

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشکده مهندسی عمران

گروه مهندسی آب و محیط زیست

مدل سازی عددی سرریز کلید پیاوویی و بررسی عملکرد پارامترهای هندسی

دانشجو:

محسن شیریان

استاد راهنما:

رامین امینی

پایان نامه ارشد جهت اخذ درجه کارشناسی ارشد

زمستان ۱۳۹۳

دانشگاه صنعتی شاهرود

دانشکده مهندسی عمران

گروه مهندسی آب و محیط زیست

## پایان نامه کارشناسی ارشد آقای محسن شیریان

تحت عنوان: مدل سازی عددی سرریز کلید بیانویی و بررسی

### عملکرد پارامترهای هندسی

در تاریخ / / ۱۳۹۳ توسط کمیته تخصصی زیر جهت اخذ مدرک کارشناسی ارشد مورد ارزیابی و با درجه ..... مورد پذیرش قرار گرفت.

امضاء	اساتید مشاور	امضاء	اساتید راهنما
	نام و نام خانوادگی:		نام و نام خانوادگی:
	نام و نام خانوادگی:		

امضاء	نماینده تحصیلات تکمیلی	امضاء	اساتید داور
	نام و نام خانوادگی:		نام و نام خانوادگی:
			نام و نام خانوادگی:

تقدیم به

مادر مهربان و پدر عزیزم

## تشکر و قدردانی

اکنون که در ذیل توجهات پروردگار متعال این تحقیق به سرانجام رسیده است. بر خود واجب می دانم که از توجه و راهنمایی استاد معظم جناب آقای دکتر امینی کمال تشکر را داشته باشم.

از دوستان بزرگوار، آقایان امین نوری، حسین رویگر و فیاض اصغری که در انجام این تحقیق مرا یاری کردند، سپاسگذارم.

محسن شیریان

آذر ۹۳

# تعهدنامه

اینجانب محسن شیریان دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته مهندسی عمران - سازه‌های هیدرولیکی

دانشکده مهندسی عمران دانشگاه صنعتی شاهرود

نویسنده پایان‌نامه مدل سازی عددی سرریز کلید پیانویی و بررسی عملکرد پارامترهای هندسی

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 مورداستفاده 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 Technology» 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 (بافته‌های 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.

امضای دانشجو

تاریخ

## مالکیت نتایج و حق نشر

- کلیه حقوق معنوی این اثر و محصولات آن (مقالات مستخرج، کتاب، برنامه‌های رایانه‌ای، نرم‌افزارها و تجهیزات ساخته شده است) متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می‌باشد. این مطلب باید به نحو مقتضی در تولیدات علمی مربوطه ذکر شود.
- استفاده از اطلاعات و نتایج موجود در پایان‌نامه بدون ذکر مرجع مجاز نمی‌باشد.

## چکیده

سرریزها از بخش‌های بسیار مهم سدها بوده و در کنترل ظرفیت عبور سیلاب و تأمین ایمنی سدها نقش اساسی دارند. توانایی سرریزها در عبور آب مازاد مخزن سد در بالا بردن ظرفیت مخازن سدها نقش اساسی دارد. با توجه به نیاز روزافزون به منابع آب طراحی سرریزهای جدید با قدرت عبور دهی بالا بسیار مهم است. سرریز کلید پیانویی از جمله سرریزهایی هستند که عملکرد مناسبی در تخلیه آب دارند. مدل‌های فیزیکی متعددی از این نوع سرریز ساخته شده و مورد مطالعات آزمایشگاهی قرار گرفته است. به دلیل شکل پیچیده و جدید این سرریز هنوز روابط دقیقی برای طراحی ارائه نشده است. مدل‌های عددی از این سرریز با نرم افزار دینامیک سیالات محاسباتی flow-3D اجرا گردیده و مبتنی بر آن عملکرد برخی از پارامترهای هندسی بررسی و تأثیرگذاری آن با توجه به ضریب دبی مطالعه شده است. در این تحقیق یک الگوی طراحی که برای بهبود عملکرد سرریز توسط لمپریر در سال ۲۰۰۹ ارائه شده، مورد بررسی قرار گرفته است. همچنین برای افزایش قدرت گذر دهی سرریز اثر اضافه شدن دیواره بر روی تاج سرریز نیز مورد آزمایش قرار گرفته است که استفاده از این الگو آثار مثبتی بر افزایش ضریب گذردهی دبی داشته است. نتایج مدل سازی‌ها نشان داد با استفاده از الگوی لمپریر ۲۰۰۹ می توان ضریب گذردهی دبی را افزایش داد که این افزایش در هد های بالا تا ۴۰٪ نیز می رسد. همچنین در بررسی استفاده از دیواره در چند حالت مشخص گردید اثر دیواره بر روی بخش های مختلف سرریز متفاوت بوده و در قسمت دهانه خروجی سرریز این اثر بسیار مناسب بوده در حالی که در دهانه ورودی قرار گیری دیواره تاثیر محسوسی ندارد و حتی در بعضی حالات شاهد اثر منفی هستیم. با توجه به این موضوع یک ایده جدید از دیواره بر روی سرریز با عنوان دیواره مایل مطرح شد و مورد آزمایش قرار گرفت که نتایج مثبتی داشته و می تواند در تحقیقات آینده توسعه یابد.

