث جریان‌های غیر محصور است.

برخی از این‌گونه نقایص در:

مدل‌سازی لایه‌های برشی ضعیف

مدل‌سازی جریان‌های پیچشی، جریان‌های با کرنش‌های بسیار بزرگ و سریع، لایه‌های مرزی دارای

انحنای بسیار و مسیرهای واگرا، جریان‌های دورانی و چرخشی.

جریان ثانویه در کانال‌های با طول زیاد و مقاطع غیر دایره‌ای.

جریان‌های کاملاً توسعه‌یافته در کانال‌های با مقاطع غیردایره‌ای می‌باشد.

با شناخته شدن نقاط ضعف و قدرت مدل $k-\epsilon$ ، بهینه‌سازی‌هایی بر روی این مدل به‌منظور بهبود

کارایی آن صورت گرفته است که به ظهور نسل‌های جدید از مدل $k-\epsilon$ منجر گردید.

۲-۵-۴ مدل متلاطم RNG $k-\epsilon$

یکی از شکل‌های روش $k-\epsilon$ معروف به RNG می‌باشد که به‌منظور مدل کردن حرکت در مقیاس‌های

کوچک‌تر و تأثیرات آن‌ها به‌وسیله نرمال‌سازی مجدد معادلات ناویرستوکس گسترش داده شده است. در

مدل استاندارد $k-\epsilon$ لزجت گردابی به‌وسیله‌ی یک مقیاس طول آشفتگی منفرد تعیین می‌شود، بنابراین

پخش آشفتگی محاسبه‌شده تنها در مقیاس‌های مخصوصی اتفاق می‌افتد. درحالی‌که در واقعیت، همه

مقیاس‌های حرکت در پخش آشفتگی شرکت دارند. روش RNG یک ابزار ریاضی برای استخراج مدل آشفتگی شبیه به مدل k-ε است که منجر به یک قالب اصلاح‌شده از معادلات ε می‌شود در این مدل، یک ترم اضافی در معادله‌ی ε وارد می‌شود که باعث افزایش دقت محاسباتی در جریان کرنشی می‌گردد. این مدل نسبت به مدل استاندارد، در جریان چرخشی کارایی بیشتری دارد و برخلاف مدل استاندارد جهت تعیین اعداد آشفتگی پراپرتی، از رابطه‌ی تحلیلی استفاده می‌کند. مدل RNG در اعداد رینولدز پایین، دقت مناسبی دارد و در تعیین مقادیر آشفتگی جریان در میدان‌های دارای انحنا یا پیچیدگی هندسی مورد توجه بیشتر است. معادلات حاکم بر آن به صورت روابط زیر هستند:

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \text{div}(\rho k U) = \text{div}[\alpha_k \mu_{eff} \text{grad } k] + 2\mu_t E_{ij} \cdot E_{ij} - \rho \varepsilon \quad (19-2)$$

$$\frac{\partial(\rho \varepsilon)}{\partial t} + \text{div}(\rho \varepsilon U) = \text{div}[\alpha_\varepsilon \mu_{eff} \text{grad } \varepsilon] + C_{1\varepsilon}^* \frac{\varepsilon}{k} 2\mu_t E_{ij} \cdot E_{ij} - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (20-2)$$

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (21-2)$$

$$\eta = (\sqrt{2E_{ij} \cdot E_{ij}}) \frac{k}{\varepsilon} \quad (22-2)$$

$$C_{1\varepsilon}^* = C_{1\varepsilon} - \frac{\eta(1 - \frac{\eta}{\eta_0})}{1 + \beta\eta^3} \quad (23-2)$$

$$\beta = 0.012$$

$$\mu_{eff} = \mu + \mu_t$$

در روابط بالا، μ_{eff} لزجت گردابه‌ای مؤثر است. α_k و α_ε مقادیر معکوس عدد پراپرتی آشفتگی هستند. عبارت اضافه شده به معادله‌ی ε در مدل RNG نسبت به مدل حالت استاندارد باعث اصلاح این معادله در نواحی که نرخ کرنش زیاد می‌باشد، شده است.

جدول ۲-۲. ضرایب تجربی روش RNG معادله k و ε

C_μ	$C_{1\varepsilon}$	$C_{2\varepsilon}$	$\alpha_\varepsilon = \alpha_k$	η_0
۰,۰۹	۱,۴۴	۱,۹۲	۱,۴۲	۴,۳۷۷

۲-۵-۵ مدل دو معادله‌ای k-ω

مدل k-ω چندین سال است که مورد استفاده قرار می‌گیرد و دارای دو مدل استاندارد و SST می‌باشد. دو رابطه‌ی اضافی تولید شده k و ω برای مدل‌سازی پیش‌بینی تنش‌های آزاد جریان توسعه یافته‌اند. انرژی جنبشی آشفته k و نرخ استهلاک انرژی ویژه ω از معادله‌های انتقال زیر به دست می‌آیند:

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho k u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\mathcal{T}_K \frac{\partial k}{\partial x_j} + G_K + Y_K + S_K \right) \quad (2-24)$$

$$\frac{\partial(\rho \omega)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \omega u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\mathcal{T}_\omega \frac{\partial \omega}{\partial x_j} + G_\omega + Y_\omega + S_\omega \right) \quad (2-25)$$

که در این معادله، G_K نشان‌دهنده تولید انرژی جنبشی آشفته ناشی از گرادیان متوسط سرعت می‌باشد. G_ω نشان‌دهنده تولید ω می‌باشد. $\mathcal{T}_K$ و $\mathcal{T}_\omega$ نشان‌دهنده پخشیدگی K و ω می‌باشد. Y_K و Y_ω نشان‌دهنده اتلاف مقدار K و ω ناشی از تلاطم است که در اتلاف مؤثر از رابطه‌ی زیر به دست می‌آید:

$$\mathcal{T}_K = \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_K} \quad (2-26)$$

$$\mathcal{T}_\omega = \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\omega} \quad (2-27)$$

که در این معادلات σ_k و σ_ω نشان‌دهنده‌ی اعداد پرانتل برای k و ω می‌باشد.

۲-۵-۶ مدل شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ

ایده‌ی اساسی این مدل این است که تمام ساختارهای تلاطم که قابل‌محاسبه با استفاده از شبکه محاسباتی هستند، به‌طور مستقیم محاسبه شوند و فقط ساختارهای ریزی که قابل‌محاسبه نیستند تقریب زده شوند.

زمانی که از مدل LES استفاده می‌شود باید دقت کرد که این مدل سه‌بعدی است. نوسانات باید مقداردهی اولیه شوند و یا در مرزهای ورودی تعریف شوند. اگرچه این عمل نیازمند تلاش بسیار بوده و نیازمند هزینه محاسباتی بالا است ولی نتایجی که تولید می‌شود دارای جزئیات بیشتری نسبت به مدل‌های بر پایه متوسط‌گیری رینولدز است.

برخلاف معادلات RANS که میانگین‌گیری از متغیرها را بر روی زمان انجام می‌دهد، در روش شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ میانگین‌گیری بر روی مکان انجام می‌گیرد و همانطور که گفته شد به میانگین‌گیری مکانی فیلتر کردن می‌گویند؛ بنابراین مبنای فرمول‌بندی روش LES استفاده از روابط فیلترگیری جهت فیلتر نمودن معادلات حاکم می‌باشد.

به‌طور کلی در جریان سه‌بعدی، شش مؤلفه‌ی تنش رینولدز وجود دارد و مدل آشفتگی کامل، مدلی است که هر کدام از تنش‌های معادله‌ی انتقال آن را معرفی می‌نماید. حل این معادلات با پیشرفته‌ترین روش‌های عددی و کامپیوترهای مدرن امروزی هنوز مقرون‌به‌صرفه نیست. بدین منظور برای ساده‌سازی معادلات، از جایگزینی عبارات جبری به‌جای ترم دیفرانسیل جزئی بهره گرفته می‌شود که حل آن‌ها به زمان محاسباتی کمتری نیاز دارد.

۲- ۶ پارامترهای موثر

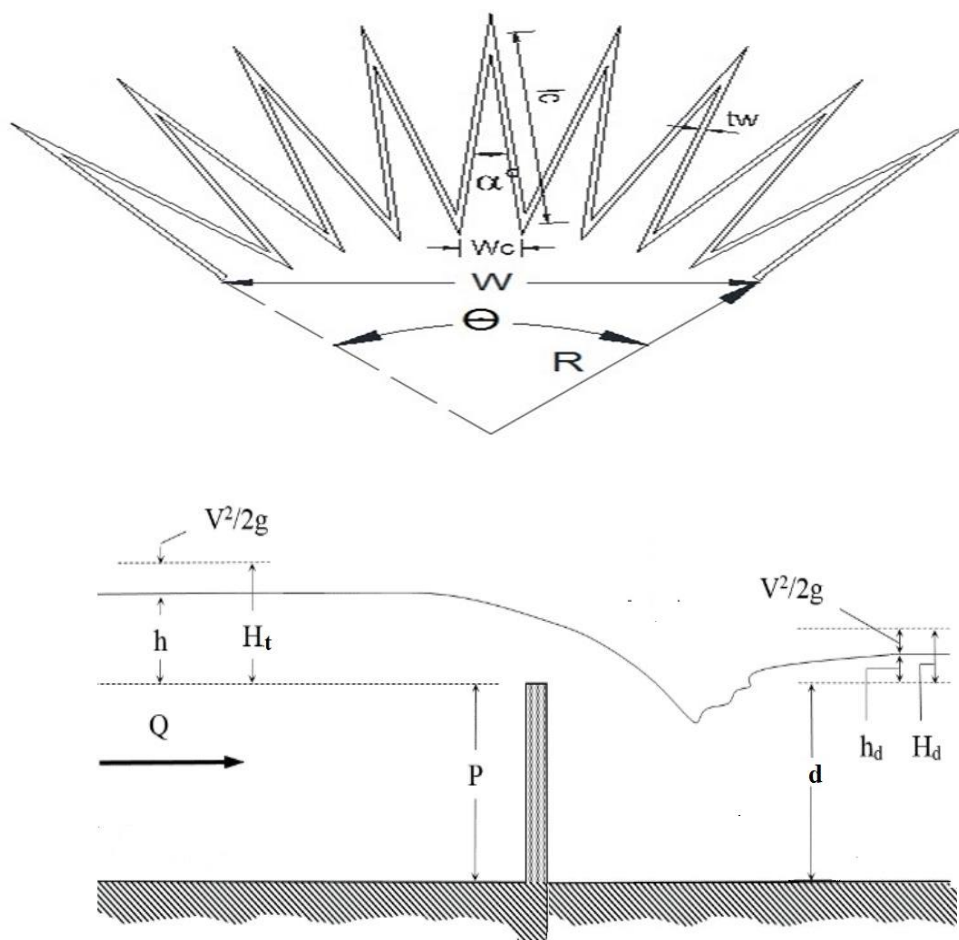
از آن جایی که در این تحقیق چهار نوع از هندسه‌های مختلف سرریز کنگره‌ای مورد بررسی قرار گرفته است، پارامترهای موثر هر کدام به صورت جداگانه مطرح می‌گردد.

۲- ۶- ۱ سرریز کنگره‌ای مثلثی

شکل ۲-۴ یک سرریز مثلثی انحنادار را نشان می‌دهد. زاویه‌ی انحنای قوس (Θ) و شعاع قوس (R) از جمله پارامترهای خاص سرریز قوسی هستند که در این شکل نمایش داده شده‌اند. پارامترهای مؤثر روی دبی سرریزهای مثلثی، به صورت رابطه‌ی ۲-۲۸ به دست می‌آید:

$$f(P, d, \frac{H_t}{P}, H_d, t_w, W, w_c, S_0, \rho, \mu, R, \sigma, S_e, l_c, N, \Theta, g, \alpha) = 0 \quad (2-28)$$

که P اختلاف ارتفاع تاج سرریز از بستر بالادست، d اختلاف ارتفاع تاج سرریز از بستر پایین‌دست، H_t هد کل جریان در بالادست سرریز که برابر با $h + \frac{V^2}{2g}$ است، H_d هد کل جریان در پایین‌دست سرریز، t_w ضخامت سرریز، W عرض سرریز، w_c عرض سیکل، S_0 شیب کف، ρ جرم مخصوص سیال، μ لزجت دینامیکی سیال، σ ضریب کشش سطحی سیال، S_e فاکتور تعیین‌کننده‌ی شکل مقطع تاج که می‌تواند به صورت لبه تیز، تخت، ربع دایره‌ای با شعاع‌های کوچک تا بزرگ، نیم‌دایره‌ای و اوجی باشد، l_c طول یک ضلع سیکل سرریز قوسی، N تعداد سیکل‌های سرریز، Θ زاویه‌ی انحنای قوس، g شتاب ثقل و α زاویه‌ی راس سیکل سرریز مثلثی می‌باشد.



شکل ۴-۲. پلان و مقطع طولی سرریز مثلثی انحنادار

با توجه به تراکم ناپذیری جریان در سرریزها، می‌توان از تأثیر تغییر جرم مخصوص (ρ) در گذردهی سرریز صرف‌نظر نمود. با ثابت بودن شتاب ثقل g نیز از معادله حذف می‌گردد. چنانچه جریان در محدوده‌ی آشفته و عمق جریان بر روی سرریز بنا به توصیه‌ی انجمن مهندسين عمران آمریکا (۲۰۰۰) از ۲٫۵ سانتی‌متر کمتر نباشد، می‌توان از اثر نیروی لزجت و کشش سطحی چشم‌پوشی کرد.

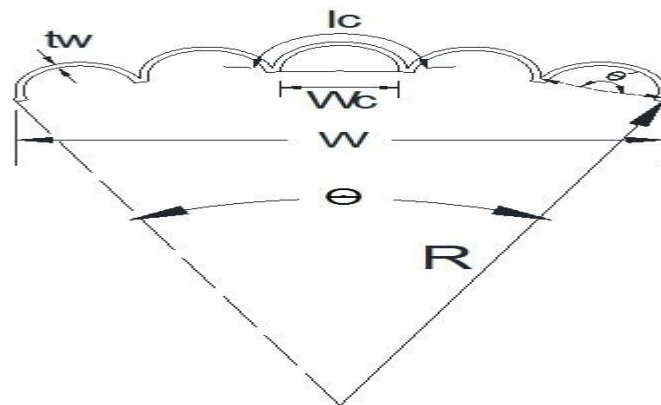
با در نظر گرفتن این موضوع که تعداد سیکل‌ها، شیب کف و شکل تاج ثابت بوده، پارامترهای N ، S_0 و S_e نیز قابل صرف‌نظر کردن می‌باشند. سرریزها در تمامی مدل‌ها به‌صورت آزاد عمل کرده و در نتیجه پارامتر H_d از معادله‌ی ۲-۲۸ حذف می‌گردد. همچنین با توجه به اینکه عرض سرریز، ارتفاع و ضخامت

سرریزها ثابت و نیز ارتفاع سرریز در بالادست و پایین‌دست برابر بودند، پارامترهای d, t_w, P, W هم از معادله‌ی ۲-۲۸ حذف شده و رابطه‌ی ساده‌شده‌ی ۲-۲۹ به دست می‌آید:

$$C_d = f\left(\frac{H_t}{P}, \theta, R, lc, w_c, \alpha\right) \quad (2-29)$$

۲-۶-۲ سرریز کنگره‌ای دایره‌ای

پارامترهای مؤثر بر ضریب دبی جریان در سرریزهای کنگره‌ای دایره‌ای شکل را می‌توان به صورت رابطه‌ی تابعی ۲-۳۰ نوشت:



شکل ۲-۵. پلان سرریز کنگره‌ای دایره‌ای انحنادار

$$f\left(P, d, \frac{H_t}{P}, H_d, t_w, W, w_c, S_0, \rho, \mu, R, \sigma, S_e, lc, N, \theta, g, \theta'\right) = 0 \quad (2-30)$$

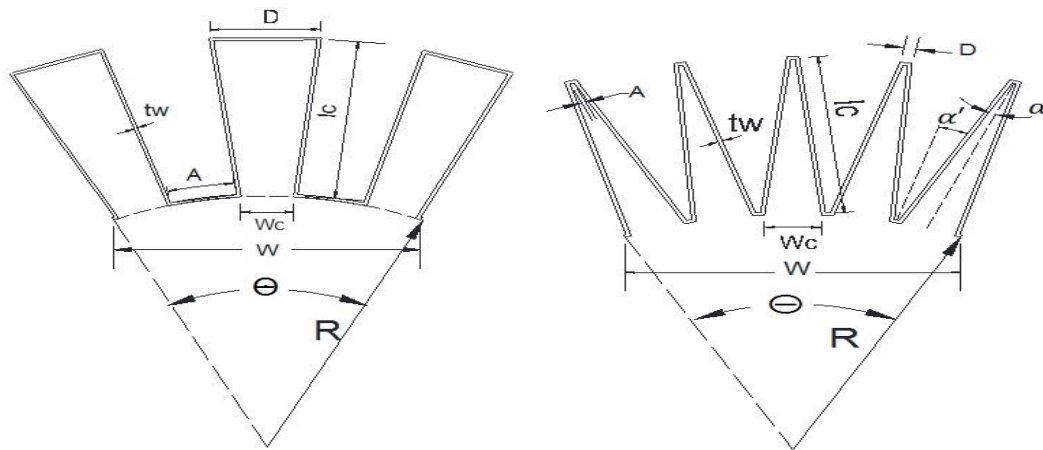
که در این رابطه θ' زاویه‌ی کمانی از دایره در هر سیکل می‌باشد و با حذف پارامترهای ثابت از جمله زاویه انحنای قوس (θ)، شعاع قوس (R)، عرض سیکل (w_c) و... رابطه‌ی ۲-۳۰ را می‌توان به صورت رابطه‌ی بی‌بعد ۲-۳۱ نوشت:

$$C_d = f\left(\frac{H_t}{P}, lc, \theta'\right) \quad (2-31)$$

۲- ۶- ۳ سرریز کنگره‌ای دوزنقه‌ای و مستطیلی

شکل ۲-۶ پلان یک سرریز کنگره‌ای دوزنقه‌ای و مستطیلی انحنادار را نشان می‌دهد. به‌طور کلی کمیت‌های مؤثر در گذردهی سرریزهای کنگره‌ای فوق را می‌توان به شکل زیر ارائه نمود:

$$f \left(P, d, \frac{H_t}{P}, H_d, t_w, W, w_c, S_0, \rho, \mu, R, \sigma, S_e, lc, N, \Theta, g, \alpha, \alpha', A, D, S \right) = 0 \quad (۳۲-۲)$$



شکل ۲-۶. پلان سرریز کنگره‌ای دوزنقه‌ای و مستطیلی انحنادار

در معادله ۲-۳۲، A طول وجه داخلی، D طول وجه خارجی، S فاکتور تعیین کننده شیب دیوار، و α و α' زاویه داخلی و خارجی دیواره‌ی جانبی سرریز می‌باشند. مطابق قسمت‌های قبل با توجه به ثابت بودن بعضی پارامترها از جمله عرض سرریز (W)، عرض سیکل (w_c)، طول یک ضلع سیکل (lc)، ارتفاع سرریز (p) و... معادله ۲-۳۲ به شکل ساده شده‌ی زیر درمی‌آید:

$$C_d = f \left(\frac{H_t}{P}, \alpha, \alpha', A, D, S_e, N, S \right) \quad (۳۳-۲)$$

تأثیر پارامترهای فوق بر ضریب گذردهی سرریزهای کنگره‌ای انحنادار را می‌توان مورد بررسی قرار داد.

۲-۷ مطالعات تحلیلی و آزمایشگاهی بر روی سرریزهای کنگره‌ای

طراحی سرریزهای کنگره‌ای از سال ۱۹۲۰ مطرح شد، اما مطالعات عملکرد هیدرولیکی آن‌ها از سال ۱۹۶۸ آغاز شده است. سرریزهای کنگره‌ای شامل سه شکل کلی دوزنقه، مثلث و مستطیلی می‌باشند اما در بعضی طراحی‌های خاص می‌توانند شکل نیم‌دایره‌ای، نوک اردکی و ... نیز داشته باشند. در شکل ۲-۷ می‌توان نمونه‌ای از سرریز کنگره‌ای را در حالت‌های طراحی متفاوت مشاهده کرد. تحقیقات فراوانی به منظور شناخت شرایط جریان در حالت قرارگیری این نوع سرریزها و عوامل مؤثر بر طراحی بهینه این سازه‌ها بررسی شده است.



شکل ۲-۷. برخی اشکال سرریز کنگره‌ای

تا پیش از دهه ۷۰ میلادی محققانی از جمله تیسون، کوزاب، سواب و جنتلینی، سرریزهای کنگره‌ای را مورد بررسی قرار دادند.

جنتلینی (۱۹۴۰) با استفاده از مطالعات سرریز مورب، آزمایش‌هایی روی سرریز کنگره‌ای مثلثی با زاویه‌های ۳۰، ۴۵ و ۶۰ درجه برای نسبت‌های w/P (ارتفاع سرریز) کوچک انجام داد. به دلیل مقدار بالای ارتفاع آب بالادست در مقایسه با عرض سیکل (w) جنتلینی نشان داد که دبی مستقل از w/P است و تابعی از h/w (ارتفاع آب روی سرریز) می‌باشد. او همچنین به این نتیجه رسید که کاهش زاویه‌ی داخلی جانبی دیواره (α) افزایش راندمان سرریز را در پی دارد [Gentlini B, 1940].

کوزاک و سواب (۱۹۶۱)، یازده سرریز کنگره‌ای با پلان دوزنقه‌ای متفاوت را مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها به این نتیجه رسیدند که حجم دبی عبوری از سرریز کنگره‌ای به ازای یک هد مشخص در بالادست، به صورت قابل توجه‌ای از سرریز خطی بیشتر است [Kozak, M and Svab, J, 1961]. اسکلیج (۱۹۶۲) با استفاده از نتایج کوزاک و سواب، تناسب دبی با توان ارتفاع جریان و نیز تناسب آن با طول تاج را تأیید کرد [Aminpour B, 1991]. تیسون و فرانس (۱۹۶۳) دریافتند که ضریب گذردهی با ارتفاع جریان رابطه عکس دارد [Tison G, Fransen T, 1963].

هی و تیلور (۱۹۷۰، ۱۹۷۲) اولین افرادی بودند که جامع‌ترین مطالعه را بر روی سرریزهای کنگره‌ای انجام دادند. اولین بار تیلور به طور گسترده‌ای رفتار هیدرولیکی سرریز کنگره‌ای با شکل تاج نیم‌دایره‌ای و لبه تیز را بررسی کرد. نتایج نشان داد که بازدهی سرریز کنگره‌ای در ارتفاع‌های کم آب بالادست، بهتر است و دبی بیشتری نسبت به سرریزهای خطی عبور می‌دهد. هی و تیلور همچنین نسبت دبی سرریز کنگره‌ای به سرریز خطی را معرفی کردند که بر این اساس روشی برای طراحی سرریز کنگره‌ای دوزنقه‌ای و مثلثی ارائه دادند، علاوه بر این پیشنهاد کردند در شرایط استغراق از سرریز کنگره‌ای استفاده نشود، چون فضای هوادهی زیر جت آب از بین می‌رود [Hay N, Taylor 1970]. G, 1970] دارواس (۱۹۷۱) نتایج تحقیقات خود را به شکل ساده‌تر و مستقل از برآورد دبی سرریز خطی ارائه کرد. این محقق همچنین یک دسته منحنی برای طراحی سرریزهای دوزنقه‌ای شکل با تاج ربع دایره‌ای ارائه نمود [Darvas L, 1971].