**کلمات کلیدی: سرریز کلید پیانویی، مدل عددی، مدل آشفتگی، پارامترهای هندسی**

## فهرست مطالب :

فصل اول: مقدمه و کلیات.....	۱
۱-۱ مقدمه.....	۲
۲-۱ سرریزها.....	۳
۱-۲-۱ بخش های اصلی سرریز .....	۴
۲-۲-۱ معادله کلی حاکم بر سرریزها.....	۵
۳-۲-۱ انواع سرریزها.....	۶
۳-۱ سرریزهای کلید پیانویی.....	۹
۱-۳-۱ خصوصیات، مزایا و کاربردهای سرریزهای کلید پیانویی.....	۱۱
۴-۱ ضرورت انجام تحقیق.....	۱۳
۵-۱ هدف تحقیق.....	۱۶
۶-۱ روش تحقیق.....	۱۶
۷-۱ ساختار پایان نامه.....	۱۷
فصل دوم : معرفی موضوع و تحقیقات انجام شده.....	۱۹
۱-۲ مقدمه.....	۲۰
۲-۲ سرریز کلید پیانویی.....	۲۰
۱-۲-۲ شکل هندسی و اجزای سرریز کلید پیانویی.....	۲۲
۳-۲ تاریخچه مطالعات.....	۲۵
۱-۳-۲ مدل سازی ها.....	۲۵
۲-۳-۲ بررسی پارامتری.....	۲۶
۱-۲-۳-۲ مقایسه سرریزهای نوع A و B.....	۲۷



- ۲۷.....۲-۲-۳-۲ بررسی تاثیر جلوآمدگی
- ۲۹.....۳-۲-۳-۲ بررسی نسبت عرض ورودی به خروجی
- ۳۰.....۴-۲-۳-۲ مدخل دهانه ورودی
- ۳۰.....۵-۲-۳-۲ شیب کف سرریز
- ۳۱.....۶-۲-۳-۲ نسبت طول تاج به عرض سرریز
- ۳۲.....۷-۲-۳-۲ شکل تاج سرریز
- ۳۲.....۸-۲-۳-۲ هوادهی
- ۳۳.....۹-۲-۳-۲ تاثیر دیواره
- ۳۴.....۱۰-۲-۳-۲ استفاده از پشت بند در پائین جلوآمدگی پائین دست دست
- ۳۴.....۱۱-۲-۳-۲ استفاده از جداره جانبی مایل
- ۳۵.....۳-۳-۲ الگوی طراحی لمپریر ۲۰۰۹
- ۳۷.....۴-۲ خلاصه و جمع بندی فصل
- ۳۹.....فصل سوم : معرفی نرم افزار و معادلات حاکم بر جریان
- ۴۰.....۱-۳ مقدمه
- ۴۰.....۲-۳ روش حل
- ۴۱.....۳-۳ معرفی نرم افزار
- ۴۴.....۴-۳ معادلات حاکم
- ۴۴.....۱-۴-۳ سیستم های مختصات
- ۴۵.....۲-۴-۳ معادلات حاکم بر جریان آشفته
- ۴۸.....۳-۴-۳ مدل های آشفستگی
- ۴۹.....۱-۳-۴-۳ مدل طول اختلاط پرانتل

۵۰	.....	۲-۳-۴-۳ مدل های انتقال آشفستگی
۵۳	.....	۳-۳-۴-۳ مدل شبیه سازی گردابه های بزرگ
۵۴	.....	۵-۳ جمع بندی و خلاصه فصل
۵۵	.....	فصل چهارم: صحت سنجی مدل سازی
۵۶	.....	۱-۴ مقدمه
۵۶	.....	۲-۴ مشخصات مدل
۵۸	.....	۳-۴ مشخصات میدان حل
۵۸	.....	۱-۳-۴ مدل سازی
۵۹	.....	۲-۳-۴ تنظیمات نرم افزار و فیزیک مدل سازی
۶۰	.....	۱-۲-۳-۴ تنظیمات اندازه گیری دبی خروجی
۶۰	.....	۳-۳-۴ شبکه بندی
۶۲	.....	۱-۳-۳-۴ نسبت اندازه و نسبت شکل
۶۵	.....	۴-۳-۴ شرایط مرزی میدان
۶۷	.....	۵-۳-۴ زمان شبیه سازی
۶۷	.....	۶-۳-۴ مدل آشفستگی
۶۸	.....	۴-۴ بررسی نتایج و صحت سنجی
۷۱	.....	۵-۴ جمع بندی و خلاصه فصل
۷۳	.....	فصل پنجم: حساسیت سنجی
۷۴	.....	۱-۵ مقدمه
۷۴	.....	۲-۵ تاثیر مدل آشفستگی
۸۱	.....	۳-۵ بررسی الگوی طراحی لمپریر