سازمان عمران ایالات متحده آمریکا (USBR) مطالعاتی روی مدل آزمایشگاهی سرریز چندوجهی سدهای یوت و هی‌رام انجام داده است. گزارش‌های منتشر شده توسط این سازمان نشان می‌دهد که بین نتایج به دست آمده از تحقیقات USBR با نتایج به دست آمده توسط تیلور و هی اختلاف وجود دارد. این اختلاف ناشی از کاربرد بار پیزومتری به جای استفاده از بار آبی کل توسط محققین اخیر بوده است [منتظمیان م، ۱۳۹۶].

ایندلکافر و روه (۱۹۷۵) با انجام آزمایش به این نتیجه رسیدند که زاویه تداخل یا آشفستگی تابعی از بار هیدرواستاتیک جریان بر روی سرریز (h) ارتفاع سرریز (P) و زاویه دیوارهای سرریز با محور اصلی جریان (α) می باشد [Indlekofer H, Rouve G, 1975].

میر (۱۹۸۰) اعلام کرد که دبی واقعی کمتر از میزانی است که با استفاده از روش هی و تیلور به دست می آید [Mayer P.G, 1980]. هاستون (۱۹۸۲) این اختلاف را ناشی از تعریف بار هیدرولیکی بر روی سرریز دانست و بیان داشت که بایستی هد نظیر سرعت ($\frac{V^2}{2g}$) را به بار هیدرواستاتیک اضافه کرد و بر این اساس منحنی های طراحی جدیدی ارائه نمود [Houston K.L, 1982]. لاکس و هینچلف (۱۹۸۵) و همچنین لاکس به تنهایی (۱۹۸۹) با استفاده از تحلیل ابعادی و انجام آزمایش ها، نمودارها روش هایی برای طراحی سرریز کنگره ای ارائه کردند. لاکس همچنین با انجام آزمایش هایی بر روی مدل فیزیکی سرریز کنگره ای، ضریب دبی عبوری از این سرریزها را به صورت تابعی از هد کلی بالادست معرفی نمود [Lux F, 1989].

نتایج کاسیدی و همکاران (۱۹۸۵) نشان داد که راندمان سرریزهای کنگره ای در مقادیر بالای ارتفاع آب بالادست به طور قابل ملاحظه ای کمتر از مقادیری است که مطالعات دیگر نشان می دهد. آنان همچنین با بررسی تأثیر ضریب دبی بر روی سرریزهای کنگره ای به این نتیجه رسیدند که مقدار این ضریب در ارتفاع های بالای جریان عبوری نسبت به سرریزهای مستقیم کاهش می یابد [Cassidy J et al, 1985].

امانیان (۱۹۸۷) سرریزهای خطی و کنگره ای مثلثی با تاج نیم دایره ای را بررسی کرد. نتایج نشان داد که راندمان دبی سرریز کنگره ای با افزایش ارتفاع کل آب بالادست کاهش می یابد و راندمان شکل تاج نیم دایره ای بیشتر از شکل تاج ربع دایره ای، صاف و لبه تیز است [Amanian N, 1987].

نتایج تاکال و همکاران (۱۹۹۰) نشان داد که در عرض های مشابه سرریزهای کنگره ای دو سیکلی نسبت به سرریزهای کنگره ای سه سیکلی بهتر عمل می کنند. آن ها همچنین نشان دادند که جریان

عبوری از روی سرریزهای کنگره‌ای نسبت به سرریزهای دریچه‌دار ایمن‌تر و اقتصادی‌تر است [Tacail F.G., et al. 1990]

والدرون (۱۹۹۴) مدل فیزیکی سرریزهای کنگره‌ای دوزنقه‌ای و خطی را آزمایش کرد و نشان داد که ضریب دبی مستقل از تعداد سیکل سرریز کنگره‌ای است و حداکثر ضریب دبی جایی است که حداکثر مقدار هوادهی وجود داشته باشد. او همچنین پیشنهاد کرد از متوسط ضریب دبی برای طراحی استفاده شود [Waldron D, 1994].

تولیس و همکاران (۱۹۹۵) دریافتند که ظرفیت و دبی یک سرریز کنگره‌ای تابعی است از بار هیدرولیکی کل، طول مؤثر تاج و ضریب گذردهی که ضریب گذردهی خود نیز بستگی به بار هیدرولیکی کل، ارتفاع سرریز، ضخامت دیوار، شکل تاج، نوع و شکل رأس تاج و زاویه دیوارهای سرریز (α) دارد. [Tullis, J.P et al, 1995]

ورملیتون و تسانگ (۲۰۰۰) کارایی سرریزهای چندوجهی در هوادهی و افزایش اکسیژن محلول رودخانه‌ها را مورد بررسی قرار داده و به این نتیجه رسیدند که سرریزهای چند وجهی نسبت به سرریزهای خطی به نحو بسیار مطلوب تری در افزایش اکسیژن محلول عمل می نمایند [Wormleaton, P. R and Tsang C.C, 2000].

بر اساس آزمایشات انجام شده توسط تولیس (۲۰۰۷) زاویه سرریز کنگره‌ای با راستای اصلی جریان (α) بر روی دبی عبوری در حالت مستغرق تأثیر دارد، به گونه‌ای که با افزایش زاویه α دبی مقدار کمی کاهش می‌یابد. ضمناً سرریزهای کنگره‌ای در مقایسه با سرریزهای مستقیم کمتر تحت تأثیر استغراق قرار می‌گیرند [Tullis B,P et al, 2007].

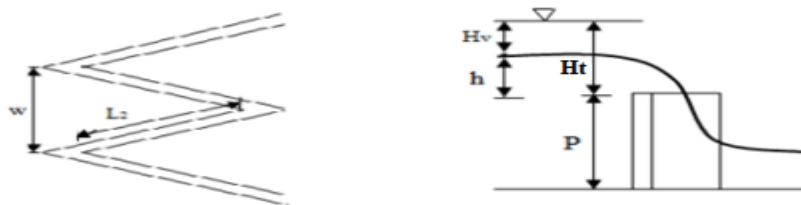
قاره و همکاران (۲۰۰۸) رابطه‌ای برای مقدار بهینه ضریب دبی پیدا کردند و روشی برای طراحی سرریز کنگره‌ای دوزنقه‌ای بر اساس این رابطه ارائه کردند [Ghare A.D, 2008].

قدسیان (۲۰۰۹) برای بیان جریان عبوری از سرریزهای کنگره‌ای مثلثی شکل رابطه‌ی زیر را ارائه

داد:

$$Q = \left(a \left(\frac{H_t}{P}\right)^b \left(\frac{L}{W}\right)^c P\right)^{1.5} g^{0.5} L_e \quad (L_e = 2L_2) \quad (۳۴-۲)$$

در رابطه فوق b و c ضرایب تجربی و به ترتیب برابر با $۰/۹۲۸$ و $-۰/۳۸۳$ هستند. ضریب a وابسته به شکل تاج و برای تاج لبه تیز برابر با $۰/۷۰۳$ می‌باشد. سایر پارامترها در شکل ۲-۸ نمایش داده شده است. [Ghodsian M, 2009]



شکل ۲-۸. پارامترهای موجود در رابطه‌ی قدسیان

کروکستون (۲۰۱۰) انواع متنوعی از طول ها و زاویه ها را در سرریز کنگره‌ای دوزنقه‌ای در دو حالت انحنادار و بدون انحناء به صورت آزمایشگاهی مورد بررسی و مقایسه قرارداد [Crookston B, 2010].

جواهری و کبیری سامانی (۲۰۱۱) با استفاده از مدل فیزیکی به بررسی سرریز کنگره‌ای مستطیلی پرداختند. نتایج نشان داد که ضریب دبی سرریز کنگره‌ای مستطیلی به میزان قابل توجهی افزایش یافته و نسبت به سرریز مستقیم لبه تیز و کنگره‌ای مثلثی به ترتیب ۲ و ۵ برابر شده است. [Javaheri A, and Kabiri Samani A. 2011]

در ادامه کارلو (۲۰۱۲) تحقیقاتی را بر روی جریان عبوری از سرریز کنگره‌ای مثلثی شکل با تاج لبه تیز به انجام رساند [Carollo F, 2012].

کومار و همکاران (۲۰۱۲) مطالعه‌ی آزمایشگاهی بر ضریب سرریز کنگره‌ای با پلان مثلثی انجام دادند. مقایسه‌ی نتایج نشان داد که با کاهش زاویه‌ی رأس سرریز، طول ناحیه تداخل جریان افزایش

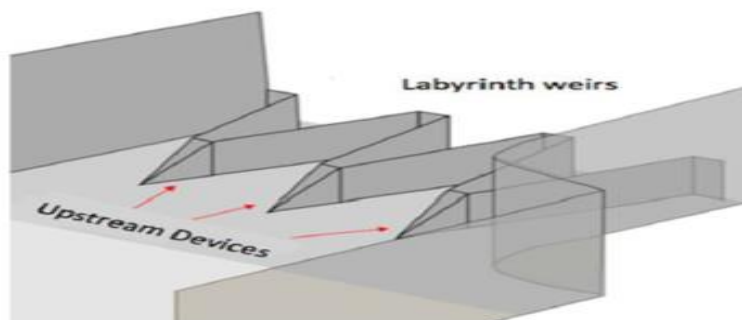
یافته و ضریب دبی جریان سرریز کاهش محسوسی می‌یابد. همچنین در این تحقیق روابطی برای محاسبه ضریب دبی جریان با زوایای رأس مختلف ارائه شده است [Kumar S, 2012].

خوده (۲۰۱۲) با انجام مطالعه آزمایشگاهی جریان بر روی سرریزهای کنگره‌ای، برای زاویه دیوار جانبی سرریز از ۸ تا ۳۰ درجه، دسته‌ای دیگر از منحنی‌های طراحی را ارائه کردند. هدف این محققین درواقع اختیار بیشتر برای تغییر α و تعداد سیکل‌های سرریز در روند طراحی بود [Khode B,V, 2012]. کریستنسن (۲۰۱۲) ضمن بررسی میدان جریان ورودی به سرریزهای قوسی کنگره‌ای، تأثیر تعداد سیکل‌ها بر روی عملکرد این نوع سرریزها را مورد تحقیق قرارداد و نتیجه گرفت که با افزایش تعداد سیکل‌ها، ضریب گذردهی کاهش می‌یابد [Christenson N, 2012].

اندرسون و همکاران در سال ۲۰۱۳ در طی یک پژوهش آزمایشگاهی بعد از بررسی ضریب گذردهی در سرریز کلید پیانویی به بررسی همین پارامتر در سرریز کنگره‌ای دوزنقه‌ای با زاویه‌ی دیواره‌ی بین ۷ تا ۳۵ درجه پرداختند. نتایج نشان داد که هر چه زاویه دیواره افزایش پیدا کرد ضریب دبی نیز افزایش پیدا کرد [Anderson R,M et al, 2013].

مجتبی مهریان (۲۰۱۵) به مدل‌سازی سرریزهای کنگره‌ای (دوزنقه‌ای) مستقیم و دارای قوس در پلان با تاج ربع‌دایره پرداخت و تأثیر شیب بالادست و پایین‌دست بر عملکرد هیدرولیکی جریان را بررسی کرد. نتایج او نشان داد که در هد بالا مخصوصاً در سرریزهای کنگره‌ای دارای قوس، پایین‌آوردن سطح تخت پایین‌دست کارایی سرریز را افزایش می‌دهد [Mehrian M, 2015].

گوستاوو و همکاران به بررسی ضریب دبی سرریز کنگره‌ای دوزنقه‌ای با اجرای ابزار هیدرودینامیکی پرداختند. در اجرای این آزمایش‌ها از سه ابزار هیدرو دینامیکی به طول‌های ۶، ۱۲ و ۱۸ سانتی متر استفاده شد (شکل ۲-۹). نتایج نشان داد که این ابزار هیدرودینامیکی دبی را تا میزان زیادی افزایش می‌دهد [Gustavo et al, 2015].



شکل ۲-۹. اجرای ابزار هیدرودینامیکی در بالادست سرریز کنگره‌ای دوزنقه‌ای

کیهان ایدین (۲۰۱۶) نیز به شبیه‌سازی عددی سرریز کنگره‌ای دوزنقه‌ای جانبی پرداخت. او زوایای مختلف را برای سرریز در نظر گرفت و در نهایت به این نتیجه رسید که بهترین عملکرد متعلق به زاویه جانبی سرریز، $\alpha = 30^\circ$ است [Cihan Aydin M, 2016].

در سال ۲۰۱۶ پژوهشگران با بررسی آزمایشگاهی بر سرریز کنگره‌ای دوزنقه‌ای و دایره‌ای دریافتند که با افزایش زاویه دیواره‌ی سرریز دوزنقه‌ای ضریب گذرده‌ی افزایش می‌یابد و همچنین با قرار دادن آب شکن در سرریز دایره‌ای، ضریب گذرده‌ی حدود ۴ درصد کاهش یافته است [Bilhan O et al, 2016].

بوروس و همکاران به ساخت مدل آزمایشگاهی سرریز دوزنقه‌ای و مدل عددی آن پرداختند. نتایج نشان می‌دهد که تطابق خوبی بین نتایج عددی و آزمایشگاهی به خصوص در هد های بالا وجود دارد و علاوه بر این، آن‌ها به نتیجه رسیدند که دبی عبوری از سرریز تقریباً مستقل از مدل توربولنسی می‌باشد. [Bruce M et al, 2016]

روشنگر و همکاران در مطالعه‌ی آزمایشگاهی دریافتند که با قرار دادن آب شکن بر روی سرریز در دو حالت کنگره‌ای خطی و قوسی با پلان دوزنقه‌ای ضریب گذرده‌ی افزایش می‌یابد [Roshagar k. et al 2017].

قدسیان و شنوایی (۱۳۷۹، ۱۳۸۰) تحقیقاتی را به منظور ارزیابی تأثیر طول و شکل تاج بر روی ضریب گذرده‌ی سرریزهای کنگره‌ای مثلثی شکل در پلان به انجام رساندند. آنان بیان کردند که با

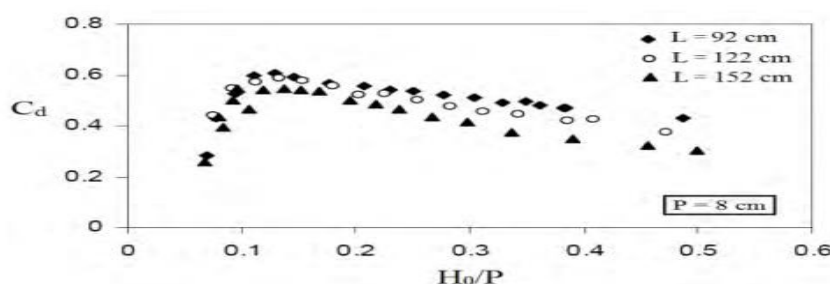
افزایش طول تاج در یک عرض مشخص، خطوط جریان عبوری از روی سرریز مسیر طولانی تر و غیرمستقیمی را طی کرده که کاهش ضریب گذردهی را به همراه دارد. آن‌ها از تحقیقات خود نتایج ذیل را نیز اتخاذ نمودند:

در مقادیر $\frac{L}{W} \leq 2.5$ تاج لبه تیز بیشترین و تاج مسطح کمترین مقادیر ضریب گذردهی جریان را داراست.

در مقادیر متوسط و زیاد $\frac{L}{W}$ تاج نیم‌دایره‌ای بیشترین و تاج مسطح کمترین مقادیر ضریب گذردهی جریان را داراست.

در هدهای بالا، فشردگی جریان باعث کاهش راندمان سرریز کنگره‌ای می‌گردد که در این حالت شکل تاج تأثیر چندانی بر عملکرد سرریز ندارد [قدسیان و شنوایی، ۱۳۸۰].

حیدرپور و همکاران به بررسی سرریزهای کنگره‌ای مستطیلی و U شکل پرداختند. آن‌ها برای تعیین اثر طول سرریز سه نمونه با طول‌های مختلف را مورد آزمایش قرار دادند. همان‌گونه که از شکل ۲-۱۰ مشخص می‌باشد روند تغییرات ضریب گذردهی نسبت به $\frac{H}{P}$ برای هر سه طول مشابه می‌باشد:



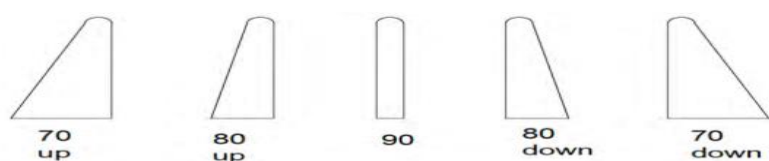
شکل ۲-۱۰. نتایج ضریب گذردهی سرریز در برابر نسبت $\frac{H_0}{P}$ (حیدر پور و همکاران)

نتایج نشان می‌دهد که در یک بار هیدرولیکی مشخص، با افزایش طول سرریز، ضریب گذردهی کاهش می‌یابد. این کاهش ضریب گذردهی در شاخه صعودی منحنی قابل ملاحظه نمی‌باشد، ولی در بخش شاخه نزولی با افزایش نسبت، منحنی‌ها از یکدیگر فاصله گرفته که دلیل این امر را می‌توان این‌گونه توجیه نمود که در شاخه صعودی منحنی و برای مقادیر کم $\frac{H_0}{P}$ تقریباً جریان در کل تاج سرریز

به صورت آزاد تخلیه می گردد. لذا طول سرریز تأثیر چندانی بر ضریب گذردهی نخواهد داشت. ولی در بخش نزولی منحنی، تداخل لایه ها وجود داشته و افزایش طول سرریز باعث کاهش ضریب گذردهی می گردد [حیدرپور و همکاران، ۱۳۸۵].

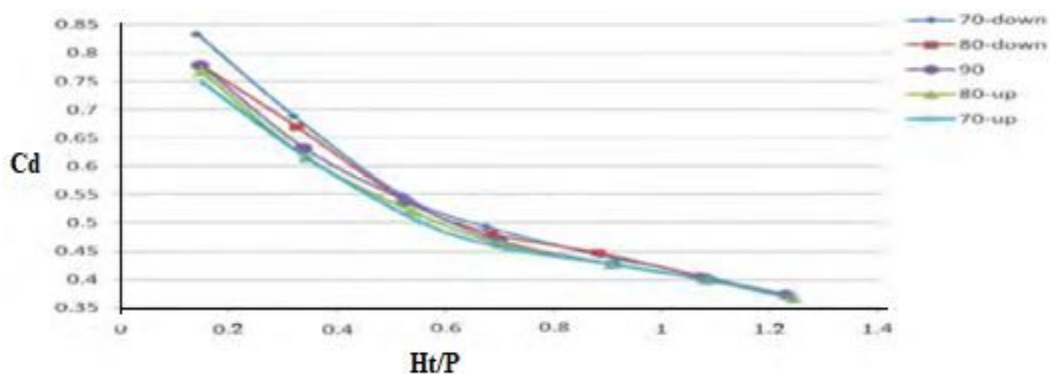
یاسی و محمدی (۱۳۸۶) تأثیر تغییر شعاع انحناى دماغه سرریزهای کنگره‌ای با دو سیکل و پلان‌های مثلثی، دوزنقه‌ای و مستطیلی را مورد بررسی قرار دادند. نتایج آزمایش‌های انجام شده نشان داد که قوسی نمودن دماغه سرریز منجر به بهبود راندمان هیدرولیکی سرریز می گردد [یاسی و محمدی، ۱۳۸۶].

اژدری مقدم و همکارانش (۱۳۹۰) جهت بررسی اثرات شیب بالادست و پایین دست مقطع بر روی ضریب گذردهی سرریزهای کنگره‌ای مثلثی شکل در پلان، مقاطع نشان داده شده در شکل ۲-۱۱ را مورد استفاده قرار دادند.



شکل ۲-۱۱. شیب بالادست و پایین دست مقطع

آنان با ارائه نحوه تغییرات ضریب گذردهی در برابر نسبت $\frac{H_t}{P}$ به ازاء شیب‌های مختلف مقطع، مطابق با شکل ۲-۱۲ نتایج ذیل را اتخاذ نمودند:



شکل ۲-۱۲. تغییرات ضریب گذردهی در برابر نسبت $\frac{H_t}{P}$ به ازاء شیب‌های مختلف مقطع

- کاهش شیب بالادست مقطع باعث افزایش هد کل (H_t) برای دبی ثابت و در نهایت کاهش ضریب گذردهی جریان شده که در هدهای پایین این اثرات قابل توجه می‌باشد.
 - کاهش شیب مقطع به سمت پایین دست باعث کاهش هد کل (H_t) برای دبی ثابت و در نهایت افزایش ضریب گذردهی جریان شده که در هدهای پایین این اثرات قابل توجه می‌باشد. بیشترین درصد افزایش ضریب گذردهی برای هدهای پایین (۳٪) می‌باشد.
 - اثرات کاهش شیب بالادست بر روی ضریب گذردهی جریان کمتر از اثر کاهش شیب پایین دست مقطع بر روی ضریب گذردهی جریان می‌باشد [اژدري مقدم و همکارانش، ۱۳۹۰].
- وردکی (۱۳۹۱) بر روی مشخصات هیدرولیکی جریان در سرریزهای کنگره‌ای با پلان نیم‌دایره و نیم‌دایره‌ای-خطی به صورت آزمایشگاهی مطالعه کرد. که در آن به بررسی تغییرات ضریب دبی جریان به وسیله تغییرات شعاع پرداخت.
- با نصب تیغه های هوادهی بر روی سرریز، جریان عبوری از روی سرریز را برای دبی های مختلف اندازه گیری کرده و به نتیجه رسید که با ایجاد امکان هوادهی در سرریزها در کلیه دبی ها همواره مقدار هوایی در زیر تیغه ها باقی می ماند که این موضوع باعث ایجاد نوعی مقاومت در ریزش آزاد آب و کاهش ضریب دبی عبوری از سرریز می شود.
- مقایسات او نشان داد که در کلیه‌ی هندسه‌های مورد بررسی تا قبل از شروع استغراق ضریب دبی جریان سرریزهای کنگره‌ای با پلان نیم‌دایره منطبق بر خطی و سرریز نیم‌دایره‌ای خطی اندکی کمتر از خطی است؛ و با افزایش هد نسبی سرریز دچار استغراق شده و ضرایب دبی متمایل به سرریز لبه‌پهن می‌شوند و در نتیجه دبی واحد طول عبوری از سرریز نسبت به سرریز خطی کاهش می‌یابد [وردکی، ۱۳۹۱].

سنگ سفیدی (۱۳۹۲) با بررسی آزمایشگاهی پارامترهای مؤثر بر ضریب گذردهی سرریزهای کنگره-ای قوسی نشان داد که استفاده از این نوع سرریز می‌تواند ظرفیت گذردهی را تا حدود ۴,۵ برابر افزایش دهد [سنگ سفیدی ۱۳۹۲].

اژدری مقدم به طراحی هیدرولیکی سرریزهای کنگره‌ای با استفاده از هیدرودینامیک محاسباتی پرداخته و بدین منظور از نرم‌افزار FLOW 3D و مدل RNG استفاده کرد. وی به این نتیجه رسید که با افزایش زاویه‌ی دیواره‌ی سرریز در امتداد جریان ضریب گذردهی افزایش می‌یابد [اژدری مقدم، ۱۳۹۰].

نظامی (۱۳۹۲) به بررسی آزمایشگاهی ضریب دبی سرریز جانبی دوزنقه‌ای تک سیکل پرداخت. او عدد فرود در هر آزمایش را تغییر داد نتایج این تحقیق نشان داد که ضریب دبی سرریز جانبی دوزنقه‌ای در مقایسه با سرریزهای جانبی معمولی حدوداً ۱۵-۳۰ درصد افزایش داشته‌است [نظامی، ۱۳۹۲].

گودرزی (۱۳۹۲) در تحقیق آزمایشگاهی به بررسی تأثیر سرریز کنگره‌ای انحنادار دوزنقه‌ای در پلان، با تاج ربع‌دایره‌ای بر ضریب گذردهی و دبی عبوری پرداخت، وی همچنین اثرات شیب سرریز بر روی تغییرات دبی را بررسی نمود. نتایج به‌دست‌آمده نشان می‌دهد که سرریز کنگره‌ای انحنادار باعث افزایش ضریب گذردهی و دبی خروجی نسبت به سرریز کنگره‌ای خطی می‌شود. در ضمن شیب‌دار کردن بالادست سرریز کنگره‌ای انحنادار منجر به بهبود ضریب گذردهی، خواهد شد [گودرزی، ۱۳۹۲].

رضایی (۱۳۹۴) مطالعات آزمایشگاهی بر روی سرریز کنگره‌ای مستطیلی انجام داده‌است. وی با انجام آزمایشات خود نتیجه گرفت که در یک نسبت $\frac{Ht}{p}$ و ارتفاع ثابت با افزایش طول دماغه دبی عبوری از سرریز افزایش می‌یابد [رضایی، ۱۳۹۴].

جامی‌فر (۱۳۹۴) نیز مطالعات عددی بر روی سرریزهای کنگره‌ای انجام داد که هدف از انجام این پژوهش مقایسه‌ی عملکرد سرریزهای کنگره‌ای مثلثی با زوایای رأس مختلف (۷۵، ۹۰، ۱۲۰) و منحنی

شکل و دوزنقه‌ای بوده است. نتایج او نشان داد که در سرریز کنگره‌ای با افزایش دبی کاهش کارایی را خواهیم داشت و عملکرد مناسب آن‌ها در دبی‌های کم می‌باشد. همچنین سرریز کنگره‌ای مثلثی با کاهش زاویه‌ی رأس سرریز میزان دبی افزایش می‌یابد، به‌طوری که مقدار دبی در هد ثابت تا ۴۳٪ بیشتر می‌شود [جامی فر، ۱۳۹۴].

قلی زاده (۱۳۹۴) سرریز کنگره‌ای قوسی با پلان دوزنقه‌ای را در نرم‌افزار FLOW 3D و با استفاده از مدل آشفتگی RNG مدل‌سازی و بررسی کرد، وی برای صحت‌سنجی مدل خود مدل آزمایشگاهی کروکستون را مورد استفاده قرار داد. در این تحقیق ۴ هندسه سرریز با ۴ شکل تاج (نیم‌دایره، ربع‌دایره، لبه‌تیز و لبه‌تخت) به عبارتی ۱۶ مدل مختلف طراحی گردید؛ و این نتیجه حاصل شد که با کاهش زاویه‌ی دیواره‌ی سرریز استغراق موضعی در بارهیدرولیکی پایین‌تری رخ می‌دهد. همچنین به ازای زاویه‌ی دیوار جانبی یکسان استغراق موضعی برای شکل تاج ربع‌دایره و لبه‌تخت به علت تداخل لایه‌ی جریان در داخل سیکل‌های سرریز کنگره‌ای خیلی سریع‌تر از سرریز با تاج نیم‌دایره اتفاق می‌افتد.

علاوه بر این برای بار هیدرولیکی کم، شکل تاج لبه‌تیز بیشترین گذردهی و با افزایش $\frac{H_t}{p}$ تاج نیم‌دایره کارایی بالاتری نسبت به بقیه دارد [قلی زاده، ۱۳۹۴].

ضمیری و همکاران به بررسی تاثیر شکل تاج و ضخامت بدنه سرریز پرداختند. نتایج حاکی از آن است که افزایش ضخامت بدنه سرریز موجب کاستن ضریب دبی می‌شود، هم‌چنین بزرگی ضریب دبی در سرریز با تاج نیم‌دایره‌ای شکل بیشتر از تاج ربع‌دایره می‌باشد [ضمیری و همکاران، ۱۳۹۶].

مشکواتی و همکاران در سال ۱۳۹۶ به بررسی آزمایشگاهی تاثیر طول و ارتفاع سرریز بر ضریب دبی در سرریز دوزنقه‌ای شکل پرداختند. نتایج نشان داد که برای یک طول مشخص از سرریز با افزایش ارتفاع ضریب دبی روند کاهشی داشت و همچنین در یک ارتفاع ثابت با افزایش طول سرریز نیز، ضریب دبی کاهش می‌یابد [مشکواتی و همکاران، ۱۳۹۶].

۲ - ۸ جمع‌بندی و خلاصه‌ی فصل

در ابتدای فصل مطالبی در خصوص روش‌های عددی و معادلات حاکم بر جریان گشت. سپس به معرفی نرم افزارهای موجود برای شبیه سازی جریان و معادلات آشفستگی پرداخته شد. در مرحله‌ی بعد باتوجه به اینکه در فصول آینده‌ی این تحقیق هندسه‌های مختلف برای سرریز کنگره‌ای ساخته می‌شود، پارامترهای موثر بر هر کدام از آنها مورد بررسی قرار گرفت. در ادامه، نظر به این‌که پژوهش‌های پیشین، بنایی برای تحقیقاتی است که در آینده انجام می‌گیرد، اشاره‌ی کوتاهی به پژوهش‌های گذشته بر روی سرریز کنگره‌ای شده است و همانطور که مشخص می‌باشد، یکی از دلایلی که در این تحقیق به شبیه سازی عددی پرداخته می‌شود این است که مدل سازی‌های عددی بر روی سرریزهای کنگره‌ای در بین تحقیقات بین المللی کمتر صورت گرفته است.

فصل سوم

مدل سازی و صحت سنجی

۳- ۱ مقدمه

در این بخش ابتدا به توصیف مدل فیزیکی که در این تحقیق از نتایج آن استفاده شده و صحت سنجی نرم افزار با آن انجام گرفته است پرداخته می شود. در ادامه نحوه تولید شبکه های محاسباتی و حل معادلات جریان در آن ها شرح داده می شود. همچنین شرایط مرزی و هندسه جریان مورد بحث قرار می گیرد. در پایان فصل نیز نتایج صحت سنجی بررسی و حساسیت مدل بر اعمال چند مدل آشفتگی بررسی می شود.

۳- ۲ مشخصات مدل Crookston

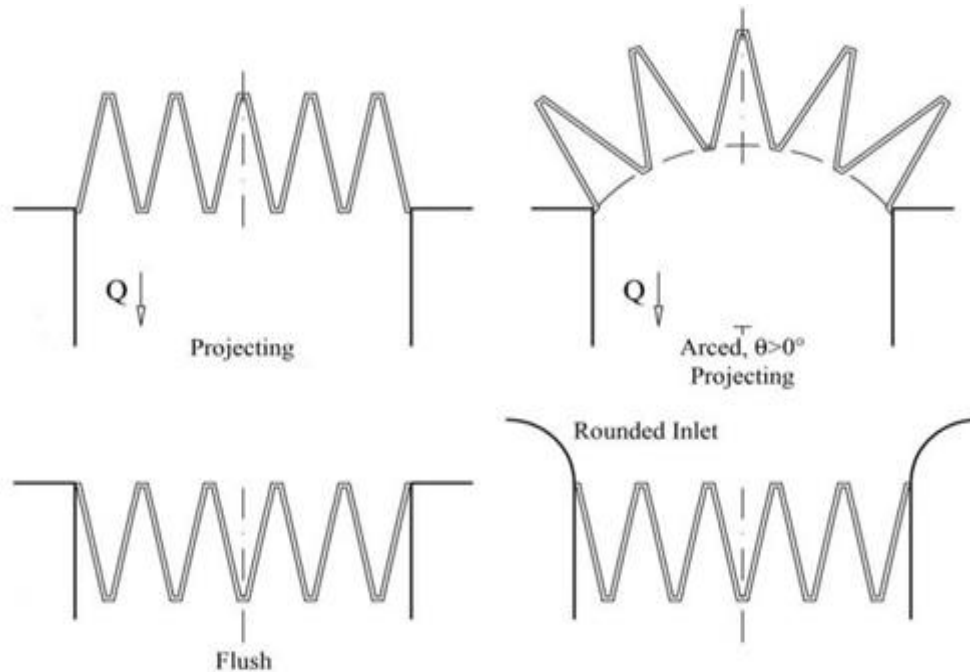
در این پژوهش صحت سنجی مدل عددی با استفاده از داده های آزمایش هایی که توسط آقای برایان کروکستون در دانشگاه یوتا امریکا انجام گرفته، صورت پذیرفته است. تصویر مخزن و یکی از مدل های او در شکل ۳-۱ مشخص می باشد. این مخزن ۷,۳ متر طول ۶,۷ متر عرض و ۱,۵ متر ارتفاع دارد.



شکل ۳-۱. تصویر مخزن ساخته شده در دانشگاه یوتا برگرفته از Crookston, 2010

نتایج حاصل شده برای هندسه های مختلف کروکستون بر اساس نمودار ضریب گذردهی بر حسب نسبت $\frac{H_t}{P}$ در شکل شماره ۳-۴ آورده شده است و هر رنگ در نمودار نشان دهنده هندسه و نحوه قرارگیری سرریز در مخزن می باشد که نحوه قرارگیری به صورت: دایره ای بودن دیواره (Rounded)

inlet، همسطح بودن دیواره‌ی مخزن با سرریز (Flush) و یا قوسی بودن سرریز (Arced Projecting) با زاویه انحنای سیکل $\theta = 10, 20, 30$ درجه) می‌باشد که در شکل ۲-۳ مشخص می‌باشد.



شکل ۲-۳. نحوه‌ی قرار گیری سرریز کنگره‌ای در مخزن برگرفته از Crookston, 2010

مشخصات مدل آزمایشگاهی که برای صحت سنجی مدل عددی انتخاب شده است در جدول ۱-۳

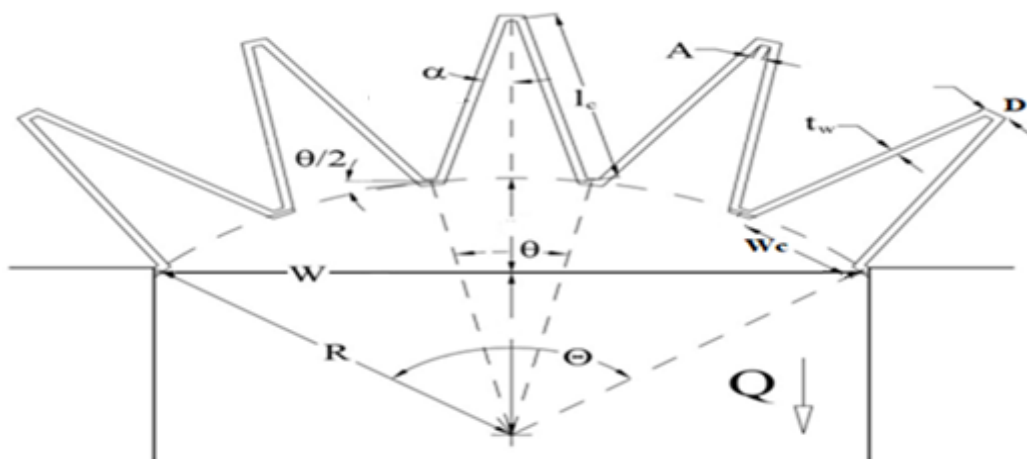
و شکل ۳-۳ آورده شده است.

جدول ۱-۳. مشخصات سرریز کنگره‌ای قوسی با پلان دوزنقه‌ای (Crookston, 2010) استفاده شده جهت صحت سنجی

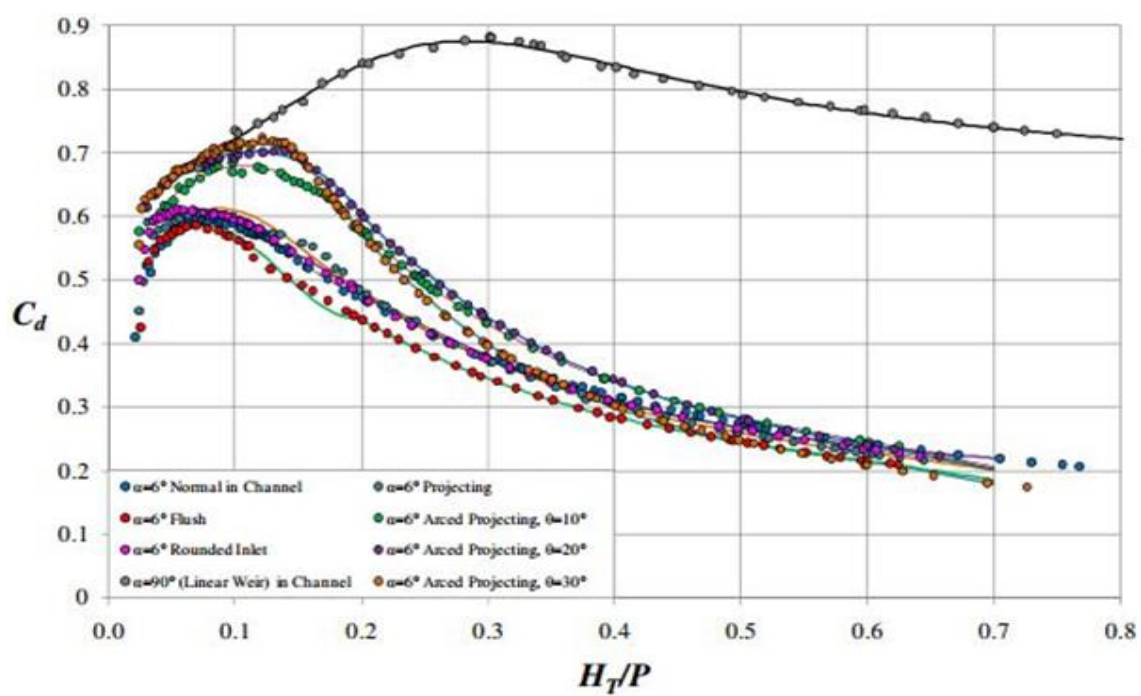
Model	type Cycle	$\alpha(^{\circ})$	$\theta(^{\circ})$	lc(m)	$\theta(^{\circ})$	Lc(m)	P(m)	t_w (m)	A(m)	D(m)	N	Crest shape
۱	Trapezoidal	۶	۵۰	۱,۴۸۹	۱۰	۱۵,۳۷	۰,۲۰۳۲	۰,۰۲۵۴	۰,۰۲۵۴	۰,۰۷۱۱	۵	Half-round

$$Lc=N(A+D+2 lc)$$

(۱-۳)



شکل ۳-۳. پارامترهای سرریز دوزنقه‌ای انحنادار، مدل‌سازی شده توسط Crookston, 2010



شکل ۳-۴. نتایج آزمایشگاهی Crookston, 2010

۳ - ۳ مشخصات میدان حل

ابتدا هندسه‌ی سرریز با توجه به ابعاد مدل آزمایشگاهی در نرم‌افزار AutoCad طراحی گردید. برای وارد کردن مدل به نرم‌افزار FLOW 3D می‌بایست فایلی با فرمت stl از AutoCad استخراج و در نرم‌افزار FLOW 3D فراخوانی شود.

۳ - ۴ تنظیمات نرم‌افزار و فیزیک مدل‌سازی

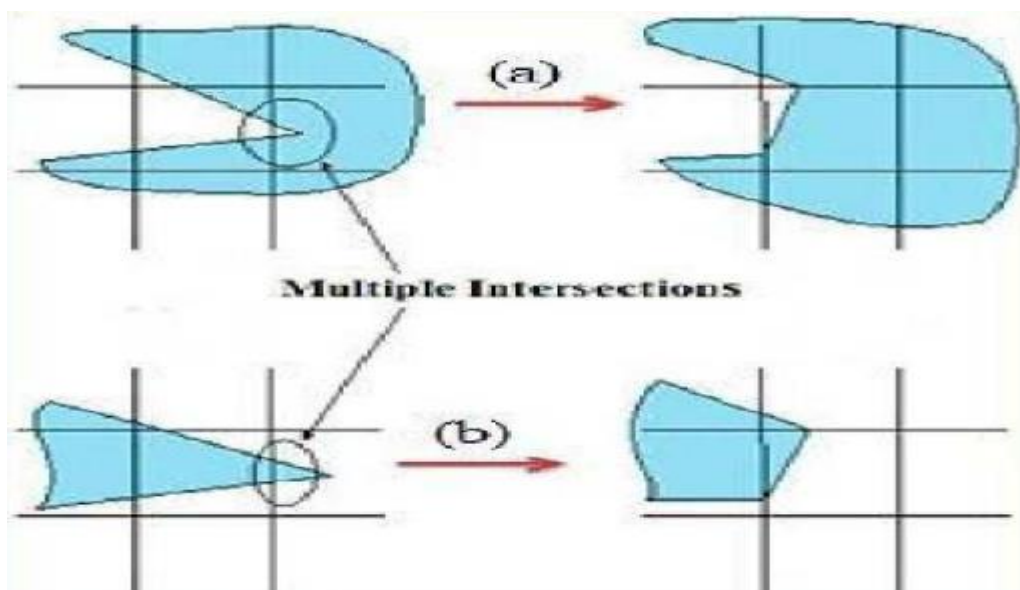
در ابتدای مدل‌سازی می‌بایست مفروضات مدل‌سازی برای نرم‌افزار تعریف شود. از این موارد می‌توان به واحد شبیه‌سازی که برحسب SI می‌باشد، نام برد. همچنین سیال تراکم ناپذیر در نظر گرفته می‌شود. با توجه به پایگاه اطلاعات نرم‌افزار در مورد انواع سیالات، آب با دمای ۲۹۳ درجه کلوین یا همان ۲۰ درجه سلسیوس برای سیال موردنظر در مدل‌سازی انتخاب می‌شود. سپس در قسمت فیزیک نرم‌افزار شتاب ثقل با توجه به واحد در جهت منفی z به مقدار $-۹,۸۱$ تعریف می‌گردد و جریان به صورت viscous معین می‌شود.

۳ - ۵ شبکه‌بندی

حساسیت به شبکه‌بندی و انفصال میدان حل، همواره یکی از مسائل مهم در مدل‌های عددی بوده است. در همین زمینه الگوهای شبکه‌بندی مختلفی ارائه شده که هرکدام دارای نقاط ضعف و قوت مخصوص به خود هستند. FLOW 3D نسبت به مرزهای جامد و شبکه‌بندی نحوه‌ی برخورد متفاوتی در مقایسه با سایر بسته‌های نرم‌افزاری دینامیک سیالات محاسباتی (CFD) دارد. نرم‌افزار FLOW 3D فقط قابلیت مش زنی با شبکه‌های حل به صورت منظم و مکعبی را دارد. شاید این موضوع یک نقطه ضعف برای این نرم‌افزار به نظر آید، ولی این حالت با توجه به دقت تولید نتایج، سرعت تولید شبکه حل را افزایش می‌دهد. همان‌طور که اشاره شد، FLOW 3D از روش کسر مساحت-حجم مانع (FAVOR) استفاده می‌کند. با استفاده از روش

FAVOR می‌توان احجام جامد مدل‌سازی شده در نرم‌افزار را نمایش داد که با این کار قابلیت و تأثیرگذاری مش مناسب برای مدل ارزیابی و یک مش زنی قابل قبول حاصل می‌شود.

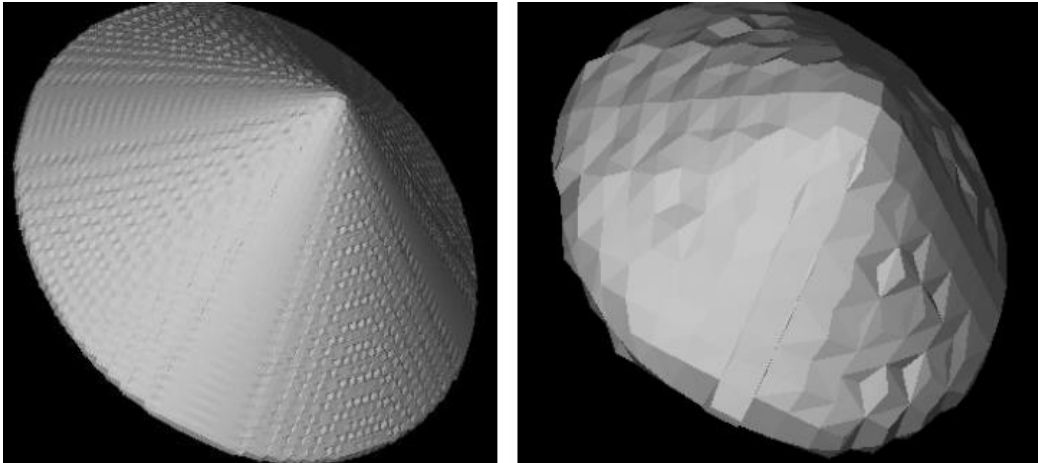
در این روش، شکل نهایی موانع به شبکه‌ی ساخته‌شده در اطراف آن‌ها بستگی دارد. اگر سطح مانع دارای لبه‌های تیز، مقعر و یا محدب باشد، ممکن است محل تقاطع چندگانه به وجود آید، این حالت هنگامی رخ می‌دهد که یک پاره‌خط شبکه بیش از یک‌بار توسط مانع قطع شود. در چنین حالتی قسمت واقع‌شده در یک سلول در تشکیل جسم موردنظر توسط نرم‌افزار شناسایی نمی‌گردد و مطابق شکل ۳-۵ شکل‌های سمت چپ به فرم شکل‌های سمت راست درمی‌آید.



شکل ۳-۵. تغییر شکل موانع به دلیل تقاطع چندگانه در شبکه‌بندی FLOW 3D

در واقع مش زنی یکی از مهم‌ترین قسمت‌های یک مدل‌سازی می‌باشد. از یک طرف ابعاد بزرگ برای سلول‌های مش ممکن است بخش جامد و سیال را به‌خوبی نمایش ندهد که این امر مدل‌سازی را ناقص و نتایج را نامناسب می‌کند. از سوی دیگر در بخش‌های با شکل هندسی پیچیده و نقاطی که میزان گرادیان‌ها زیاد است، ابعاد مش باید به‌اندازه‌ی کافی کوچک باشد که بالا رفتن تعداد مش‌ها و به

عبارتی کوچک‌تر شدن ابعاد سلول‌های شبکه، حجم پردازش را افزایش داده و متعاقب آن زمان مدل‌سازی را افزایش می‌دهد. با توجه به موارد بالا باید یک میزان بهینه که هم مدل‌سازی را به‌درستی پشتیبانی کند و هم بیش‌ازحد لازم حجم پردازش را افزایش ندهد برای هر مدل انتخاب شود. در شکل ۳-۶ تأثیرگذاری تعداد مش برای شبکه حل در یک مدل را مشاهده می‌کنید.