۸۸.....	۴-۵ تاثیر گذاری دیواره ها
۸۸.....	۱-۴-۵ بررسی اثر دیواره بر مدل لمپیر ۲۰۰۳
۹۱.....	۲-۴-۵ بررسی اثر دیواره بر مدل لمپیر ۲۰۰۹
۹۴.....	۳-۴-۵ بررسی اثر دیواره بر مدل تغییر یافته لمپیر ۲۰۰۹
۹۴.....	۱-۳-۴-۵ مدل تغییر یافته لمپیر ۲۰۰۹
۹۷.....	۲-۳-۴-۵ استفاده از دیواره برای مدل تغییر یافته لمپیر ۲۰۰۹
۱۰۱.....	۴-۴-۵ استفاده از دیواره مایل
۱۰۷.....	۵-۵ جمع بندی و خلاصه فصل
۱۰۹.....	فصل ششم : جمع بندی، نتیجه گیری و پیشنهادات
۱۱۰.....	۱-۶ مقدمه
۱۱۰.....	۲-۶ نتایج
۱۱۰.....	۱-۲-۶ شبیه سازی عددی سرریز کلید پانویی
۱۱۱.....	۲-۲-۶ مقایسه نتایج مدل عددی با نتایج آزمایشگاهی
۱۱۱.....	۳-۲-۶ بررسی الگوی لمپیر ۲۰۰۹
۱۱۲.....	۴-۲-۶ بررسی قرار دادن دیواره بر روی تاج
۱۱۴.....	۳-۶ پیشنهادات
۱۱۵.....	منابع

## فهرست اشکال :

- شکل ۱-۱ (a) سرریز منقاری (b) سرریز بادبزی (c) سرریز y شکل (d) سرریز گل آفتاب گردان شکل ..... ۸
- شکل ۱-۲ سرریز کنگره‌ای (لابیرنت) ..... ۹
- شکل ۱-۳ سرریز کلید پیانویی ..... ۱۱
- شکل ۱-۴ شکل و پارامترهای هندسی سرریز کلید پیانویی ..... ۱۲
- شکل ۱-۵ سرریز کلید پیانویی ..... ۱۴
- شکل ۱-۶ سرریز کلید پیانویی ..... ۱۵
- شکل ۲-۱ سرریز سد اترویت در فرانسه ..... ۲۱
- شکل ۲-۲ سرریز سنت مارک در فرانسه ..... ۲۱
- شکل ۲-۳ اجزای اصلی سرریز کلید پیانویی ..... ۲۲
- شکل ۲-۴ سرریز کلید پیانویی نوع A ..... ۲۳
- شکل ۲-۵ سرریز کلید پیانویی نوع B ..... ۲۳
- شکل ۲-۶ پارامترهای هندسی اصلی سرریز کلید پیانویی ..... ۲۴
- شکل ۲-۷ مقطع دیواره های مایل در تحقیقات لغبر و همکاران در سال ۲۰۱۳ ..... ۳۵
- شکل ۲-۸ مدل طراحی ارائه شده توسط لمپریر ..... ۳۸
- شکل ۴-۱ مشخصات هندسی سرریز کلید پیانویی نوع A ..... ۵۷
- شکل ۴-۲ بخش مدل سازی شده با استفاده از مرز متقارن ..... ۵۸
- شکل ۴-۳ مدل ساخته شده در نرم افزار به همراه قسمت جامد در کف بالادست و پائین دست ..... ۵۹
- شکل ۴-۴ محل قرارگیری baffle در روی تاج سرریز در حالت FAVOR ..... ۶۰
- شکل ۴-۵ تأثیر مش زنی بر هندسه احجام : الف) یک شکل مخروطی با ۱۰۰۰۰ مش ب) همان شکل با ۱۰۰۰۰۰ مش ..... ۶۱