شکل ۳-۶. تأثیر مش زنی بر هندسه احجام: یک شکل مخروطی با ۱۰۰۰۰۰ مش و همان شکل با ۱۰۰۰۰۰۰ مش
برای مشخص کردن حدود شبکه‌بندی، بلوک‌هایی مشخص می‌شود که کلیه‌ی اندازه‌های سازه‌ی موردنظر و فضای آزاد در داخل آن تعریف می‌شود. البته می‌توان تمام جزئیات موردنظر را در یک بلوک هم در نظر گرفت. درواقع این از قابلیت‌های مهم نرم‌افزار FLOW 3D است که می‌توان میدان محاسباتی را به چند بلوک تقسیم کرد و در هر بلوک بسته به شرایط از مش مناسبی استفاده نمود. هر بلوک، قسمتی از میدان محاسباتی را در برمی‌گیرد. لازم به ذکر است، این کار را به دو صورت می‌توان انجام داد: روش اول، بلوک‌های متوالی و کنار هم به‌صورتی که هیچ‌گونه هم‌پوشانی نداشته باشند و روش دوم، بلوک‌های درهم به شکلی که یکی از بلوک‌ها کاملاً در بلوک دیگری قرار بگیرد. مقادیر کمیت‌ها با روش عددی در هر بلوک محاسبه می‌شوند؛ سپس این مقادیر از یک بلوک به بلوک دیگر با استفاده از درونیابی منتقل می‌شوند. به‌طور کلی می‌توان گفت که ایجاد مرزهای جامد مناسب در شبکه‌بندی مدل عددی، به‌ویژه

در مدل‌هایی با هندسه‌ی پیچیده، بزرگ‌ترین محدودیت می‌باشد و انتخاب مناسب آن می‌تواند دقت محاسبات را افزایش دهد. در این مرحله می‌توان تعداد سلول را مشخص کرد و یا ابعاد سلول را به نرم‌افزار داد. درواقع برای هر Mesh Block می‌توان ابعاد یا اندازه مش را تعریف کرد. اگر ابعاد خاصی به Mesh Block داده شود این ابعاد را به‌عنوان اندازه سلول‌های مجاور صفحه در نظر می‌گیرد. اگر به یک Mesh Block تعداد سلول داده شود این تعداد را میزان سلول‌های موجود بین این صفحه تا صفحه مجاور بعدی در نظر می‌گیرد.

۳-۵-۱ نسبت اندازه^۱ و نسبت شکل^۲

برای استفاده از Mesh Block ها توجه به این نکته ضرورت دارد که نسبت ابعاد سلول‌ها در شبکه حل نباید نسبت به هم بسیار زیاد باشد که این امر موجب خطای محاسبات و افزایش حجم پردازش می‌گردد. برای کنترل نسبت ابعاد سلول‌ها از دو معیار نسبت اندازه و نسبت شکل استفاده می‌شود [Flow-3D user manual, 2015].

۳-۵-۱-۱ نسبت اندازه

نسبت اندازه به نسبت ابعاد دو سلول مجاور هم در یک امتداد خاص گفته می‌شود. این نسبت در سه جهت x ، y و z مورد بررسی قرار می‌گیرد. برای استخراج نتایج درست و دقیق همین‌طور کاهش حجم پردازش می‌بایست حداکثر میزان مجاز برای این نسبت ۱٫۲۵ رعایت شود. به‌طورکلی در حالت ایده‌آل این نسبت باید برابر ۱ و یا تا حد ممکن نزدیک به ۱ باشد.

¹ Size ratio

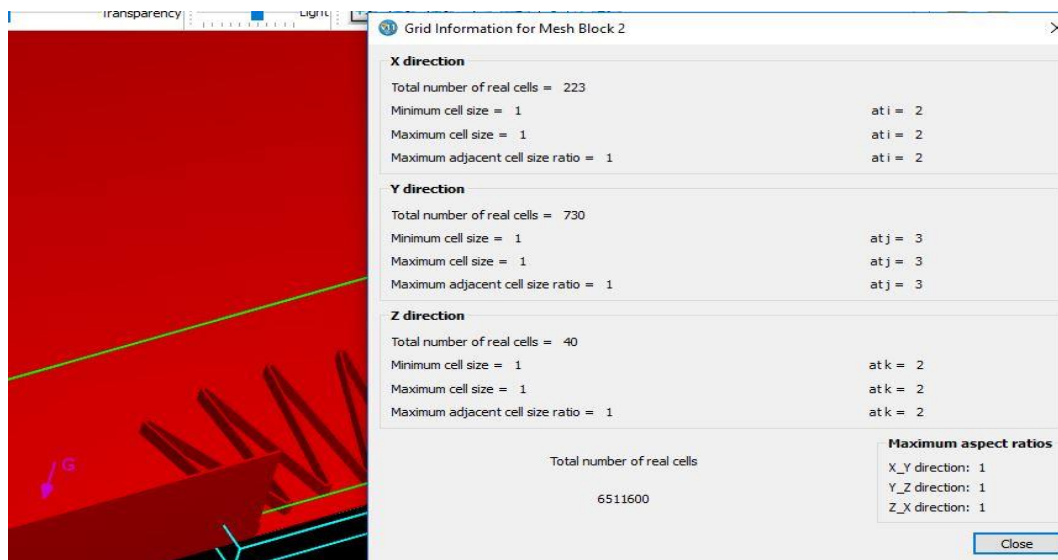
² Aspect ratio

۳-۵-۱-۲ نسبت شکل

نسبت شکل به نسبت بزرگ‌ترین بعد یک سلول به کوچک‌ترین بعد همان سلول گفته می‌شود. نسبت شکل در سه صفحه $X-Y$ ، $X-Z$ و $Y-Z$ مورد بررسی قرار می‌گیرد. میزان این نسبت هم می‌بایست کمتر از ۳ باشد همین‌طور مشابه قسمت قبل این نسبت هم هر چه به عدد ۱ نزدیک باشد؛ مناسب‌تر است. در این مدل‌سازی، این نسبت‌ها حتی‌المقدور به حالت بهینه نزدیک می‌باشند.

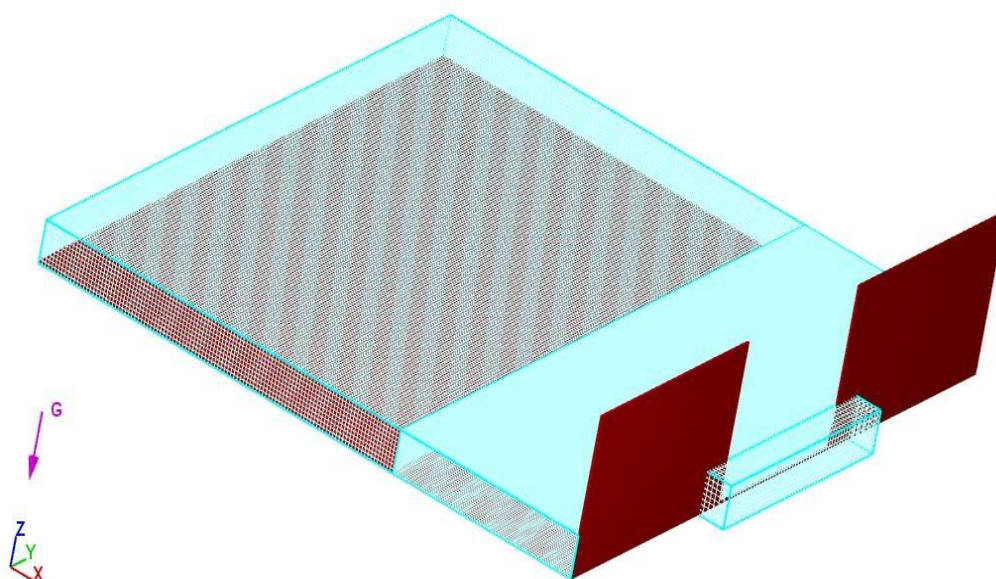
در این مدل‌سازی با توجه به هندسه‌ی مدل سه Mesh Block طراحی گشته است. قرار گیری Mesh Block ها به صورتی است که از ابتدای مخزن تا قبل از سرریز، مجاورت سرریز و بعد سرریز جایگذاری شده‌اند. در ابتدای کار از مش بندی درشت (حدوداً ۲۰۰۰۰ مش) برای هر سه Mesh Block استفاده گشت که اصلاً نتایج خوبی به همراه نداشت. در مرحله‌ی بعد تعداد مش ها تا ۱۶۰ هزار مش افزایش پیدا کرد، در این مرحله نیز همچنان اختلاف نسبتا زیادی با نتایج آزمایشگاهی وجود داشت. تغییر در اندازه و تعداد سلول‌ها تا رسیدن به حالت مناسب ادامه پیدا کرد به‌صورتی که در پایان کار تعداد سلول‌ها در مجموع سه Mesh Block حدود ۷۰۰۰۰۰۰ مش تنظیم گشت.

برای اطمینان از رعایت شروط بالا می‌توان در قسمت Meshing and geometry برروی هر Mesh Block کلیک راست کرده و گزینه‌ی Mesh information را انتخاب نمود. به عنوان مثال در تصویر ۳-۷ مشخصات Mesh Block دوم که مجاور سرریز می‌باشد آمده است. مشاهده می‌شود که شرایط مذکور رعایت شده است:



شکل ۳-۷. مشخصات Mesh Block

در شکل ۳-۸ شبکه حل و Mesh Block ها مشاهده می شود:



شکل ۳-۸. شبکه حل برای مدل

۳-۶ شرایط مرزی میدان

کلیه‌ی مسائل CFD با شرایط مرزی تعریف می‌شوند و این مهم است که کاربر آن‌ها را به‌درستی تعریف کند. پس از شبکه‌بندی میدان و نمایش کامل تمام بخش‌های فیزیک مدل توسط نرم‌افزار شرایط

مرزی برای بلوک‌های مش بندی تعریف می‌گردد. برای هر بلوک مش بندی شده شش وجه وجود دارد که شش شرط مرزی به آن‌ها داده می‌شود. این شرایط به صورت شرط‌های ماکزیمم و مینیمم در جهات x ، y و z معرفی می‌شوند. تعداد شرایط مرزی که در این نرم‌افزار استفاده می‌شود، ۱۰ مورد می‌باشد که در جدول ۲-۳ عنوان گردیده است. در ادامه توضیحات پنج مورد از آن‌ها که در این مدل اعمال گشته‌اند ارائه می‌شود:

جدول ۲-۳. شرایط مرزی موجود در نرم‌افزار FLOW 3D

شرایط مرزی	ردیف	شرایط مرزی	ردیف
Specified velocity	۶	Symmetry	۱
Wave	۷	Wall	۲
Volume flow rate	۸	Continutive	۳
Out flow	۹	Specified pressure	۴
Grid overlay	۱۰	Periodic	۵

۳-۶-۱ شرط مینیمم x

در Mesh Block اول این شرط مربوط به ورودی جریان می‌باشد. در این مرز از شرط مرزی فشار ثابت (specified pressure) استفاده می‌شود. فشار در مرزهای میدان حل می‌تواند به دو صورت مقدار فشار و یا رقوم سطح سیال تعریف شود که در این پژوهش فشار در میدان حل به صورت رقوم سطح سیال (h) به نرم‌افزار داده می‌شود. در این قسمت باید توجه داشت که مقادیری که اعمال می‌شود، فقط رقوم سطح سیال نیست بلکه میزان $\frac{v^2}{2g}$ نیز به آن اضافه شده است ($H_t = h + \frac{v^2}{2g}$). به همین خاطر بعد از این که یک‌بار شبیه‌سازی انجام شد، رقوم سطح سیال بر روی سرریز برداشت می‌شود که اختلاف آن

با شرط مرز ورودی همان مقدار $\frac{v^2}{2g}$ است که البته به علت ناچیز بودن مقدار آن در اکثر موارد از آن صرف نظر خواهد شد.

در Mesh Block دوم این شرط مربوط به بین Mesh Block هاست و به همین خاطر شرط symmetry اعمال می گردد که به معنی آن است که شرایط قسمت خارج از شبکه حل دقیقاً مشابه شرط روی مرز در نظر گرفته شود. در Mesh Block سوم نیز continuative اعمال می شود، که اغلب در مرزهای خروجی استفاده می گردد؛ و مشخصات جریانی که به این مرز می رسد بدون هیچ تغییری به خارج از شبکه حل اختصاص داده می شود.

۳ - ۶ - ۲ شرط ماکزیمم X

در Mesh Block اول این شرط مربوط به بین Mesh Block هاست و مانند حالت قبلی از شرط symmetry استفاده می شود؛ اما در Mesh Block دوم و سوم مربوط به انتهای پائین دست جریان می باشد در این قسمت جریان از شبکه حل خارج می شود. برای خروجی جریان از شرط مرزی Outflow استفاده شده است در این حالت جریانی که به این مرز می رسد، شرایط در مرز را به صورتی قرار می دهد که جریان بدون هیچ تأثیری از مرز خارج شود. این شرط برای شرایطی که اطلاع از شرایط مرزی پائین دست نداریم بسیار مناسب است.

۳ - ۶ - ۳ شرط مرزی در جهت Y

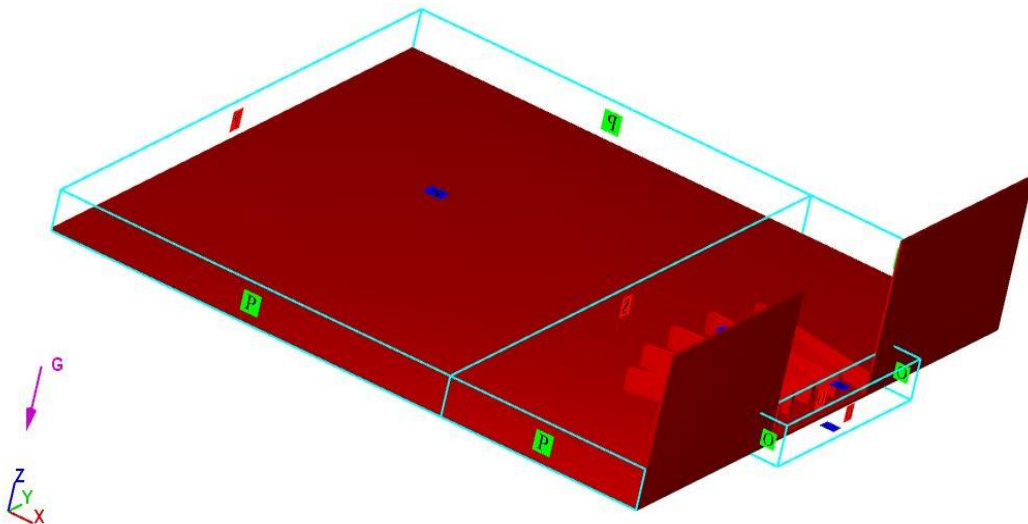
این جهات در دو سمت جانبی مدل می باشند که با توجه به ایجاد شرایطی مشابه با واقعیت، در Mesh Block اول و دوم این شرط نیز مربوط به ورودی جریان می باشد. در این مرز از شرط مرزی فشار ثابت (Specified pressure) استفاده می شود و فشار در میدان حل به صورت رقوم سطح سیال به نرم افزار اعمال می گردد. ولی در Mesh Block سوم که پایین دست جریان قرار دارد، شرط مرزی در هر دو جهت Outflow می باشد.

۳- ۶- ۴ شرط مرزی مینیمم Z

این شرط مربوط به قسمت کف مخزن آب و کف پائین دست مدل سازی می باشد که از شرط مرزی Wall نرم افزار استفاده گشته که مشابه یک دیوار عمل می کند و انتخاب مناسبی برای کف مخزن می باشد.

۳- ۶- ۵ شرط مرزی ماکزیمم Z

از شرط مرز متقارن (symmetry) استفاده شده است. همان طور که گفته شد در این حالت شرایط قسمت خارج از شبکه ی حل دقیقاً مشابه شرط روی مرز در نظر گرفته می شود.



شکل ۳-۹. شرایط مرزی Mesh block ها

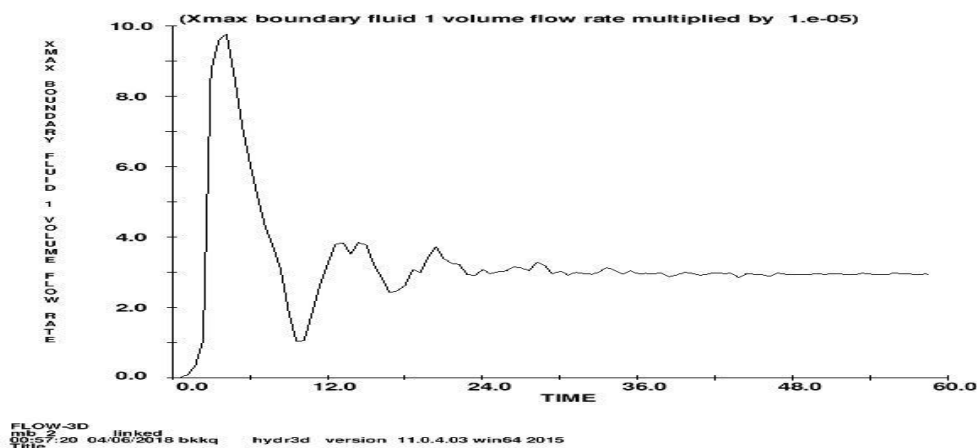
۳- ۷ زمان شبیه سازی

در نرم افزار حالت های متفاوتی برای پایان محاسبه وجود دارد که بسته به نوع مدل سازی می توان از آن ها استفاده کرد. می توان زمان مدل سازی را به صورت مستقیم به نرم افزار داد، این زمان باید به میزانی باشد که جریان پایدار شده و میزان دبی تخلیه به یک مقدار ثابت رسیده باشد. در این حالت نزدیک به حالت پایداری پیغامی مطابق شکل ۳-۱۰ از نرم افزار دریافت می شود:

sim_time	cycle	delt	dt_stbl/code	iter	res/epsi	volume	%loss	frac	el_time	%FE	clk_time
5.37588E+01	46130	2.80E-03	2.80E-03/cz	1	4.14E-01	1.4497E+01	-8.33E+00	0.75	1:18:25:31	98	15:57:18
<pre> ===== mentor tip ===== solution is nearly steady: variation from the mean is less than 1.8715E-01 % at t= 5.41063E+01 ===== </pre>											
5.41970E+01	46295	2.33E-03	2.33E-03/cy	2	1.21E-01	1.4493E+01	-8.36E+00	0.75	1:18:35:33	95	16:07:19
5.46497E+01	46463	2.79E-03	2.79E-03/cx	2	4.47E-01	1.4494E+01	-8.40E+00	0.75	1:18:45:35	98	16:17:21

شکل ۳-۱۰. پیغام پایداری در نرم افزار

با توجه به تحقیقات قبلی و چندین بار تکرار شبیه سازی، مدت زمان ۶۰ ثانیه برای مدل سازی در نظر گرفته می شود. مشاهده ی نتایج و دریافت پیغام فوق در چندین حالت اولیه نشان می دهد که پس از حدود ۵۰ ثانیه از محاسبه نتایج تقریباً به حالت پایدار می رسد. پس از پایان مدل سازی اولیه با توجه به افزایش حالت های مدل سازی در قسمت حساسیت سنجی زمان انجام مدل سازی در حدود ۵۰ کاهش داده شد.



شکل ۳-۱۱. دبی خروجی بر حسب زمان

۳ - ۸ تعریف شرایط اولیه

شرایط اولیه می تواند حضور یک ناحیه پر از سیال در داخل شبکه ی حل در زمان شروع شبیه سازی، نحوه ی توزیع فشار و یا درجه حرارت اولیه محیط باشد. در این قسمت از شبیه سازی بایستی نحوه ی

توزیع فشار انتخاب شود. در شرایط معمولی شبیه سازی اغلب گزینه‌ی Hydrostatic Pressure in Z direction انتخاب می‌شود.

۳-۹ مدل آشفتگی

با توجه به اینکه نتایج مدل‌سازی بر اساس میزان دبی است، این امکان وجود دارد که به نظر برسد آشفتگی بودن مدل جریان تأثیر زیادی بر نتایج ندارد. اگرچه شاید استفاده از مدل آشفتگی نتایج دبی را تغییری ندهد ولی ممکن است در نمایش عملکرد هیدرولیکی جریان در سرریز تأثیر داشته باشد بنابراین با توجه به تحقیقات پیشین این شبیه‌سازی، با استفاده از مدل آشفتگی RNG صورت گرفته است. پس از تأیید نتایج مدل‌سازی در پایان صحت‌سنجی، نتایج مدل‌سازی برای حالت‌های مختلف: $k-\epsilon$ ، RNG و LES و حالت جریان آرام نیز مورد بررسی و مقایسه قرار خواهد گرفت.

۳-۱۰ روش عددی تحلیل مدل

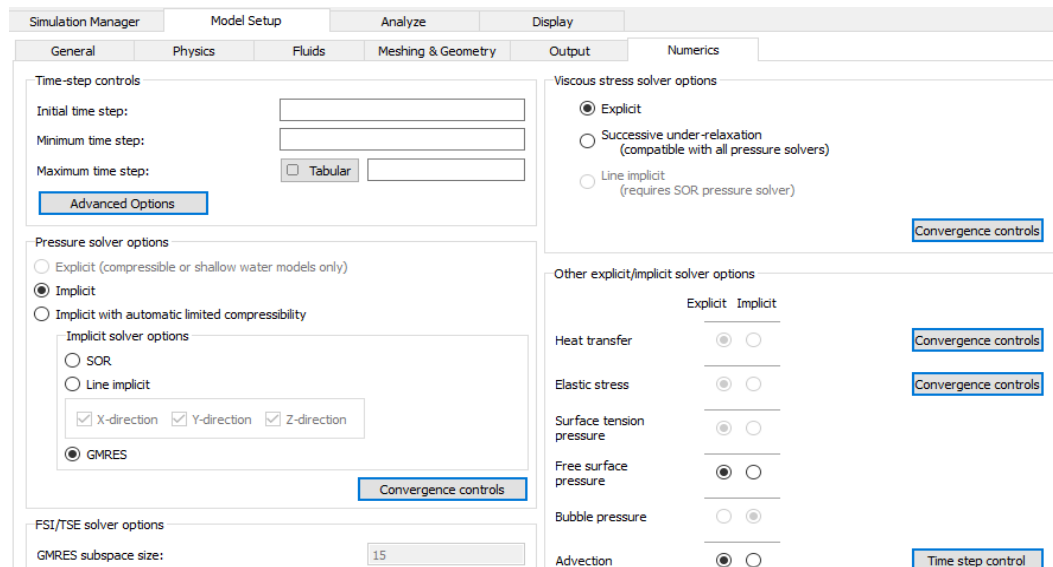
در نرم‌افزار FLOW 3D سه تحلیل‌گر خطی برای محاسبه‌ی فشار از سیستم معادلات خطی پیوستگی وجود دارد:

- I. SOR (Successive Over Relaxation)
- II. ADI (Algorithm Direction Implicit)
- III. GMRES (Generalized Minimal Residual Solver)

در الگوی GMRES، سیستم معادلات به‌صورت هم‌زمان با یک تکنیک تکرار بر روی میدان محاسباتی حل می‌شود. الگوی SOR بسیار ساده است و حافظه‌ی بیشتری نیاز دارد و به‌طور کلی برای رسیدن به پاسخ، تعداد تکرار بیشتری می‌طلبد. در الگوی GMRES تعداد تکرارها برای همگرایی بسیار کمتر است (حدود 10 برابر کمتر از الگوی SOR). تحقیقات نشان داده است که برای بسیاری از مسائل، این الگو کارآمدتر است. در این تحقیق نیز از الگوی

GMRES با گام‌های زمانی ۰,۰۱ اعمال گشته است تا با کاهش تکرار برای همگرایی، موجب صرفه-

جویی در آنالیز شود. شکل ۳-۱۲ نشان دهنده‌ی این قسمت می‌باشد.