- شکل ۴-۶ شبکه حل برای مدل ..... ۶۳
- شکل ۴-۷ Mesh Plane های مدل سازی ..... ۶۴
- شکل ۴-۸ مدل نمایش مدل با FAVOR ..... ۶۴
- شکل ۴-۹ محورهای مختصات مدل سازی ..... ۶۵
- شکل ۴-۱۰ نمایش گرافیکی سه بعدی جریان روی سرریز در ثانیه های دوم پانزدهم اجرا شبیه سازی ..... ۶۸
- شکل ۴-۱۱ نتایج نرم افزار برای دبی عبوری مربوط به هد ۱ متر ..... ۶۹
- شکل ۴-۱۲ نمودار تغییرات دبی نسبت به ارتفاع هد ..... ۷۰
- شکل ۵-۱ نمودار های تغییرات دبی به زمان در مدل های مختلف آشفتگی ..... ۷۷
- شکل ۵-۲ تغییرات گام زمانی نسبت به زمان در اجرای نرم افزار در حالت های آرام و یک معادله ای ..... ۷۸
- شکل ۵-۳ تغییرات گام زمانی نسبت به زمان در اجرای نرم افزار در حالت های مدل K-ε و RNG ..... ۷۹
- شکل ۵-۴ الگو ارائه شده توسط لمپریر در سال ۲۰۰۹ ..... ۸۲
- شکل ۵-۵ ابعاد تغییر یافته مدل شبیه سازی ..... ۸۳
- شکل ۵-۶ مدل سرریز کلید پیانویی بر اساس الگوی لمپریر ۲۰۰۹ ..... ۸۴
- شکل ۵-۷ جریان بر روی سرریز کلید پیانویی با الگوی لمپریر ۲۰۰۹ ..... ۸۴
- شکل ۵-۸ نمودار تغییرات  $C_d$  نسبت به  $H/P$  ..... ۸۵
- شکل ۵-۹ تغییرات دبی در قسمت دهانه خروجی ..... ۸۶
- شکل ۵-۱۰ تغییرات دبی در قسمت دهانه ورودی ..... ۸۶
- شکل ۵-۱۱ تغییرات دبی در قسمت دهانه ورودی ..... ۸۷
- شکل ۵-۱۲ مدل لمپریر ۲۰۰۳ با دیواره ۱ متری ..... ۸۸
- شکل ۵-۱۳ تغییرات ضریب دبی نسبت به ارتفاع هد برای مدل لمپریر ۲۰۰۳ با دیواره و بدون آن ..... ۸۹
- شکل ۵-۱۴ بررسی تاثیر دیوار بر لمپریر ۲۰۰۹ در پائین دست دهانه ورودی ..... ۸۹

- شکل ۵-۱۵ بررسی تاثیر دیوار بر لمپریر ۲۰۰۹ در قسمت جدار بین دهانه ها ..... ۹۰
- شکل ۵-۱۶ بررسی تاثیر دیوار بر لمپریر ۲۰۰۹ در قسمت خروجی ..... ۹۰
- شکل ۵-۱۷ مدل ساخته شده از لمپریر ۲۰۰۹ با دیواره ..... ۹۱
- شکل ۵-۱۸ نمودار تغییرات ضریب دبی نسبت به ارتفاع هد برای لمپریر ۲۰۰۹ همراه با دیواره و بدون آن ..... ۹۲
- شکل ۵-۱۹ اثر دیواره بر قسمت خروجی سرریز لمپریر ۲۰۰۹ ..... ۹۲
- شکل ۵-۲۰ اثر دیواره بر سرریز لمپریر ۲۰۰۹ در قسمت جدار بین دهانه ها ..... ۹۳
- شکل ۵-۲۱ اثر دیواره بر سرریز لمپریر ۲۰۰۹ در قسمت ورودی ..... ۹۳
- شکل ۵-۲۲ مدل لمپریر ۲۰۰۹ (الف) و شکل تغییر یافته آن (ب) ..... ۹۵
- شکل ۵-۲۳ مدل لمپریر ۲۰۰۹ (الف) و شکل تغییر یافته آن (ب) ..... ۹۵
- شکل ۵-۲۴ تغییرات ضریب دبی برای مدل لمپریر ۲۰۰۹ و مدل جدید تغییر یافته آن ..... ۹۶
- شکل ۵-۲۵ تغییرات ضریب دبی نسبت به ارتفاع هد برای مدل لمپریر ۲۰۰۹ تغییر یافته ولمپریر ۲۰۰۳ ..... ۹۶
- شکل ۵-۲۶ مدل سرریز کلید پیانویی براساس لمپریر ۲۰۰۹ با دیواره یک متری ..... ۹۷
- شکل ۵-۲۷ نمودار تغییرات ضریب دبی نسبت به هد در حالت های لمپریر ۲۰۰۳ ، لمپریر ۲۰۰۹ تغییر یافته و لمپریر ۲۰۰۹ تغییر یافته با دیوار ..... ۹۸
- شکل ۵-۲۸ نمودار تغییرات ضریب دبی نسبت به هد در حالت های لمپریر ۲۰۰۹ با دیواره و لمپریر ۲۰۰۹ تغییر یافته با دیواره ..... ۹۸
- شکل ۵-۲۹ نمودار تغییرات ضریب دبی نسبت به هد در قسمت دهانه ورودی در حالت های لمپریر ۲۰۰۹ با دیواره و لمپریر ۲۰۰۹ تغییر یافته با دیواره ..... ۹۹
- شکل ۵-۳۰ (الف) تغییرات دبی در قسمت جدار میانی (ب) نمودار شکل مدل سرریز با معرفی سه جز آن ..... ۱۰۰

- شکل ۳۱-۵ نمودار تغییرات ضریب دبی نسبت به هد در قسمت دهانه خروجی در حالت های لمپریر ۲۰۰۹ با دیواره و لمپریر ۲۰۰۹ تغییر یافته با دیواره ..... ۱۰۰
- شکل ۳۲-۵ نمودار تغییرات ضریب دبی نسبت به هد در حالت های لمپریر ۲۰۰۹ و لمپریر ۲۰۰۹ تغییر یافته با دیواره ..... ۱۰۱
- شکل ۳۳-۵ الف) سرریز کلیدپیانویی با دیواره مایل ب) شکل اولیه سرریز کلیدپیانویی ..... ۱۰۲
- شکل ۳۴-۵ مدل سرریز کلید پیانویی با دیواره مایل در FLOW-3D ..... ۱۰۳
- شکل ۳۵-۵ جریان بر روی سرریز کلید پیانویی با دیواره مایل ..... ۱۰۴
- شکل ۳۶-۵ نمودار تغییرات دبی واحد عرض نسبت به هد آب برای مدل لمپریر ۲۰۰۳ بدون دیواره، با دیواره سراسری و دیواره مایل ..... ۱۰۴
- شکل ۳۷-۵ تغییرات دبی در دهانه ورودی برای مدل لمپریر ۲۰۰۳ بدون دیواره، با دیواره سراسری و دیواره مایل ..... ۱۰۵
- شکل ۳۸-۵ تغییرات دبی بر روی جداره بین دهانه ها برای مدل لمپریر ۲۰۰۳ بدون دیواره، با دیواره سراسری و دیواره مایل ..... ۱۰۶
- شکل ۳۹-۵ تغییرات دبی در قسمت دهانه خروجی برای مدل لمپریر ۲۰۰۳ بدون دیواره، با دیواره سراسری و دیواره مایل ..... ۱۰۶

## فهرست جداول

- جدول ۱-۴ مشخصات پارامترهای هندسی سرریز مورد مطالعه ..... ۵۷
- جدول ۲-۴ مقایسه نتایج مدل عددی و نتایج آزمایشگاهی ..... ۷۰
- جدول ۱-۵ میزان دبی محاسبه شده با مدل های آشفته متفاوت ..... ۷۵
- جدول ۲-۵ زمان شبیه سازی و حجم پردازش در مدل های آشفته مختلف ..... ۷۶
- جدول ۳-۵ مقادیر تغییر یافته ابعاد براساس الگوی لمپیر ..... ۸۳



## فصل اول

### مقدمات و کلیات

از جمله مهم‌ترین سازه‌هایی که امروزه برای افزایش دادن منابع آب و ذخیره آب‌های سطحی مورد استفاده قرار می‌گیرند سدهای مخزنی هستند. وجود یک طراحی دقیق برای اجزای این سازه‌ها اهمیت فوق‌العاده‌ای دارد. از جمله اجزای مهم سدها می‌توان به سرریزها اشاره کرد که در سدهای بزرگ برای تخلیه سیلاب از آن استفاده می‌شود. سرریزها نقش بسیار مهمی در تضمین ایمنی سدها ایفا می‌کنند و گفته شده عامل شکسته شدن یک سوم از سدهای تخریب شده، سرریزها هستند [1].

تحقیقات متعددی به مسئله سرریزها، انواع، ساختار و نحوه طراحی آن‌ها با عناوین مختلف پرداخته است 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. همچنین مدل‌سازی‌های آزمایشگاهی دارای هزینه‌های اقتصادی و زمانی بوده‌اند. با پیشرفت فن‌آوری و افزایش یافتن قدرت کامپیوترهای امروزی استفاده از روش‌های عددی برای شبیه‌سازی‌ها توجه بیشتری پیدا کرده است و نرم‌افزارهای متعددی در این مورد به وجود آمده‌اند که از آن جمله نرم‌افزار FLOW-3D می‌باشد که مبتنی بر اصول دینامیک سیالات محاسباتی (CFD)<sup>1</sup> طراحی شده است. مدل‌سازی‌های عددی نسبت به مدل‌های آزمایشگاهی این ترجیح را دارد که سازه‌ها را با همان مقیاس واقعی مدل می‌کند و در زمان و هزینه‌های اقتصادی هم ارزان‌تر می‌باشد. با افزایش روند پیشرفت کامپیوترها به نظر می‌رسد استفاده از روش‌های عددی جایگزین مناسبی برای مدل‌های فیزیکی باشد.