شکل ۳-۱۲. روش عددی GMRES برای تحلیل مدل

۱۱-۳ بررسی نتایج و صحت سنجی

همان‌طور که پیش‌تر نیز اعلام شد مدل‌سازی برای مدت 60 ثانیه در نرم‌افزار انجام گرفت و نتایج بر اساس میزان دبی عبوری از روی تاج سرریز در هدهای مختلف ثبت شده است. در پایان شبیه‌سازی دبی عبوری از سرریز کنگره‌ای مطابق شکل ۳-۱۱ به مقدار ثابتی می‌رسد.

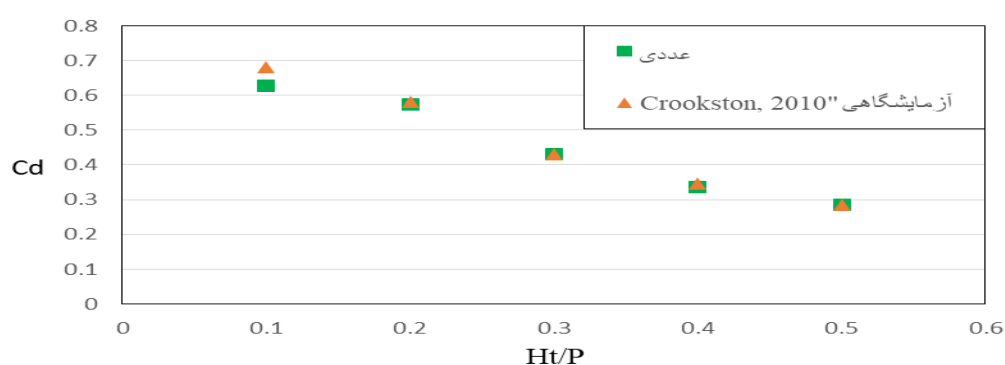
برای صحت سنجی نتایج به‌دست‌آمده از مدل عددی با نتایج آزمایشگاهی در جدول مورد مقایسه قرار گرفته است. میزان خطای مدل‌سازی با روش زیر محاسبه می‌شود:

$$\text{خطا} = ((Q_{\text{num}} - Q_{\text{exp}}) / Q_{\text{exp}}) * 100 \quad (۲-۳)$$

جدول ۳-۳. مقایسه مقادیر دبی حاصل از مدل عددی با دبی آزمایشگاه

Ht/p	Q (m3/s) آزمایشگاهی (Crookston, 2010)	عددی Q (m3/s)	خطا %
۰,۱	۰,۰۸۹۳	۰,۰۸۲۴	۷,۷۲
۰,۲	۰,۲۱۵۶	۰,۲۱۳۷	۰,۹۰
۰,۳	۰,۲۹۳۷	۰,۲۹۳۵	۰,۰۶۸
۰,۴	۰,۳۶۲۸	۰,۳۵۴۴	۲,۳۱
۰,۵	۰,۴۱۸۸	۰,۴۲۰۳	۰,۳۴

مقایسه‌ی دبی محاسبه‌شده و دبی اندازه‌گیری شده و مقدار خطای ناشی از حل عددی با نرم‌افزار FLOW 3D، که در جدول ۳-۳ گردآوری شده است، بیان می‌کند که تطابق بسیار مناسبی به خصوص در هدهای بالا بین مدل عددی و مدل آزمایشگاهی وجود دارد. همچنین شکل ۳-۱۳ نشان‌دهنده‌ی مقایسه‌ی بین ضریب گذردهی سرریز برحسب نسبت Ht/p در آزمایشگاه و مدل عددی است. این نمودار نیز نشان می‌دهد که مدل عددی به کار رفته، با نتایج تجربی انطباق قابل‌قبولی دارد.



شکل ۳-۱۳. مقایسه‌ی نتایج مدل عددی با نتایج ارائه‌شده توسط کروکستون

۳-۱۲ تأثیر مدل آشفتگی

همان‌طور که پیش‌تر نیز گفته شد نرم‌افزار FLOW 3D از چندین مدل آشفتگی برای مدل‌سازی استفاده می‌کند. پیش از شبیه‌سازی همه مدل‌ها، یکی از مدل‌ها در $\frac{H_t}{p} = 0.3$ به عنوان مدل پایه انتخاب و تأثیر مدل آشفتگی بر شبیه‌سازی نرم‌افزار سنجیده می‌شود. در جدول زیر نتایج دبی در حالت‌های مختلف مقایسه شده است. در این بررسی مدل‌های دو معادله‌ای K-ε و مدل RNG و حالت جریان آرام و LES مقایسه شده و از مدل طول اختلاط پرانتل و k-ω صرف‌نظر گشته است.

جدول ۳-۴. تأثیر مدل آشفتگی بر خطای نرم‌افزار در محاسبه دبی

خطا %	آزمایشگاهی ($\frac{m^3}{s}$)	عددی ($\frac{m^3}{s}$)	مدل آشفتگی
۱,۶	۰,۲۹۳۷	۰,۲۸۹	K-ε
۰,۰۶۸	۰,۲۹۳۷	۰,۲۹۳۵	RNG
۱,۱	۰,۲۹۳۷	۰,۲۹۷	LAMINAR
۰,۲۳	۰,۲۹۳۷	۰,۲۹۳	LES

میزان دبی برای مدل‌های آشفتگی شبیه‌سازی شده استخراج و در جدول ۳-۴ گردآوری شده است. همان‌طور که از نتایج موجود در جدول مشخص می‌باشد، انواع مدل‌های آشفتگی خطای نسبتاً کمی را ایجاد کرده است که می‌توان نتیجه گرفت که دبی عبوری از سرریز تقریباً مستقل از مدل آشفتگی می‌باشد که با نتایج ساوج و همکاران تطابق دارد [Savage B.M et al, 2016].

۳ - ۱۳ جمع‌بندی و خلاصه‌ی فصل

در این فصل ابتدا مشخصات مدل آزمایشگاهی مطالعه شده توسط کروکستون در سال ۲۰۱۰ ارائه داده شد. پس از معرفی مشخصات مدل، به تنظیمات نرم‌افزار و شرایط لازم برای مدل‌سازی اشاره گردید. سه بلوک شبکه‌بندی برای شبکه‌ی حل در نظر گرفته شد که در مجموع میزان تعداد سلول‌های شبکه‌ی حل حدود ۷۰۰۰۰۰۰ سلول می‌باشد. شبیه‌سازی به مدت ۶۰ ثانیه برای مدل انجام گرفت. نتایج مدل به صورت کمی بر اساس میزان دبی تخلیه در هدهای مختلف استخراج و در جدول ۳-۳ با میزان دبی آزمایشگاهی مقایسه شد. همان‌طور که مشهود بود میزان نتایج دارای تطابق مناسبی با مقادیر آزمایشگاهی می‌باشد به طوری که میزان ماکزیمم خطا تقریباً برابر ۷٪ و مینیمم آن کمتر از ۱٪ است. مدل آشفستگی استفاده شده برای شبیه‌سازی به طور پایه مدل RNG بوده و پس از آن با توجه به تأیید شدن مدل‌سازی انجام گرفته، به حساسیت سنجی آن پرداخته و تأثیرگذاری چند مدل آشفستگی مختلف بر روی آن مورد مطالعه قرار گرفت.

فصل چهارم

بیان مسئله و نتایج

۴-۱ مقدمه

در فصل قبل نتایج به دست آمده از دبی عبوری روی سرریز در مدل سازی عددی با مقادیر دبی عبوری مدل آزمایشگاهی صحت سنجی شد که تطابق مناسبی بین مدل آزمایشگاهی و عددی وجود داشت. در این فصل ابتدا تأثیر هندسه بر دبی عبوری از سرریز در چند حالت مختلف مورد بررسی قرار می گیرد و سپس نتایج مدل سازی در حالت های مختلف، استخراج و باهم مقایسه می گردند.

۴-۲ بیان مسئله

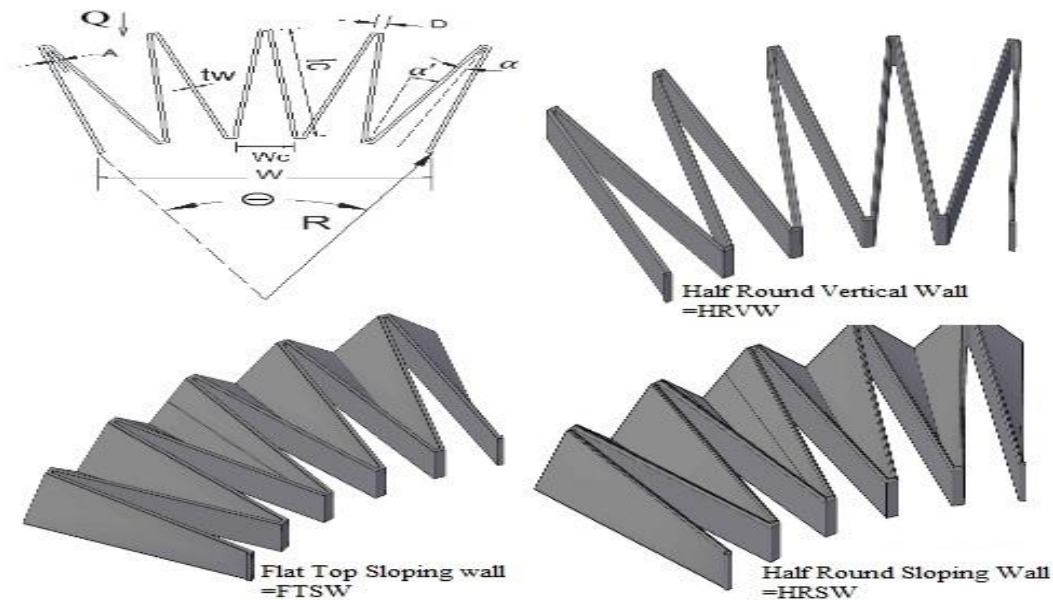
بعد از انتخاب بهترین شرایط برای حل و حساسیت سنجی مدل، جهت بررسی تأثیر هندسه ی سرریز بر میزان دبی عبوری از آن، جریان عبوری از سرریزهایی با هندسه های دوزنقه ای مثلثی، دایره ای و مستطیلی شکل که همگی آن ها دارای عرض (W) و ارتفاع (P) برابر هستند، در نرم افزار Autocad ساخته و به نرم افزار FLOW 3D وارد می شود. به دلیل مقایسه ی نتایج با هندسه ی مورد استفاده در قسمت صحت سنجی، مشخصات مخزن مدل ها دقیقاً منطبق بر مشخصات مخزن مدل کروکستون (۷,۳ متر * ۶,۷ متر * ۱,۵ متر) می باشد. مطابق با حالت پایه (شرایط صحت سنجی) شرایط مرزی و فیزیک مسئله اعمال می گردد. بار هیدرولیکی برای ده مقدار $\frac{H_T}{P}$ در بازه ی ۰,۰۵ تا ۰,۵ در مرز ورودی مخزن اعمال می گردد. همانطور که گفته شد، سرریزها در حالت قوسی قرار دارد و طول بازشدگی همه ی آن ها (عرض سرریز) ۱,۹۷ متر است که برابر با طول سرریز خطی مدل شده در همان دهانه می باشد. سرریزهای مثلثی، مستطیلی و دایره ای شکل با دیوارهای قائم و تاج نیم دایره ساخته شده اند و سرریز دوزنقه ای در سه حالت: دارای تاج نیم دایره و دیواره ی قائم (Half Round Vertical Wall=HRVW) و دارای تاج تخت و نیم دایره، با دیواره هایی با شیب ۰,۶۷ (شیب دیواره ها در داخل مخزن) ساخته شده است. به بیان دیگر سرریز دوزنقه ای با دیواره ی شیب دار با دو نوع تاج نیم دایره Half Round Sloping (Wall=HRSW) و تخت (Flat Top Sloping Wall=FTSW) مورد بررسی قرار گرفته است.

اطلاعات کامل مربوط به هندسه ی سرریزها در جدول ۴-۱ آمده است:

جدول ۴-۱. مشخصات سرریزهای مدل سازی شده

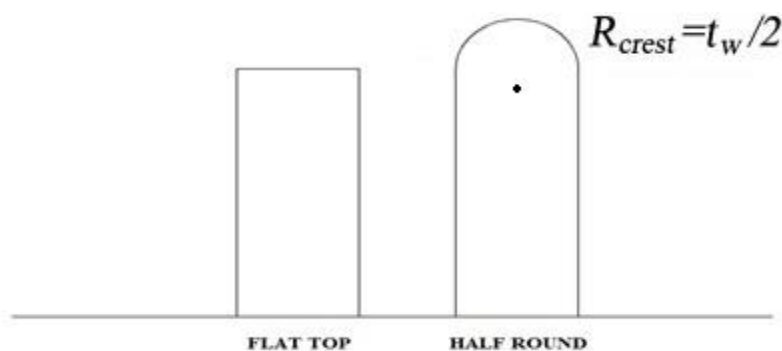
Model	1 (HRVW Trapezoidal Weir)	2 (HRSW Trapezoidal Weir)	3 (FTSW Trapezoidal Weir)	4 (Triangular 11 Weir)	5 (Triangular 24 Weir)	6 (Rectangular Weir)	7 (Circular 1 Weir)	8 (Circular 2 Weir)	9 (Linear Weir)
Cycle type	Trapezoidal	Trapezoidal	Trapezoidal	Triangular	Triangular	Rectangular	Circular	Circular	Linear
Crest shape	Half-Round	Half-Round	Flat-Top	Half-Round	Half-Round	Half-Round	Half-Round	Half-Round	Half-Round
α (°)	۶	۶	۶	۱۱	۲۴	-	-	-	-
θ' (°)	-	-	-	-	-	-	۹۰	۱۷۰	-
Wall	Vertical	Slope=0.67	Slope=0.67	Vertical	Vertical	Vertical	Vertical	Vertical	Vertical
Θ (°)	۵۰	۵۰	۵۰	۹۰	۵۰	۵۰	۵۰	۵۰	-
W(m)	۱,۹۷	۱,۹۷	۱,۹۷	۱,۹۷	۱,۹۷	۱,۹۷	۱,۹۷	۱,۹۷	۱,۹۷
l_c (m)	۱,۴۸۹	۱,۴۸۹	۱,۴۸۹	۱,۲۴	۰,۹۴۶	۱,۴۸۹	۰,۴۶۴	۰,۶۱۸	-
L_c (m)	۱۵,۳۷	۱۵,۳۷	۱۵,۳۷	۲۲,۳۲	۹,۴۶	۱۱,۹۴	۲,۳۲	۳,۰۹	۱,۹۷
P (m)	۰,۲۰۳۲	۰,۲۰۳۲	۰,۲۰۳۲	۰,۲۰۳۲	۰,۲۰۳۲	۰,۲۰۳۲	۰,۲۰۳۲	۰,۲۰۳۲	۰,۲۰۳۲
W_c (m)	۰,۳۳۵	۰,۳۳۵	۰,۳۳۵	۰,۲۲	۰,۳۸	۰,۳۳۵	۰,۴	۰,۴	-
t_w (m)	۰,۰۲۵۴	۰,۰۲۵۴	۰,۰۲۵۴	۰,۰۲۵۴	۰,۰۲۵۴	۰,۰۲۵۴	۰,۰۲۵۴	۰,۰۲۵۴	۰,۰۲۵۴
A(m)	۰,۰۲۵۴	۰,۰۲۵۴	۰,۰۲۵۴	-	-	۰,۴۴	-	-	-
D(m)	۰,۰۷۱۱	۰,۰۷۱۱	۰,۰۷۱۱	-	-	۰,۷۱	-	-	-
N	۵	۵	۵	۹	۵	۳	۵	۵	-
H_t/P	۰,۰۵-۰,۵	۰,۰۵-۰,۵	۰,۰۵-۰,۵	۰,۰۵-۰,۵	۰,۰۵-۰,۵	۰,۰۵-۰,۵	۰,۰۵-۰,۵	۰,۰۵-۰,۵	-۰,۵ ۰,۰۵

در شکل ۱-۴ پلان و نمای سه بعدی مدل‌های دوزنقه‌ای نشان داده شده است. همان‌طور که در شکل نیز مشخص می‌باشد تفاوت مدل دوم و سوم در نوع تاج آن‌ها می‌باشد.



شکل ۱-۴. نمای سه بعدی و پارامترهای موثر در سرریزهای دوزنقه‌ای (Trapezoidal weir)

در شکل ۲-۴ هندسه و اندازه‌ی شعاع تاج نیم‌دایره‌ای نشان داده شده است که شعاع تاج نصف اندازه‌ی ضخامت دیواره می‌باشد. همچنین تاج تخت که فقط در سرریز دوزنقه‌ای با دیواره‌های شیب‌دار استفاده شده، آورده شده است:

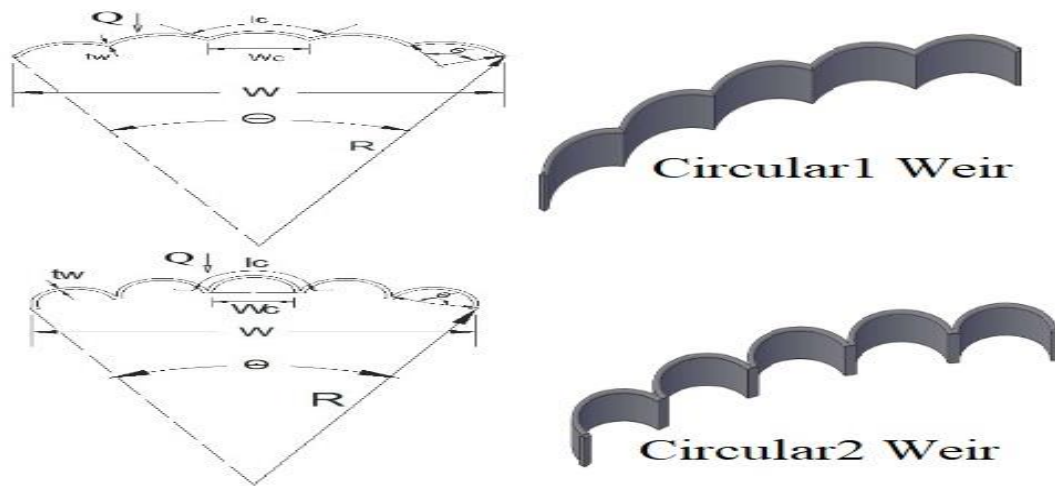


شکل ۲-۴. نوع و اندازه‌ی تاج

در شکل ۳-۴ پلان و نمای سه بعدی سرریزهای دایره‌ای شکل نمایش داده شده و اندازه‌ی زاویه‌ی

کمان هر سیکل در سرریزها با θ' نشان داده شده است. زاویه‌ی کمان در مدل Circular1 Weir، ۹۰

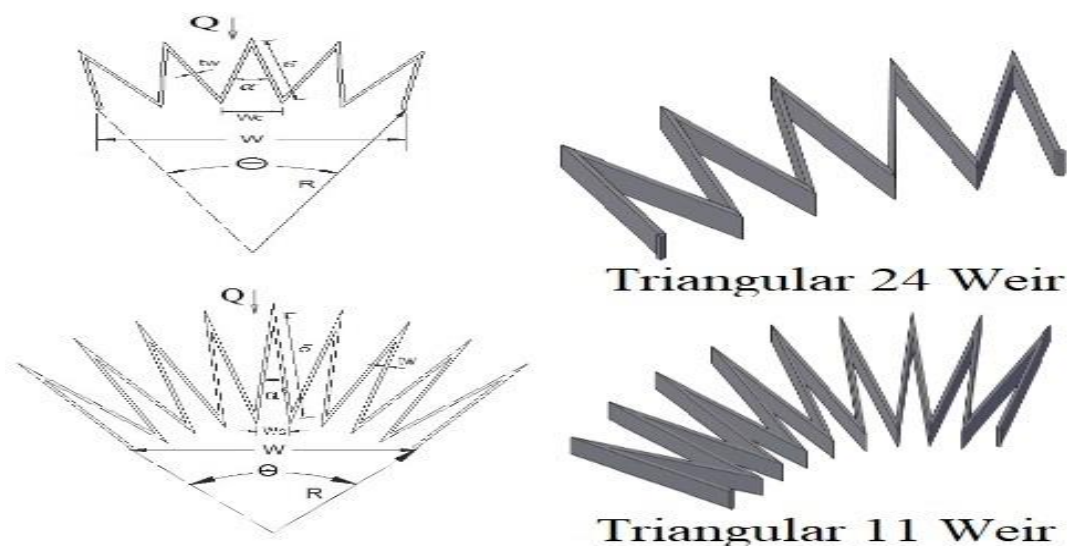
و در مدل Circular2 Weir ۱۷۰ درجه است.



شکل ۳-۴. نمای سه‌بعدی و پارامترهای مؤثر در سرریزهای دایره‌ای (Circular weir)

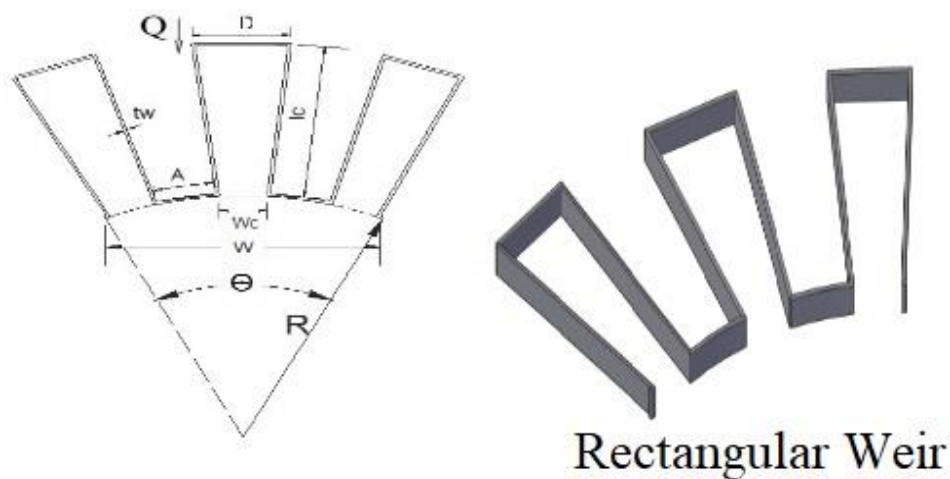
در شکل ۴-۴ پلان و نمای سه بعدی سرریزهای مثلثی مشخص و زاویه‌ی راس هر سیکل با α نشان

داده شده‌است.



شکل ۴-۴. نمای سه‌بعدی و پارامترهای مؤثر در سرریزهای مثلثی (Triangular weir)

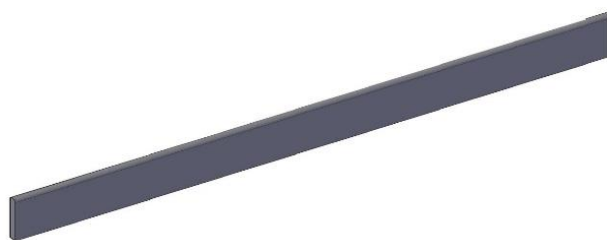
در شکل ۵-۴ پلان و نمای سه بعدی سرریز مستطیلی نشان داده شده است.



Rectangular Weir

شکل ۴-۵. نمای سه بعدی و پارامترهای موثر در سرریز مستطیلی (Rectangular weir)

در شکل ۴-۶ نمای سه بعدی سرریز خطی که طولی برابر با عرض سرریزهای کنگره‌ای و تاج نیم دایره‌ای دارد آورده شده است.



شکل ۴-۶. نمای سه بعدی سرریز خطی (Linear Weir)

همان‌طور که مشخص است در تحقیق حاضر تمام هندسه‌های سرریز کنگره‌ای (Trapezoidal, Triangular, Rectangular, Circular) بر روی قوسی به سمت داخل مخزن جایگذاری می‌شوند. به این حالت از قرار گیری اصطلاحاً Arced projecting گفته می‌شود.

فرمول محاسبه‌ی طول هر سرریز مطابق زیر می‌باشد:

جدول ۴-۲. محاسبه‌ی طول سرریز

مدل	هندسه	معادله L_c
1	Trapezoidal	$N(A+D+2lc)$
2	Trapezoidal	$N(A+D+2lc)$
3	Trapezoidal	$N(A+D+2lc)$
4	Triangular	$N(2lc)$
5	Triangular	$N(2lc)$
6	Rectangular	$N(D+2lc)+(N-1)(A)$
7	Circular	$N(lc)$
8	Circular	$N(lc)$
9	Linear	W

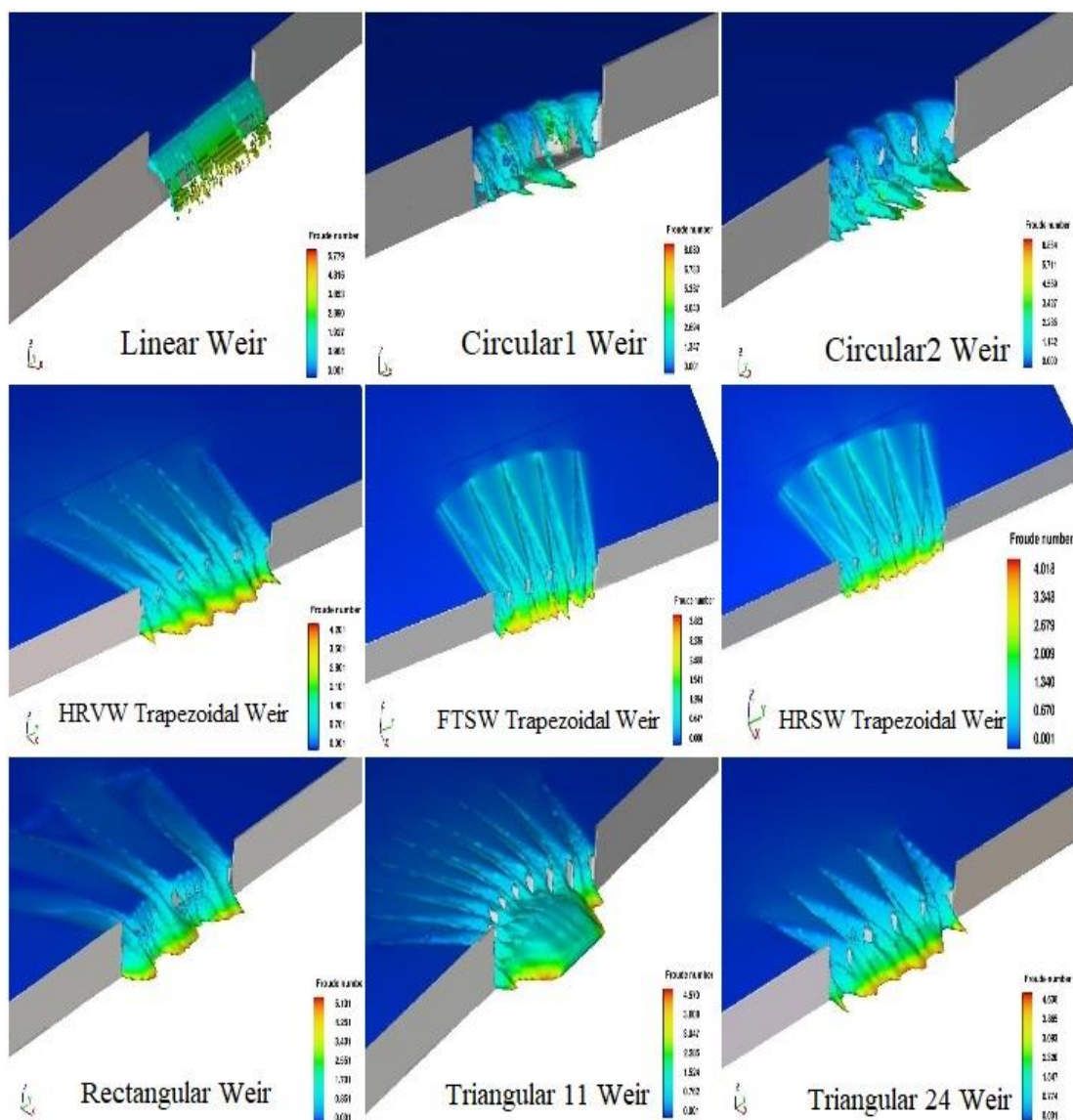
۴ - ۳ نتایج

بعد از انجام شبیه‌سازی برای هر نه مدل عددی که در مجموع تعداد ۹۰ شبیه‌سازی می‌باشد، نتایج

حاصل شده از نرم افزار FLOW 3D به شرح زیر ارائه می‌گردد.

۴ - ۳ - ۱ مقایسه‌ی جریان عبوری از سرریز

جریان عبوری بر روی سرریزهای کنگره‌ای در هنگام شبیه‌سازی در شکل ۴-۷ مشاهده می‌شود.



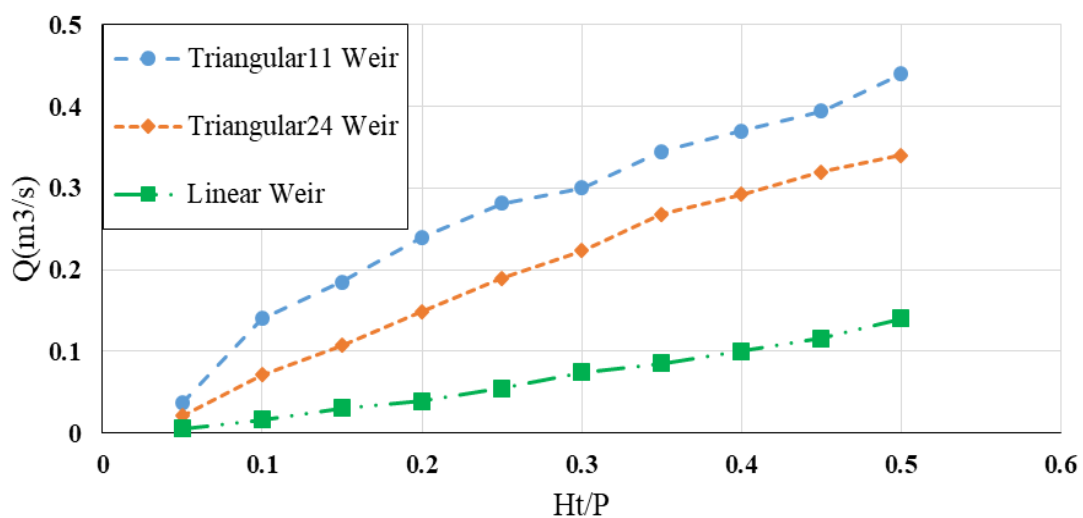
شکل ۴-۷. جریان عبوری از سرریزها

مقایسه‌ی ریزش جریان از روی سرریزها در شکل ۴-۷ حاکی از آن است که استفاده از سرریزهای کنگره‌ای در مقایسه با سرریز خطی از مقدار هوای محبوس در زیر تیغه‌های ریزشی می‌کاهد. مومنتوم ناشی از چرخش هوا در زیر تیغه ریزشی سبب ایجاد نوعی مقاومت در ریزش آزاد جریان و کاهش جریان عبوری از روی سرریز می‌گردد. استفاده از سرریزهای کنگره‌ای، کاهش مقدار مومنتوم وارده توسط هوای چرخشی در زیر تیغه، در نتیجه افزایش حجم جریان عبوری را در پی داشته است.

۴-۴ مقایسه‌ی منحنی دبی - $\frac{H_t}{P}$ در مدل‌های مختلف

۴-۴-۱ سرریز مثلثی

در نمودار شکل ۴-۸ مقدار دبی عبوری برای سرریز خطی (Linear Weir)، سرریز قوسی مثلثی با زاویه‌ی رأس ۱۱ درجه (Triangular 11 Weir) و سرریز قوسی مثلثی با زاویه‌ی رأس ۲۴ درجه (Triangular 24 Weir) برحسب $\frac{H_t}{P}$ های مختلف به‌وسیله‌ی مدل‌سازی عددی نشان داده‌شده است:

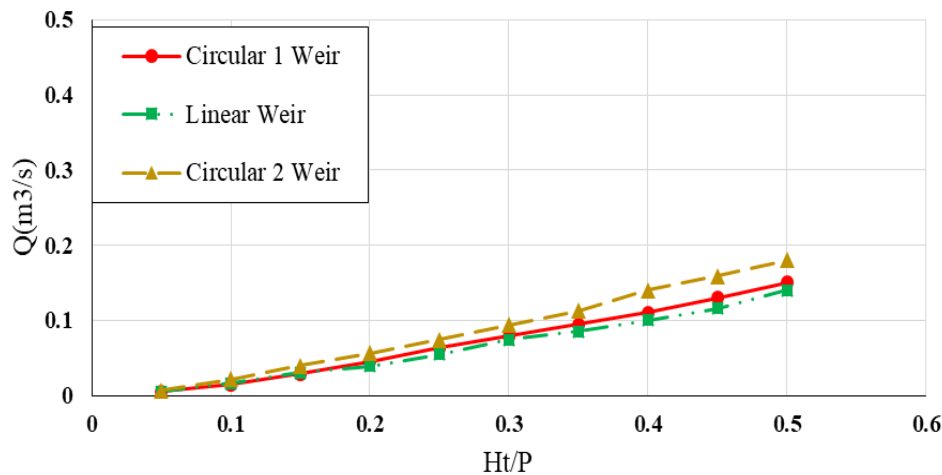


شکل ۴-۸. مقایسه‌ی دبی سرریزهای مثلثی و خطی

با توجه به شکل در مقایسه‌ی سرریز خطی و سرریزهای Triangular 11 Weir و Triangular 24 Weir که به ترتیب دارای ۹ و ۵ سیکل هستند، مشاهده می‌شود که در هر دو سرریز مثلثی شکل در پلان با افزایش مقدار هد مقدار دبی نیز بیشتر می‌شود اما همان‌طور که نتایج نشان می‌دهند دبی در یک هد ثابت برای سرریز با زاویه رأس ۱۱ درجه، مقدار بیشتری نسبت به سرریز با زاویه رأس ۲۴ درجه دارد و البته هردوی این نوع سرریزها به‌مراتب دبی بیشتری نسبت به سرریز خطی از خود عبور می‌دهند.

۴-۴-۲ سرریز دایره‌ای

نمودار شکل ۴-۹ مقدار دبی عبوری برای سرریز خطی، سرریز قوسی دایره‌ای شکل با lc برابر با ۰,۴۶ متر (Circular 1 Weir) و lc برابر با ۰,۶۱ متر (Circular 2 Weir) را برحسب $\frac{H_t}{P}$ های مختلف نشان می‌دهد.

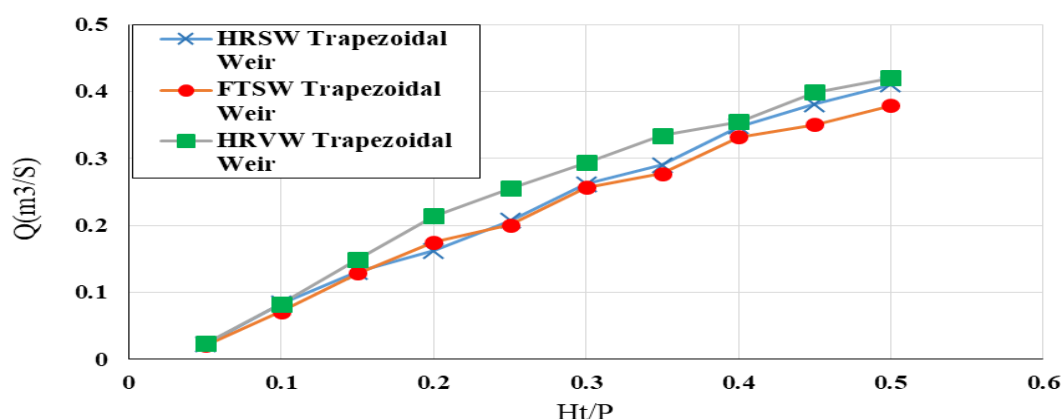


شکل ۴-۹. مقایسه‌ی دبی سرریزهای دایره‌ای و خطی

همان‌طور که در نمودار مشاهده می‌شود سرریز دایره‌ای شکل که دارای طول lc بیشتری است، دبی بیشتری نسبت به سرریز دایره‌ای با طول کمان کمتر و سرریز خطی عبور می‌دهد. لیکن هر دو سرریز دایره‌ای شکل با درصد بسیار پایینی دبی را نسبت به سرریز خطی افزایش داده‌اند. مقایسه‌های به‌عمل‌آمده نشان داد که در دامنه‌های مورد بررسی، دبی عبوری از سرریزهای Circular 1 Weir و Circular 2 Weir نسبت به سرریز خطی به ترتیب ۶ درصد و ۲۴ درصد بیشتر می‌باشد.

۴-۳-۳ سرریز دوزنقه‌ای با دیواره‌ی شیب‌دار دارای تاج نیم‌دایره و تخت

نمودار مقایسه‌ی مقدار دبی عبوری بین سرریز دوزنقه‌ای دارای دیواره‌ی قائم با تاج نیم‌دایره (HRVW Trapezoidal Weir) و سرریز دوزنقه‌ای دارای دیواره‌ی شیب‌دار (شیب ۰٫۶۷) با تاج تخت (FTSW Trapezoidal Weir) و تاج نیم‌دایره (HRSW Trapezoidal Weir) برحسب $\frac{H_t}{P}$ های مختلف در شکل ۴-۱۰ نشان می‌دهد.

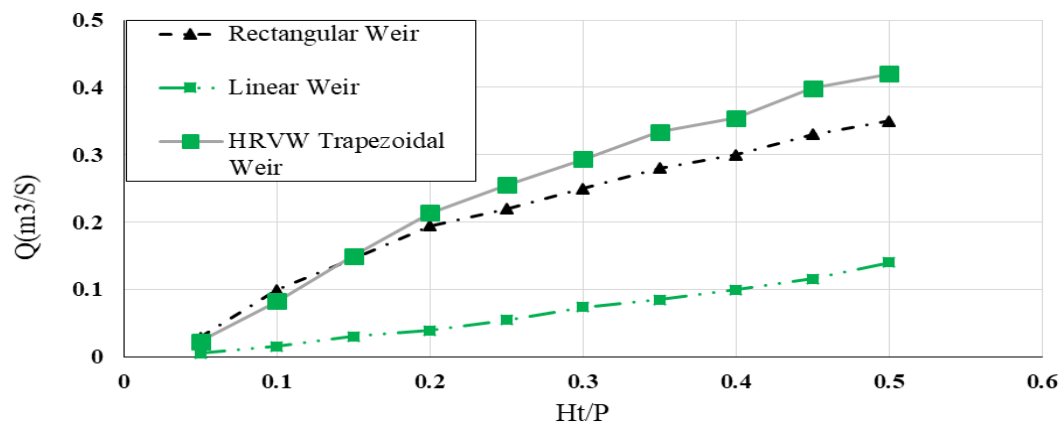


شکل ۴-۱۰. مقایسه‌ی دبی بین سرریز دوزنقه‌ای دارای دیواره‌ی قائم با تاج نیم‌دایره و سرریز دوزنقه‌ای دارای دیواره شیب‌دار با تاج تخت و تاج نیم‌دایره

سرریز شیب‌دار در دو حالت با تاج تخت و تاج نیم‌دایره‌ای مدل‌سازی شده که نتایج آن در نمودار شکل ۴-۱۰ آمده است. با توجه به نمودار مشخص می‌شود، با وجود اینکه شیب‌دار کردن دیواره‌ی سرریز تأثیر به‌سزایی در دبی عبوری از سرریز نداشته و حتی با درصد کمی دبی عبوری را کاهش می‌دهد، اما همان‌طور که در تحقیقات پیشین نیز آمده بود تاج نیم‌دایره می‌تواند درصد عبوری از سرریز کنگره‌ای با دیواره‌ی شیب‌دار را افزایش دهد. البته باید توجه داشت که این افزایش ناچیز در هدهای بالاتر پدیدار می‌شود و می‌توان گفت در هدهای پایین شکل تاج تأثیری شایانی در دبی عبوری از سرریز دوزنقه‌ای با دیواره‌ی شیب‌دار ندارد.

۴-۴-۴ سرریز دوزنقه‌ای و مستطیلی

شکل ۴-۱۱ نتایج حاصل شده برای مقایسه‌ی دبی عبوری سرریز خطی، سرریز قوسی مستطیلی شکل (Rectangular Weir) و سرریز قوسی دوزنقه‌ای (HRVW Trapezoidal Weir) برحسب $\frac{H_t}{P}$ های مختلف را به وسیله مدل سازی عددی نشان می‌دهد.



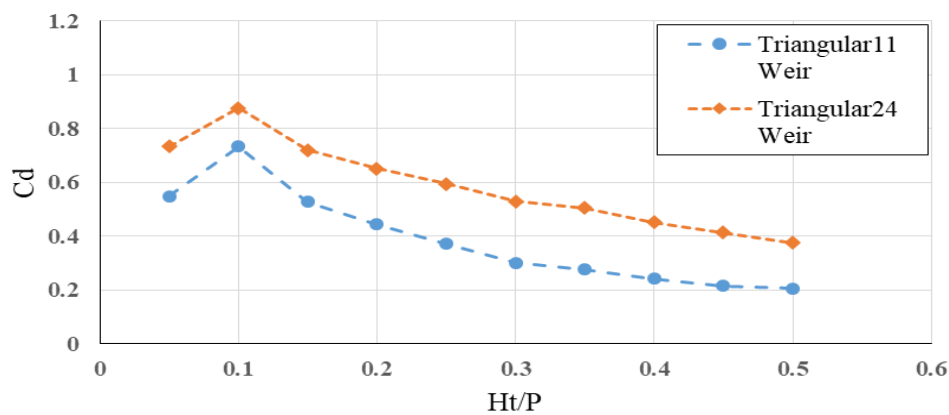
شکل ۴-۱۱. مقایسه‌ی دبی سرریزهای مستطیلی و دوزنقه‌ای و خطی

با توجه به نمودار در شکل ۴-۱۱، سرریز دوزنقه‌ای با ۵ سیکل میزان دبی بیشتری نسبت به سرریز مستطیلی با ۳ سیکل از خود عبور می‌دهد. در مقایسه‌ی این دو نوع سرریز و سرریز خطی درمی‌یابیم که سرریز دوزنقه‌ای حدوداً تا ۴,۲۵ برابر و سرریز مستطیلی تا ۴ برابر افزایش در میزان دبی عبوری نسبت به سرریز خطی دارند.

۴-۵ مقایسه منحنی ضریب گذردهی - $\frac{H_t}{P}$

۴-۵-۱ سرریز مثلثی

در نمودار شکل ۴-۱۲ ضریب گذردهی برای سرریز قوسی مثلثی با زاویهی رأس ۱۱ درجه (Triangular 11 Weir) و سرریز قوسی مثلثی با زاویهی رأس ۲۴ درجه (Triangular 24 Weir) برحسب مقادیر مختلف $\frac{H_t}{P}$ مشاهده می‌شود.



شکل ۴-۱۲. مقایسه‌ی ضریب گذردهی سرریزهای مثلثی

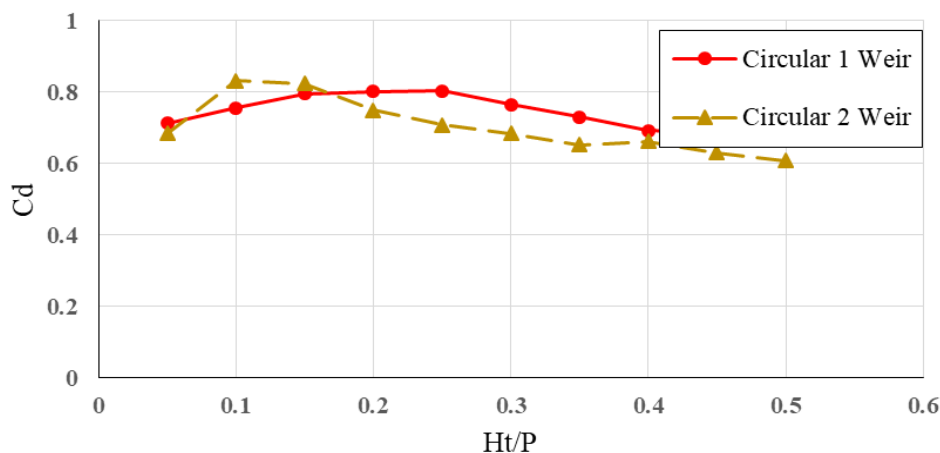
شکل ۴-۱۲ نشان می‌دهد که تأثیر هم‌زمان کاهش زاویه دیوار سرریز (α) و افزایش تعداد سیکل باعث کاهش ضریب گذردهی به ازای تمامی مقادیر بار هیدرولیکی می‌گردد. کاهش زاویه α ، انحراف دیواره‌ی سرریز از حالت عمود بر خطوط جریان بالادست و نیز افزایش ابعاد استغراق موضوعی را موجب شده که در نتیجه کاهش ضریب گذردهی را در پی دارد.