---

<sup>1</sup> Computational Fluid Dynamics

## ۲-۱ سرریزها<sup>۱</sup>

برای عبور آب‌های اضافی و سیلاب‌ها از بالادست به پائین‌دست سدها از سازه‌ای به نام سرریز استفاده می‌شود که یکی از سازه‌های مهم هر سد را تشکیل می‌دهد. سرریزها یکی از حساس‌ترین بخش‌های سد هستند که این امر مستلزم داشتن سازه‌ای قوی، مطمئن و با کارایی بالا هست تا هر لحظه بتواند قابل‌استفاده باشد. سرریزها باید در هم از لحاظ سازه‌ای مستحکم و هم از جهت طراحی به‌گونه‌ای باشد که توانایی انتقال آب به میزان موردنیاز داشته 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 موارد 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 دریاچه سد انجام گرفته

و از طریق یک کانال به رودخانه و یا زهکش‌های طبیعی هدایت می‌شود.

این کاربرد سرریزها به ندرت و فقط در مواقع وقوع سیلاب بوده است. [3]

(۲) در سدهای انحرافی، به دلیل آن که فقط درصدی از آب رودخانه به کانال‌های مجاور بازگردانده می‌شود

و همین‌طور محدود بودن ظرفیت ذخیره مخازن، گذر دادن جریان‌های مازاد بر ظرفیت انتقال در این‌گونه

سدها بر عهده سرریزها هست. این سرریزها به‌صورت دائمی مورد بهره‌برداری قرار می‌گیرند.

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

---

<sup>1</sup> spillway

## ۱-۲-۱ بخش‌های اصلی سرریز

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

### ۱) بخش کنترل‌کننده یا تاج

بخش تاج در هر سرریز، قسمتی است در بالای دیوار یا بدنه سرریز که از روی این قسمت آب جریان می‌یابد. این عضو یکی مهم‌ترین قسمت‌های یک سرریز محسوب می‌شود. چون بخش کنترل‌کننده‌ی سرریز بوده و تنظیم و کنترل میزان دبی خروجی از مخزن بر عهده‌ی این قسمت می‌باشد. 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.

### ۲) مجرای تخلیه یا بخش انتقال آب

مجرای تخلیه یا بخش انتقال آب، کانال یا یک آبراهه‌ای است که جریانی که از روی تاج عبور می‌کند را به پائین‌دست سد در بستر رودخانه بریزد. این بخش می‌تواند قسمتی از بدنه پائین‌دست سد بتنی و یا یک کانال روباز باشد. همین‌طور ممکن است تأسیسات انتقال آب برای تخلیه 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 به‌صورت 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 صورت ملایم و یا تند باشد و همچنین کانال تخلیه عریض، باریک، طویل یا کوتاه باشد.

### ۳) سازه پایانه یا بخش تخلیه

سقوط جریان از مخزن توسط سرریز به سطح آزاد آب در پائین دست، با تبدیل انرژی پتانسیل به انرژی جنبشی همراه است. این انرژی به صورت سرعت زیاد جریان ظاهر می شود که آثار مخربی برای پائین دست رودخانه دارد و سبب فرسایش بستر رودخانه می شود. این سازه ها در پائین دست سرریزها برای جلوگیری از آثار مخرب در محل مناسب تعبیه می شوند. انواع حوضچه های آرامش و کاهنده های انرژی از جمله این سازه ها می باشند.

#### ۱-۲-۲ معادله کلی حاکم بر سرریزها

معادله حاکم بر ظرفیت دبی عبوری سرریزها به صورت کلی در رابطه ی ۱ نشان داده شده است:

$$Q = C_d \frac{2}{3} \sqrt{2g} L H_t^{3/2} \quad (1)$$

در این رابطه  $Q$  میزان دبی عبوری از سرریز،  $C_d$  ضریب دبی تخلیه،  $g$  شتاب گرانشی،  $L$  طول سرریز  $H_t$  هد کل آب روی تاج سرریز می باشند.

به طور کلی دبی با چند پارامتر موجود در رابطه فوق نسبت مستقیم دارد. که با افزایش یافتن آن پارامترها مقدار دبی عبوری از روی سرریز افزایش می یابد. با توجه به این موضوع می توان با ایجاد تغییرات در این پارامترها دبی های گذرنده از روی سرریز را افزایش داد. برای بالا بردن ظرفیت سرریز این گزینه ها به نظر می رسد:

(۱) کاهش ارتفاع

(۲) افزایش عرض به صورت خطی

(۳) افزایش طول سرریز با تغییر حالت خطی به غیر خطی

کاهش ارتفاع تاج سرریز باعث پائین آمدن ارتفاع سطح آب مخزن سد می‌گردد که این امر ظرفیت ذخیره‌سازی مخزن را کاهش می‌دهد که این کار مقرون‌به‌صرفه نیست، همچنین افزایش طول به‌صورت خطی نیز با توجه به هندسه ساختگاه سد در غالب موارد شدنی نیست. افزایش عرض سرریز همچنین میزان هزینه ساخت را نیز افزایش می‌دهد که این امر هزینه‌ی اقتصادی را بالا می‌برد. یک گزینه برای افزایش دبی افزایش طول به‌صورت غیرخطی هست. طرح سرریز غیرخطی با ثابت نگه‌داشتن ابعاد سرریز پارامتر طول سرریز را که بر دبی تخلیه آب بر روی سرریز مؤثر است را افزایش می‌دهد و می‌توان گفت استفاده از این گزینه نسبت به گزینه‌های دیگر به‌صرفه‌تر و با اثرگذاری بهتر همراه است.

### ۱-۲-۳ انواع سرریزها

سرریزها را می‌توان از جهات مختلف تقسیم‌بندی نمود. این تقسیم می‌تواند بر اساس سازه کنترل‌کننده و یا مجرای تخلیه تقسیم‌بندی کرد. انواع سرریز بر اساس مجهز بودن به دریچه و یا نداشتن دریچه به‌صورت 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.

#### الف ( سرریزهای خطی (با تاج مستقیم)

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

۱- سرریزهای ریزشی آزاد (سقوط) یا لبه تیز

۲- سرریزهای اوجی یا آبریز

۳- سرریزهای جانبی یا سرریزهای با کانال جانبی

۴- سرریزهای شیب‌دار، شوت یا سرسره‌ای

۵- سرریزهای پلکانی

### ب) سرریزهای غیرخطی (با تاج غیرمستقیم)

این نوع سرریزها دارای تاجی است که دارای شکستگی یا انحنا بوده و به صورت خط راست نیست. با توجه به معادله کلی سرریزها که در بالا اشاره شد، در این نوع سرریزها با افزایش عامل طول، میزان دبی خروجی از سرریز را افزایش می‌دهند و این اثر افزایش طول در ابعاد سرریز تأثیرگذار نبوده است. محققان ایده‌های جدیدی در رابطه با افزایش طول سرریز در فرم‌های مختلف ارائه نمودند. از این جمله می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