علاوه بر این می‌توان دریافت که در بارهای هیدرولیکی کم، سرریز کنگره‌ای مثلثی عملکرد مناسبی داشته و ضریب گذردهی روند صعودی دارد؛ اما با افزایش بار هیدرولیکی، تداخل لایه‌های جریان بر روی

عملکرد سرریز کنگره‌ای اثر منفی داشته و ضریب گذردهی پس از رسیدن به حداکثر مقدار خود، سیر نزولی می‌یابد.

۴-۵-۲ سرریز دایره‌ای

در نمودار شکل ۴-۱۳ مقدار ضریب گذردهی سرریز قوسی دایره‌ای شکل با l_c برابر با ۰,۴۶ متر (Circular 1 Weir) و l_c برابر با ۰,۶۱ متر (Circular 2 Weir) برحسب $\frac{H_t}{P}$ های مختلف نمایش داده شده است.

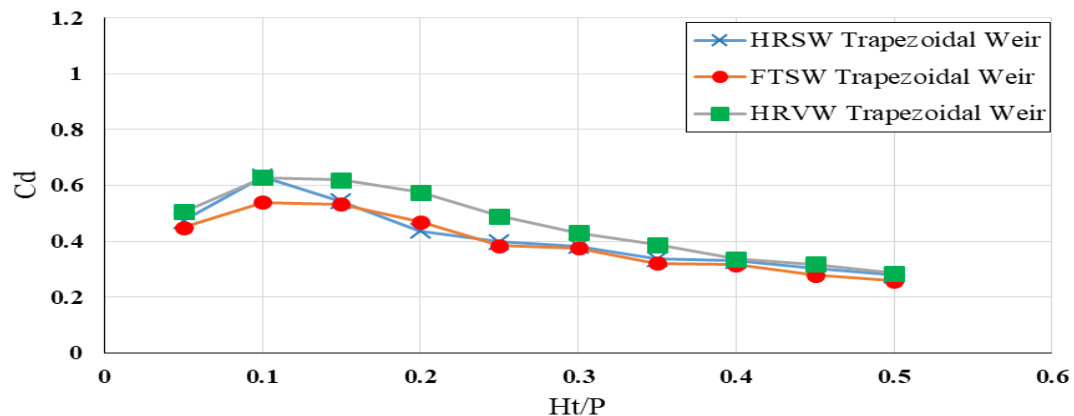


شکل ۴-۱۳. مقایسه‌ی ضریب گذردهی سرریزهای دایره‌ای

همان‌طور که در شکل مشاهده می‌گردد مقدار ضریب گذردهی برای هر دو مدل با l_c های (Circular 1 Weir) ۰,۴۶ و (Circular 2 Weir) ۰,۶۱ تقریباً از یک الگو تبعیت می‌نماید. در هر دو مدل با افزایش نسبت $\frac{H_t}{P}$ مقدار C_d افزایش می‌یابد تا به حد بیشینه خود برسد که این مقدار در l_c های ۰,۴۶ و ۰,۶۱ به ترتیب ۰,۸ و ۰,۸۳ می‌باشند. پس از آن مقدار ضریب گذردهی رو به کاهش است، به این معنی که با افزایش هد روی سرریز مقدار ضریب گذردهی به علت وجود جریان‌های تداخلی کاهش می‌یابد.

۴-۵-۳ سرریز دوزنقه‌ای با دیواره‌ی شیب‌دار دارای تاج نیم‌دایره و تخت

نمودار شکل ۴-۱۴ نشان‌دهنده‌ی مقایسه‌ی مقدار ضریب گذردهی بین سرریز دوزنقه‌ای دارای دیواره‌ی قائم با تاج نیم‌دایره (HRVW Trapezoidal Weir) و سرریز دوزنقه‌ای دارای دیواره‌ی شیب‌دار (شیب ۰٫۶۷) با تاج تخت (FTSW Trapezoidal Weir) و تاج نیم‌دایره (HRSW Trapezoidal Weir) برحسب $\frac{H_t}{P}$ های مختلف است.

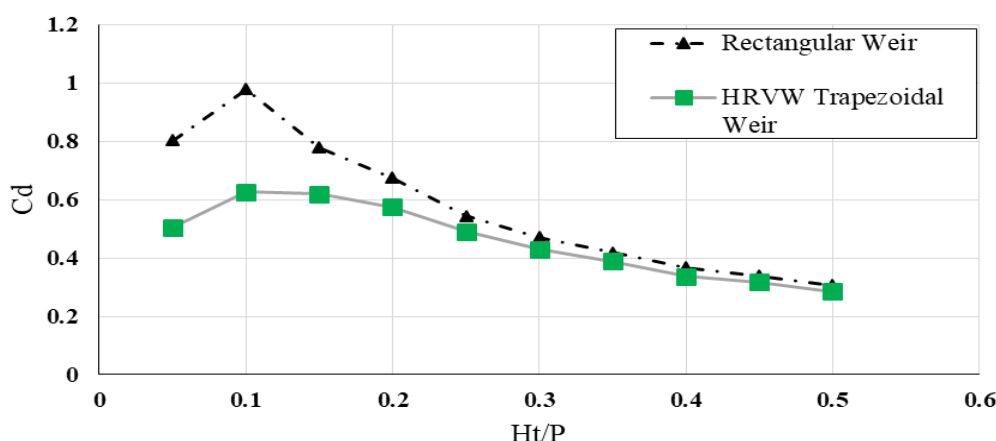


شکل ۴-۱۴. مقایسه‌ی ضریب گذردهی بین سرریز دوزنقه‌ای دارای دیواره‌ی قائم با تاج نیم‌دایره و سرریز دوزنقه‌ای دارای دیواره‌ی شیب‌دار با تاج تخت و تاج نیم‌دایره

همان‌طور که در نمودار نیز پیداست، با توجه به اینکه که در این سه سرریز L_c ثابت می‌باشد، مقایسه‌ی دقیقی بین ضریب گذردهی آن‌ها می‌توان انجام داد و مشخص می‌شود که با شیب‌دار کردن دیواره‌ها ضریب گذردهی سرریز کاهش می‌یابد؛ و در همین حالت استفاده از تاج نیم‌دایره‌ای به طور میانگین حدود ۴ درصد باعث بهبود این ضریب می‌شود. درواقع می‌توان گفت که به ازای H_t/p یکسان سرریز HRVW ضریب گذردهی بیشتری از سرریز HRSW و سرریز HRSW بیشتر از FTSW دارد.

۴-۵-۴ سرریز دوزنقه‌ای و مستطیلی

شکل ۴-۱۵ مقدار ضریب گذردهی سرریز قوسی مستطیلی شکل (Rectangular Weir) و سرریز قوسی دوزنقه‌ای (HRVW Trapezoidal Weir) را که هر دو دارای W_c برابر هستند، برحسب $\frac{H_t}{P}$ های مختلف نشان می‌دهد.



شکل ۴-۱۵. مقایسه‌ی ضریب گذردهی سرریزهای مستطیلی و دوزنقه‌ای

مقایسه بین سرریز کنگره‌ای دوزنقه‌ای با ۵ سیکل و مستطیلی دارای ۳ سیکل نیز نشان می‌دهد که در هدهای پایین تفاوت در ضریب گذردهی این دو نوع سرریز قابل توجه بوده ولی در هدهای بالا با وجود اینکه ضریب گذردهی سرریز کنگره‌ای مستطیلی بیشتر می‌باشد ولی این تفاوت چشمگیر نیست. بررسی‌ها نشان می‌دهد هر دو هندسه سرریز از یک روند تبعیت کرده و در $\frac{H_t}{P} = 0.1$ به مقدار ماکسیمم خود رسیده‌اند و از آن پس سیر نزولی یافته‌اند.

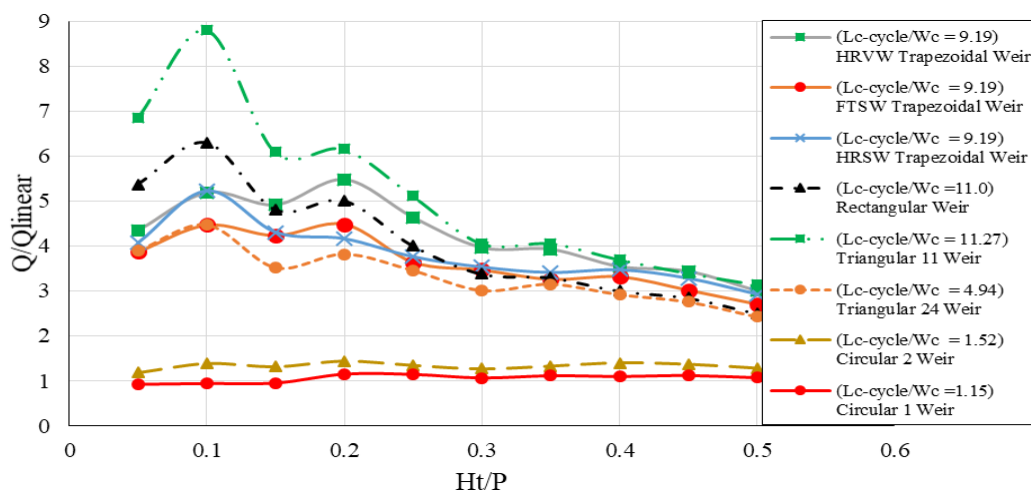
۴-۶ منحنی‌های کارایی

مفهوم کارایی به این معنا است که سرریز بتواند به ازای بار هیدرولیکی (H_t) و عرض سرریز (W) دبی بیشتری را عبور دهد. برخی از محققین سابق پارامتر کارایی را به صورت نسبت دبی سرریز به دبی سرریز خطی (Q/Q_{linear}) تعریف کردند. که در نمودار زیر برای تمامی هندسه‌های حاضر ($\frac{L_{C-cycle}}{W_c}$)

های مختلف) پارامتر Q/Q_{linear} بر حسب $\frac{H_t}{P}$ ترسیم گشته است (carollo2012). که در این نمودار C_d

ضریب گذردهی، $L_{C-cycle}$ طول یک سیکل از سرریز، W_c عرض یک سیکل و نسبت $\frac{L_{C-cycle}}{W_c}$ نسبت

بزرگنمایی طول سرریز می باشد.



شکل ۴-۱۶. تاثیر نسبت $\frac{L_{C-cycle}}{W_c}$ بر دبی عبوری

نمودار شکل ۴-۱۶ منحنی تاثیر نسبت $\frac{L_{C-cycle}}{W_c}$ بر نسبت $\frac{Q}{Q_{linear}}$ در سرریزهای کنگره ای قوسی را

به ازای مقادیر مختلف $\frac{H_t}{P}$ نشان می دهد. با توجه به این نمودار، این نتیجه حاصل می شود که برای یک

شرایط هندسه ای خاص با افزایش مقدار $\frac{L_{C-cycle}}{W_c}$ مقدار دبی نیز افزایش می یابد. علاوه بر این برای مقادیر

$\frac{L_{C-cycle}}{W_c}$ داده شده با افزایش $\frac{H_t}{P}$ مقدار $\frac{Q}{Q_{linear}}$ کاهش می یابد. به عبارت دیگر بزرگترین مزیت استفاده

از سرریزهای کنگره ای در برابر سرریزهای خطی در بار هیدرولیکی کم و نرخ بزرگنمایی طول زیاد،

می باشد. اما وقتی $\frac{L_{C-cycle}}{W_c}$ به سمت بی نهایت میل می کند، شکل سرریز کنگره ای بر جریان عبوری از

سرریز تاثیری نداشته و $\frac{Q}{Q_{linear}}$ به سمت ۱ میل می کند. به عبارت دیگر با افزایش بار هیدرولیکی،

کارایی انواع سرریزهای کنگره ای در محدوده ی مورد مطالعه، کاهش می یابد. این بدان معناست که با

افزایش بار هیدرولیکی، عوامل کاهنده ضریب گذردهی همچون استغراق موضعی، باعث می شوند که

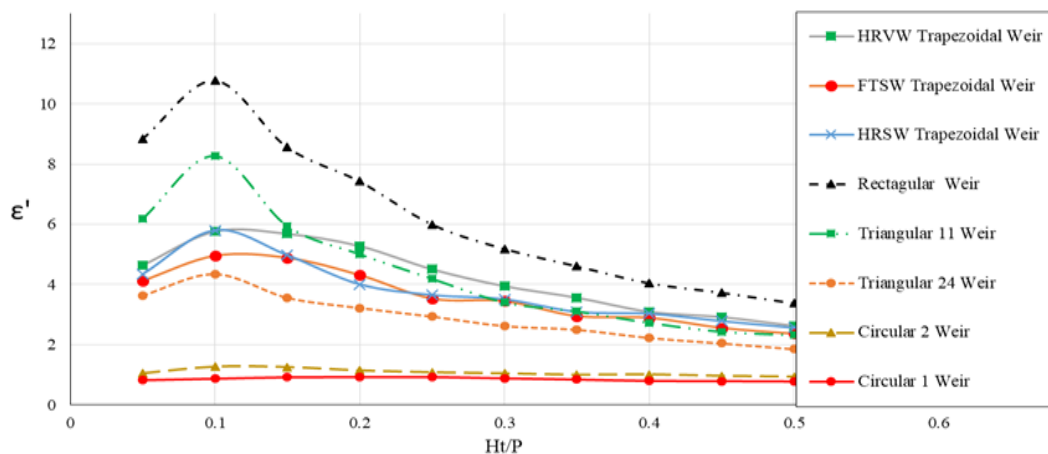
مزایای کنگره‌ای کردن سرریز رو به زوال نهد؛ به این نحو که در مقادیر خیلی بالای $\frac{H_t}{p}$ سرریز کنگره‌ای همچون یک سرریز خطی عمل خواهد کرد.

از نمودار این گونه برداشت می‌شود که برای نیل به مزایای کنگره‌ای کردن نیاز است که در بهترین حالت از محدوده‌ی بارهای هیدرولیکی مورد بررسی به ترتیب سرریز کنگره‌ای مثلثی با زاویه‌ی رأس ۱۱ درجه و بعد از آن سرریز کنگره‌ای مستطیلی، دوزنقه‌ای، مثلثی با زاویه رأس ۲۴ و در آخر سرریز منحنی شکل در پلان مورد استفاده قرار گیرد.

در بارهای هیدرولیکی پایین عملکرد سرریز کنگره‌ای مستطیلی (Rectangular Weir) بهتر از دوزنقه‌ای (Trapezoidal Weir HRVW) می‌باشد اما در هدهای بالاتر این عملکرد معکوس شده و دوزنقه‌ای عملکرد مقبول‌تری نسبت به مستطیلی دارد. در واقع نمودار ۴-۱۶ نشان می‌دهد، با وجود این که در هدهای پایین کارایی سرریز مستطیلی در رتبه‌ی دوم قرار دارد ولی کارایی آن در هدهای بالا به میزان زیادی کاهش می‌یابد و می‌توان گفت که در هدهای بالا کارایی این نوع سرریز تقریباً فقط از سرریزهای دایره‌ای شکل بیشتر است.

در کنار این موضوع، کروکستون و تولیس (۲۰۱۳) با هدف ساده‌سازی و مستقل ساختن عملکرد سرریز از دبی سرریز خطی، پارامتر کارایی سیکل را به صورت زیر تعریف کردند:

$$\varepsilon' = C_d * \frac{L_{C-cycle}}{w_C} \quad (۱-۴)$$



شکل ۴-۱۷. مقایسه‌ی تاثیر سیکل در برابر $\frac{H_t}{P}$ برای سرریزها بر اساس کار کروکستون (Crookston 2013)

در شکل ۴-۱۷ مقادیر ϵ' برای داده‌های آزمایشگاهی به عنوان تابعی از $\frac{H_t}{P}$ نشان داده شده است. به عبارت دیگر برای محاسبه‌ی تأثیرات C_d و $L_{C-cycle}$ بر ظرفیت دبی و ارائه‌ی راهنمایی در انتخاب سرریز، کارایی سیکل معرفی می‌شود که نشان دهنده‌ی دبی عبوری در هر سیکل (در یک مقدار خاص H_t) برای هندسه‌ی سرریز کنگره‌ای می‌باشد.

داده‌ها نشان می‌دهد که افزایش طول سرریز بیشتر از کاهش C_d در کارایی سیکل تاثیر دارد. همچنین شکل ۴-۱۷ نشان می‌دهد که بیشترین مقدار ϵ' در مقادیر نسبتا پایین $\frac{H_t}{P}$ رخ می‌دهد. با توجه به معادله‌ی ۴-۱ با افزایش طول، مقدار ϵ' افزایش می‌یابد و ϵ' ‌های افزایش یافته، با زیاد شدن $\frac{H_t}{P}$ کاهش می‌یابند.

همان‌طور که از داده‌های نمودار مشخص است با وجود این که در هدهای پایین در سرریز مثلثی با زاویه‌ی راس ۱۱ درجه که دارای ۹ سیکل (Triangular 11 Weir) و سرریز مستطیلی که دارای ۳ سیکل (Rectangular Weir) هستند، تاثیر مثبت طول یک سیکل به عرض آن به میزان زیادی نسبت به دیگر سرریزها بیشتر می‌باشد، اما در هدهای بالا همین طول بیشتر به طور چشم گیری سبب تداخل جریان و کاهش کارایی این دو سرریز می‌شود.

در مقایسه‌ی سه سرریز ذوزنقه‌ای که دارای طول‌های برابر هستند، در هر دو نمودار در شکل‌های ۱۶-۴ و ۱۷-۴، این شکل تاج و شیب دیواره است که تاثیر خود را بر ضریب گذردهی و متعاقبا کارایی سرریز می‌گذارد. همان‌طور که از نمودار مشخص است شیب‌دار کردن دیواره سرریز ذوزنقه‌ای در هدهای پایین از کارایی آن می‌کاهد ولی در هدهای بالا تاثیر چشم‌گیری بر کارایی سرریز ندارد.

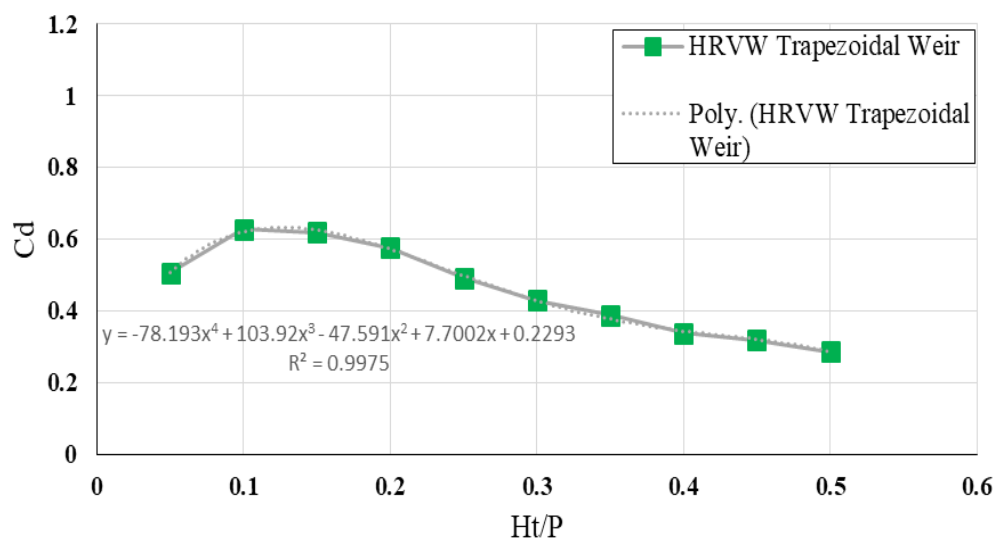
می‌توان از هر دو نمودار این‌طور نتیجه‌گیری کرد که سرریز مثلثی با زاویه‌ی راس ۲۴ درجه (Triangular 24 Weir) با توجه به $\frac{L_{C-cycle}}{w_c}$ کمتر نسبت به سرریز با زاویه‌ی راس ۱۱ درجه (Triangular 11 Weir) کارایی کمتری دارد.

هر دو سرریز دایره‌ای شکل (Circular 1 Weir و Circular 2 Weir) همانند آن‌چه در نمودار ۴-۱۶ دیده شد، کمترین کارایی را نسبت به دیگر سرریزها دارند.

توجه به این نکته ضرورت دارد که مقدار ϵ' فقط عملکرد راندمان دبی را در هر چرخه ارزیابی می‌کند و در انتخاب طراحی سرریز کنگره‌ای، مطالعات امکان‌سنجی (مانند هزینه ساخت و ساز، تاثیرات محیطی و مسائل مربوط به مجوز) توصیه می‌شود.

۴-۷ فرمول محاسبه C_d

در این قسمت روابط ریاضی برای تعیین ضریب گذردهی بر حسب $\frac{H_t}{P}$ برای هر یک از سرریزهای ذکر شده ارائه می‌گردد. با توجه به مدل‌سازی‌های عددی انجام گرفته برای سرریزهای مختلف می‌توان با استفاده از رگرسیون خطی ارتباطی بین ضریب گذردهی و هد آبی تعیین نمود. با برازش دادن منحنی درجه ۴ ذکر شده در رابطه ۲-۴ روی هر یک از سرریزهای دوزنقه‌ای، مثلثی، دایره‌ای و مستطیلی روابطی برای هر یک از این سرریزها به دست می‌آید که به عنوان نمونه نمودار و معادله‌ی مدل ۱ (سرریز دوزنقه با دیواره قائم و تاج نیم دایره Trapezoidal Weir HRVW) در شکل زیر مشخص می‌باشد.



شکل ۴-۱۸. معادله‌ی پیش بینی C_d

معادله‌ی بدست آمده برای پیش بینی تغییرات C_d نسبت به $\frac{H_t}{P}$ برای سرریزهای کنگره‌ای انحنادار، به شرح زیر می‌باشد:

$$C_d = -A_0\left(\frac{H_t}{P}\right)^4 + A_1\left(\frac{H_t}{P}\right)^3 - A_2\left(\frac{H_t}{P}\right)^2 + A_3\left(\frac{H_t}{P}\right) + A_4 \quad (۲-۴)$$

که ضرایب موجود و ضریب همبستگی معادلات برای هر هشت مدل در جدول ۳-۴ آمده است:

جدول ۳-۴. ضرایب معادلات C_d

Model	A_0	A_1	A_2	A_3	A_4	R^2
1(Trapezoidal HRVW Weir)	۷۸,۱۹۳	۱۰۳,۹۲	۴۷,۵۹۱	۷,۷۰۰۲	۰,۲۲۹۳	۰,۹۹۷۵
2(HRSW Trapezoidal Weir)	۱۲۸,۲۲	۱۵۲,۱۵	۶۰,۶۶۸	۸,۴۵۱	۰,۲۰۳۶	۰,۹۳۸۳
3(FTSW Trapezoidal Weir)	۸۴,۶۸۶	۱۰۵,۴۸	۴۴,۸۳۶	۶,۷۰۶۴۲	۰,۲۱۶۲	۰,۹۸۵۶
4(Triangular 11 Weir)	۱۴۱,۹۶	۱۷۰,۰۱	۶۷,۳۶۸	۸,۷۲۷۸	۰,۲۸۹۹	۰,۹۴۴۳
5(Triangular 24 Weir)	۱۰۸,۰۵	۱۲۸,۳۵	۵۱,۱۶۵	۶,۶۵۵۳	۰,۵۳۷۴	۰,۹۵۹۷
6(Rectangular Weir)	۱۶۳,۵۱	۱۹۷,۷۲	۷۹,۳۱۲	۱۰,۲۵۵	۰,۵۰۲۸	۰,۹۷۶۱
7(Circular1 Weir)	۱۸,۹۶۶	۱۲,۰۶۳	۱,۳۶۴۲	۱,۳۹۵۸	۰,۶۴۵۵	۰,۹۸۶۴
8(Circular2 Weir)	۱۱۳,۴۹	۱۳۸,۱۷	۵۷,۵۴۴	۸,۶۶۵۴	۰,۳۷۶۸	۰,۹۶۷۴

به منظور رسم منحنی‌ها و استخراج این معادلات و ضرایب مربوط از نرم افزار Excel2013 استفاده شده است. بر این اساس پس از وارد کردن داده‌های مورد نظر، منحنی‌های مختلفی از مجموعه نقاط داده شده عبور داده و سپس معادله و ضریب همبستگی آن ارائه می‌شود. مقادیر بالای ضریب همبستگی (R^2) بین مقادیر ثبت شده و محاسباتی نشان می‌دهد که شکل معادله و ضرایب و توان‌های به دست آمده به درستی و با دقت بالایی انتخاب شده است.

۴ - ۸ جمع‌بندی و خلاصه‌ی فصل

در فصل قبلی نتایج مدل‌سازی با نتایج مدل آزمایشگاهی تطبیق داده شد که تطابق مناسبی باهم داشتند. همچنین انتخاب مدل آشفتگی بر حل شبکه جریان در نرم‌افزار بررسی شد. در این فصل با انتخاب بهترین شرایط چندین هندسه مختلف سرریز کنگره‌ای ساخته و شبیه‌سازی گشت و دبی، ضریب گذردهی و کارایی سرریزها مقایسه شد. پس از آن با استفاده از نمودار ضریب گذردهی برحسب $\frac{H_t}{P}$ فرمولی به‌منظور محاسبه‌ی C_d برای هر سرریز محاسبه‌گردید.

فصل پنجم

نتیجه گیری و پیشنهادات

۵- ۱ مقدمه

سرریز کنگره‌ای با توجه به داشتن شکل خاص هندسی و پارامترهای مختلف نیاز به بررسی‌های فراوان بر روی پارامترها دارد تا بتوان به شکلی با عملکرد بهتر و قدرت گذردهی بیشتر دست‌یافت. لذا در این پایان‌نامه با استفاده از مدل‌سازی‌های عددی و نرم‌افزار دینامیک سیالات محاسباتی FLOW 3D ده‌ها مدل از این سرریز ساخته شد و با شبیه‌سازی جریان بر روی آن‌ها، حالت‌های مختلف برای هندسه‌ی سرریز مورد ارزیابی قرار گرفت. در این فصل نتایج حاصل از ارزیابی‌ها جمع‌بندی و در انتها پیشنهاداتی نیز برای ادامه این راه ارائه می‌گردد.

۵- ۲ نتیجه‌گیری

همان‌طور که گفته شد در این تحقیق به بررسی تأثیر هندسه بر دبی عبوری از سرریز کنگره‌ای پرداخته شد که به این منظور هشت هندسه برای سرریز کنگره‌ای به همراه یک سرریز خطی، هر یک در ده هد آبی مختلف که در کل ایجاد ۹۰ مدل مختلف می‌نمود و همچنین همگی دارای عرض (W) و ارتفاع سرریز (p) یکسان هستند، در نرم‌افزار Auto cad ساخته و در نرم‌افزار FLOW 3D شبیه‌سازی گردید؛ که در پایان کار و با توجه به نتایج حاصل شده می‌توان گفت که:

سرریزهای کنگره‌ای محبوب‌ترین سازه‌ها برای عبور سیلاب به پایین دست‌ها به دلیل نوسانات کم در سطح آب و ظرفیت دبی بالا می‌باشند. از این سرریزها بایستی در دره‌های باریک که طول تاج مستقیم سرریز کفایت عبور جریان طرح را ندارد استفاده نمود. در این سرریزها در یک هد مشابه با سرریز خطی مساحت جریان بیشتری از روی سرریز عبور می‌کند و این سبب کاهش انبوه جریان در بالا دست سرریز می‌شود.

مهم‌ترین برداشت‌هایی که از این پژوهش می‌توان داشت، به شرح زیر است:

- ۱ - مقایسه‌ی نتایج حاصل از مدل عددی و مدل فیزیکی حاکی از آن است که مدل عددی تقریب خوبی از دبی عبوری مورد انتظار به ویژه در هدهای بالاتر ارائه می‌دهد. همچنین نتایج نشان می‌دهد که مدل آشفستگی تاثیر بسیار کمی بر میزان دبی عبوری سرریز دارد.
- ۲ - در سرریزهای کنگره‌ای در ارتفاع ثابت سرریز، با افزایش نسبت بار هیدرولیکی کاهش کارایی را خواهیم داشت و کارایی بالای آن‌ها در بارهای هیدرولیکی کم می‌باشد. در بارهای خیلی کم نیز، به دلیل وجود نیروهای کشش سطحی، ضریب تخلیه کاهش می‌یابد.
- ۳ - در سرریز دوزنقه‌ای با دیواره‌ی شیب‌دار در مقایسه‌ی شکل تاج نیم‌دایره و تخت، به این نتیجه می‌توان دست‌یافت که نیم‌دایره کردن تاج سرریز سبب افزایش دبی و ضریب گذردهی (نسبت به حالت تاج تخت) به میزان حدوداً ۴ درصد می‌شود. در توجیه این موضوع می‌توان گفت که در سرریز با تاج نیم‌دایره‌ای به علت شکل مدور تاج، جریان به دیواره‌ی سرریز چسبیده و همین موضوع سبب می‌شود تا عملکرد تاج سرریز در مقادیر پایین $\frac{H_t}{P}$ بهبود یابد و مقدار ضریب تخلیه افزایش یابد. همچنین می‌توان گفت که شباهت خطوط جریان عبوری از روی سرریز با شکل تاج نیز سبب افزایش ضریب تخلیه سرریز با تاج نیم‌دایره شده است.
- ۴ - مشاهدات نشان داد که در بارهای هیدرولیکی بالا تداخل تیغه‌ها در سرریزهای کنگره‌ای به‌گونه‌ای می‌باشد که بخش عمده‌ی جریان عبوری با یکدیگر ترکیب شده و ایجاد استغراق موضعی می‌کند که در نتیجه‌ی آن مقدار ضریب دبی جریان برای کلیه مدل‌های ساخته شده تقریباً بر یکدیگر منطبق می‌گردد.
- ۵ - در سرریزهای مثلثی کاهش زاویه رأس سرریز و هم‌زمان با آن افزایش تعداد سیکل‌ها، میزان دبی را افزایش می‌دهد که این پدیده به دلیل افزایش طول مؤثر سرریز می‌باشد، به‌طوری‌که مقدار دبی در یک هد ثابت با تغییر زاویه به اندازه‌ی ۱۳ درجه، تقریباً ۴۹ درصد رشد می‌کند.

۶ - با توجه به نتایج به دست آمده در این تحقیق ساخت سرریزهای دایره‌ای شکل (با طول مورد استفاده در این سرریز) کمتر از سایر اشکال هندسی در افزایش دبی عبوری از سرریز مؤثر است؛ این کارایی کمتر به دلیل آن است که سرریز دایره‌ای شکل در یک عرض ثابت کمتر از دیگر سرریزها قادر به افزایش طول مؤثر سرریز می‌باشد. همچنین مقایسه‌ی بین دو نوع سرریز کنگره‌ای دایره‌ای شکل نیز نشان می‌دهد که افزایش زاویه‌ی کمان هر سیکل (θ') سبب افزایش دبی عبوری از سرریز می‌گردد.

۷ - سرریز مستطیلی شکل با ۳ سیکل نیز، در میزان دبی عبوری از سرریز، تقریباً مشابه با سرریز دوزنقه‌ای با ۵ سیکل و دیواره‌ی قائم عمل می‌کند. سرریز مستطیلی در هدهای پایین عملکرد بهتری نسبت به سرریز دوزنقه‌ای دارد ولی در هدهای بالا به دلیل طول بیشتر و تداخل جریان بیشتر از میزان عملکرد مفید آن کاسته می‌شود.

۸ - همان‌طور که از نتایج مشخص شد شیب‌دار کردن دیواره‌ها در هندسه‌ی سرریز دوزنقه‌ای قوسی نیز باعث افزایش تداخل جریان و کاهش میزان دبی عبوری و ضریب گذردهی نسبت به حالت دیواره‌ی قائم می‌شود.

۹ - از نمودار کارایی می‌توان نتیجه گرفت که کارایی سرریز کنگره‌ای دربارهای هیدرولیکی کم، قابل توجه است، چرا که در هدهای بالا، افزایش ضخامت تیغه‌ی آب بر روی سرریز و تداخل جریان، کاهش ضریب گذردهی را در پی خواهد داشت.

۱۰ - به منظور کمک در طراحی سرریزهای کنگره‌ای، روابط ضرایب گذردهی جریان برای هشت نوع سرریز کنگره‌ای مدل‌سازی شده، بر اساس هدهای مختلف ارائه گردید که دارای ضریب رگرسیون مناسب و نزدیک به یک می‌باشند.

۱۱ - مقایسه‌ی دبی سرریز خطی و کنگره‌ای برای طول‌های متفاوت نشان می‌دهد که در یک ثابت، $\frac{H_t}{P}$ دبی سرریز کنگره‌ای نسبت به سرریز خطی افزایش زیادی داشته است. با توجه به

مطالب ارائه شده می‌توان به کارایی هرچه بهتر سرریز کنگره‌ای نسبت به سرریز خطی پی برد، زیرا همانطور که بیان شد، با افزایش طول، در سرریز کنگره‌ای نسبت به سرریز خطی، در یک هد ثابت در بالادست دبی بیشتری را از خود عبور داده است.

۵ - ۳ پیشنهادات

با توجه به کارایی زیاد سرریزهای کنگره‌ای و همچنین تأثیر مثبت هندسه بر روی ضریب تخلیه سرریز جهت افزایش راندمان و کارایی سرریز می‌توان موارد زیر را برای مطالعات آینده پیشنهاد کرد:

- ❖ انجام مطالعات با نرم‌افزارهای دیگر مانند Fluent و مقایسه با نتایج موجود
- ❖ بررسی تأثیر شکل تاج در هندسه‌های مختلف بر عملکرد سرریز کنگره‌ای
- ❖ بررسی هم‌زمان تأثیر پارامترهای مؤثر در عملکرد سرریز کنگره‌ای مانند نسبت عرض دماغه، ضخامت نسبی، شعاع انحنا و...
- ❖ تأثیر محل تشکیل گردابه بر روی تخلیه سرریز
- ❖ شبیه‌سازی جریان در عده‌های فرود بالاتر
- ❖ علاوه بر این توانایی عبور مواد جامد درون سیال (مثل سنگ‌ها که در اثر سیلاب حرکت می‌کنند) از روی سرریز نسبت به حالت‌های دیگر موارد قابل بررسی می‌باشد.

منابع

- اژدری مقدم، م. امانیان ن، جعفری ندوشن ا، تاج نسایی م، (۱۳۹۰) " بررسی اثرات شیب بالادست و پایین دست مقطع بر ضریب گذردهی جریان در سرریز کنگره‌ای مثلثی به روش CFD " نهمین کنفرانس هیدرولیک، دانشگاه تربیت مدرس.
- اژدری مقدم، م؛ جعفری ندوشن، ا، (۱۳۹۲) "طراحی هیدرولیکی سرریزهای کنگره‌ای دوزنقه‌ای با استفاده از هیدرودینامیک محاسباتی" مجله علمی- پژوهشی عمران مدرس.
- اسماعیلی ورکی، م؛ رضوی زاده، م؛ (۱۳۹۲). " بررسی مشخصات هیدرولیکی جریان بر روی سرریزهای کنگره‌ای با پلان نیم‌دایره‌ای"، نشریه آب و خاک (علوم و صنایع کشاورزی) جلد ۲۷ شماره ۱، ص ۲۲۴-۲۳۴.
- جامی فر، ف؛ فغفور مغربی م؛ (۱۳۹۴). " بررسی نرم‌افزاری تأثیر هندسه بر ظرفیت گذردهی سرریزهای غیرخطی در پلان." چهاردهمین کنفرانس هیدرولیک ایران، دانشکده مهندسی شهید نیکبخت، زاهدان.
- حیدرپور، م؛ موسوی، ف؛ روشنی زرمهری، ع.ر؛ (۱۳۸۵). "بررسی سرریزهای چندوجهی با پلان مستطیلی و U شکل"، مجله علوم و فنون کشاورزی و منابع طبیعی، شماره سوم.
- رضایی، م؛ عمادی، ع؛ آقاجانی مازندرانی، ق؛ (۱۳۹۴). مطالعه‌ی آزمایشگاهی سرریز کنگره‌ای مستطیلی. " نشریه آب و خاک (علوم و صنایع کشاورزی) جلد ۲۹ شماره ۶، ص ۱۴۳۸-۱۴۴۶.
- ضمیری، ا؛ کرمی، حجت؛ فرزین، سعید؛ (۱۳۹۶). "مطالعه عددی عوامل موثر بر عملکرد هیدرولیکی جریان عبوری از سرریز کنگره‌ای" نشریه آبیاری و زهکشی ایران، شماره ۵، جلد ۱۱، ص ۸۶۵-۸۷۵.

- قدسیان، م؛ شنوایی، ح؛ (۱۳۸۰). "تأثیر شکل تاج بر ضریب آبگذری در سرریزهای کنگره‌ای مثلثی شکل در پلان"، کنفرانس بین‌المللی سازه‌های هیدرولیکی، دانشگاه شهید باهنر کرمان.
- قلی زاده، ع؛ قدسیان، م؛ پناهی، ر؛ (۱۳۹۵). "بررسی عددی تأثیر شکل تاج بر ضریب گذردهی در سرریزهای کنگره‌ای قوسی با پلان دوزنقه‌ای". مجله علمی - پژوهشی عمران-مدرس، دوره شانزدهم، شماره ۴. دانشگاه تربیت مدرس.
- گودرزی، م؛ سنگ سفیدی، ی؛ قدسیان، م؛ مهرآئین، م؛ (۱۳۹۲). "آب‌گذری سرریز کنگره‌ای انحنادار". دوازدهمین کنفرانس هیدرولیک ایران گروه مهندسی آبیاری و آبادانی پردیس کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران.
- گودرزی، م؛ قدسیان، م؛ مهرآئین، م؛ (۱۳۹۶). "تأثیر شیب دیواره‌ی پایین‌دست بر ضریب گذردهی سرریز کنگره‌ای انحنادار". نشریه مهندسی عمران فردوسی سال سی‌ام، شماره ۱.
- مشکواتی‌تروجنی، ج؛ عمادی، علی‌رضا؛ دهقانی، امیراحمد؛ مسعودیان، محسن؛ (۱۳۹۶). "بررسی آزمایشگاهی ضریب دبی در سرریزهای کنگره‌ای دوزنقه‌ای شکل" نشریه آبیاری و زهکشی ایران، شماره ۵، جلد ۱۱، ص. ۸۵۲-۸۶۴.
- منتظمیان، م، فردوس پناه، ف، نوحانی؛ (۱۳۹۶). "بررسی تأثیر پره‌های هادی در سرریز کنگره‌ای بر طول پرش هیدرولیکی". سومین کنفرانس سالانه پژوهش‌های معماری، شهرسازی و مدیریت شهری.
- یاسی مهدی، محمدی محمد؛ (۱۳۸۶). "بررسی سرریزهای زیگزاکی با پلان قوسی" علوم و فنون کشاورزی و منابع طبیعی، شماره ۴۱.

- Amanian N. (1987). "Performance of and design of labyrinth spillways. M.S. thesis, Utah State University", Logan, Utah
- Aminpour. B. (1991). "Development in Hydraulic Design of Labyrinth weir", PhD thesis, University of New castle upon.

- Anderson, R.M and Tullis, B.P. (2012). "Piano key weir hydraulics and labyrinth weir comparison", **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**. 139.3: 246-253.
- Savage B.M, Crookston B.M, Paxson G.S. (2016). "Physical and numerical modeling of large headwater ratio for a 15° labyrinth spillway". ASCE J Hyd Eng. 142(11).
- Carollo, F.G., Ferro, V and Pampalone, V. (2011). "Experimental investigation of the outflow process over a triangular labyrinth-weir", **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**. 138.1: 73-79
- Cassidy J. J., Gardner C. A., and Peacock R. T. (1985). "Boardman labyrinth crest". ASCE, J. Hyd. Eng. 111(3): 247-255.
- Cihan Aydin, M., Emin Emiroglu, M. (2016). "Numerical analysis of subcritical flow over two-cycle trapezoidal labyrinth side weir" ELSEVIER.
- Christensen N (2012). "Flow Characteristics of Arced Labyrinth Weirs" Utah State University;
- Crookston, B.M. (2010). "Labyrinth Weirs. All Graduate Theses and Dissertations". Utah State University.
- Crookston, B.M and Tullis, B.P. (2012). "Arced labyrinth weirs", **Journal of Hydraulic Engineering**. 138.6: 555-562.
- Crookston B. M.; ASCE1 A.M.; Tullis B. P., ; ASCE M. ; (2013). "Hydraulic Design and Analysis of Labyrinth Weirs. I: Discharge Relationships" Utah State University .
- Darvas, L. (1971). "Discussion of performance and design of labyrinth weirs", by Hay and Taylor. J. of Hydr. Engrg., ASCE. 97(80), pp. 1246-1251.
- Flow-3D user manual (version 11.0.4), (2015), Flow Science Inc.
- Gentilini, B. (1940). "Stramazzi con cresta a pianta obliqua e a zig-zag." Memorie e Studi del Regio Politecnico di Milano, 48.
- Ghare A.D., Mhaisalkar V.A., and Porey P.D. (2008). An Approach to Optimal Design of Trapezoidal Labyrinth Weirs. World Applied Sciences Journal 3 (6): 934-938.
- Ghodsian, M., (2009). "Stage-discharge relationship for a triangular labyrinth spillway." Proc. Inst. Civ. Eng. Water Manage., 162(3), 173–178

- Gustavo,A., Delgado,F., Mann,A.P and Fernando,J., Camino,S. (2015). Discharge coefficients spillways labyrinth implementing hydrodynamic devices in the upstream side. E-proceedings of the 36th IAHR World Congress, The Hague, The Netherlands: 1-7.
- Hay, N., and Taylor, G., (1970). "Performance and design of labyrinth weirs.", American Society of Civil Engineering, **Journal of Hydraulic Engineering**, 96(11), 2337-2357.
- Houston, K.L, (1982). "Hydraulic Model Study of the UTE Dam Labyrinth Spillway", Report No. GR-82-7, U.S. Bureau of Reclamations, Denver, Colo.
- Indlekofer, H., Rouve, G., (1995). "Discharge over polygonal weirs.", American Society of Civil Engineering, **Journal of Hydraulic Division**, 101(HY3), 385- 401.
- Javaheri A., and Kabiri Samani A. (2011). Presentation of Formula for Discharge Coefficient of Crinkle Weirs by Using Experimental Data. 10th Iranian Hydraulic Conference. (In Persian)
- Khode B. V.; Tembhurkar A. R.; Porey P. D.; and Ingle R. N.; (2012). "Experimental Studies on Flow over Labyrinth Weir " Utah State University .
- Kozák, M. and Sváb, J. (1961). "Tört alaprojzú bukók laboratóriumi vizsgálata. Hidrológiai Közlöny."
- Kumar, S., Ahmad, Z., Mansoor, T., Himanshu S.K., (2012) "Discharge Characteristics of Sharp Crested Weir of Curved Plan-form", **Research Journal of Engineering Sciences**, 1(4), , 16-20
- . Lux, F., Hinchliff, D.L, (1985), "Design and construction of labyrinth spillways", 15th Congress ICOLD, Vol. IV, Q59-R15, Lausanne, Switzerland, 249-274.
- Lux, F., Hinchliff, D.L, "Design and construction of labyrinth spillways", 15th Congress ICOLD, Vol. IV, Q59-R15, Lausanne, Switzerland, 1985, 249-274
- Mayer, P.G, (1980) "Bartletts Ferry Project, labyrinth weir model studies", Project No. E-20-610, Georgia Institute of Technology, Atlanta,
- Mehraein M; (2015). "Numerical simulation of flow over labyrinth spillways " ;**Journal of Scientia Iranica A** 22(5), 17791787 .

- Omer Bilhan, M. Emin Emiroglu, Carol J. Miller.(2016).” Experimental Investigation of Discharge Capacity of Labyrinth Weirs with and without Nappe Breakers.” World **Journal of Mechanics**. 6, 207-221
- Roushangar k; Alami M; Shiri J and Majedi Asl M (2018) “Determining discharge coefficient of labyrinth and arced labyrinth weirs using support vector machine “, Hydrology Researcher .49(3). 924-938.
- Tacail F.G., Even B., and Babb A. (1990).” Case study of a labyrinth spillway Canadian”. **Journal of Civil Engineering**, 17, 1-7.
- Tullis, J.P., Amanian, N., and Waldron, D. (1995)“Design of labyrinth weir spillways”, American Society of Civil Engineering, **Journal of Hydraulic Engineering**, 121(3) , 247-255.
- Waldron, D. (1994). "Design of labyrinth spillways." M.S. thesis, Utah State University, Logan, Utah.
- Wormleaton,P.R and Tsang,C.C.(2000). “Aeration performance of rectangular planform labyrinth weirs”. **Journal of environmental engineering**. 126.5:456-465.

Abstract

Weirs play an important role in regulating water levels, safety and construction costs in hydraulic structures. To increase the efficiency, it is possible to employ labyrinth weirs which can improve the discharge by increasing the weir length at a given width. Due to the construction of the arc in their plan view, the crest length increases for a given channel width and this leads to a higher flow rate and discharge coefficient. In this thesis, coefficient of flow discharge and flow rate of arced trapezoidal labyrinth weirs with vertical walls and half-round crest is studied by using FLOW 3D software and turbulence model k/epsilon RNG. Furthermore, these parameters are investigated for arced trapezoidal labyrinth weirs with a sloped wall with two types of flat and half-round crest. Also, triangular, rectangular and circular labyrinth weirs with half-round crest in view of plan are studied as well. The results show that on average, in the range of hydraulic heads, the arced triangular labyrinth weir with angle of 11 degree pass through the most discharge compared to all types of weir. Then, respectively, the arced triangular labyrinth weir with vertical wall, rectangular labyrinth weir, trapezoidal labyrinth weir with slope wall, triangular labyrinth weir with angle of 24 degrees and, in the end, circular labyrinth weirs have more discharge rate than linear weir. Comparison of results shows that in all labyrinth weirs in the lower head conditions, by increasing H_t/P (headwater ratio), the discharge coefficient is increased until reaches to its maximum value and then decreases.

Keywords: labyrinth weirs, discharge coefficient, sloping wall, FLOW 3D



Shahrood University of Technology

Faculty of Civil Engineering

M.Sc. Thesis in Water Engineering and Hydraulic Structures

Numerical Modeling Of Curved Labyrinth Spillway

By: Fereshte Zahedi

Supervisor:

Dr. Ramin Amini

January 2019