۱- سرریز نیلوفری

۲- سرریزهای منقاری

۳- سرریز بادبزی

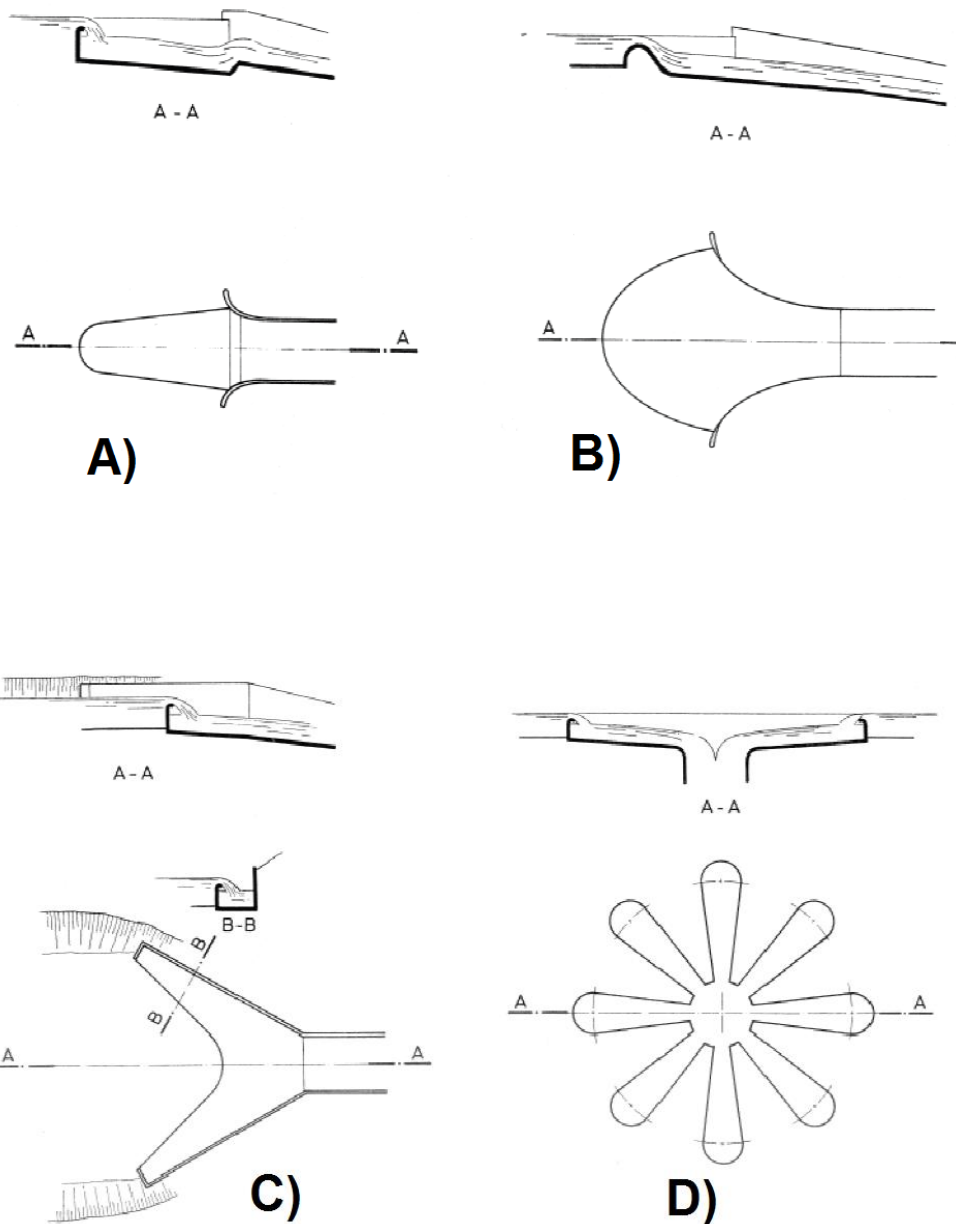
۴- سرریز Y شکل

۵- سرریزهای گل آفتاب‌گردان شکل<sup>۱</sup>

۶- سرریز کنگره‌ای (لابیرنت)

---

<sup>1</sup> Daisy-shape



شکل ۱-۱ (A) سرریز منقاری (B) سرریز بادبزی (C) سرریز Y شکل (D) سرریز گل آفتابگردان شکل [2]

ایده‌های مختلف برای طرح سرریزهای غیرخطی توسط محققین بررسی شد. از آن جمله طرح سرریزهای چندوجهی یا کنگره‌ای بوده است این نوع سرریزها که با اتصال دیواره‌هایی که در پلان به شکل دوزنقه‌ای، مثلی



و اشکال دیگر هستند، ساخته می‌شود. در واقع سرریزهای کلید پیانویی شکل بهبود یافته‌ای از سرریزهای کنگره‌ای هستند که در پی آزمایش‌ها و بررسی تغییرات مختلف این شکل رسیده است.



شکل ۱-۲ سرریز کنگره‌ای (لابیرنت)

### ۳-۱ سرریزهای کلید پیانویی

استفاده از سرریزهای غیرخطی به دلیل افزایش دادن دبی تخلیه سرریزها مورد توجه محققین و طراحان قرار گرفته است. سرریز کلید پیانویی یکی از اشکال جدید این نوع سرریزها هستند که در طی سال‌های اخیر توجه طراحان را به خود جلب کرده است. طبق رابطه سرریزها، یکی از پارامترهای مؤثر در میزان دبی خروجی، طول سرریز هست. سرریز غیرخطی با امکان افزایش طول مؤثر، توانایی تخلیه بالایی را تأمین می‌کند. این موضوع توجه طراحان را برای بررسی و تحقیقات بیشتر روی این نوع سرریز افزایش داد.

سرریز کلید پیانویی شکل بهبود یافته سرریزهای کنگره‌ای یا لابیمنت هستند. کوچک بودن پایه این نوع سرریز نسبت به سرریز لابیمنت باعث می‌شود فضای کمتری را اشغال کند و راحت‌تر نصب شوند حتی در فضاهای بسیار محدود فونداسیون مثل تاج سدهای وزنی قابل استفاده می‌باشند.

از جمله مزایای این نوع سرریزها می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

- ۱- قابلیت احداث روی سدهای موجود و سدهای جدید را دارند.
- ۲- دبی مخصوص عبوری از سرریز را افزایش می‌دهند.<sup>۱</sup>
- ۳- دبی عبوری از این سرریزها حداقل ۴ برابر سرریزهای معمولی است.
- ۴- باعث افزایش ظرفیت مخزن می‌گردند.
- ۵- از لحاظ اقتصادی بسیار مقرون به صرفه بوده و هزینه نگهداری کمتری دارند. [2]

علاقه برای ساخت و استفاده از این نوع سرریز رو به افزایش است. نکته قابل توجه برای این نوع سرریز شکل هندسی آن است که متشکل از اجزا هندسی مختلف است. اجزا و پارامترهای هندسی متعدد باعث به وجود آمدن حالت‌های مختلف زیادی برای یافتن شکل کارا تر و باقابلیت بیشتر شده است.

با توجه به گزارش‌های اعلام شده یک سوم از خرابی سدها بر اثر کم بودن ظرفیت تخلیه سدها اتفاق می‌افتد. به همین جهت کمیته بین‌المللی سدهای بزرگ توصیه کرد که سدهای بلند برای اطمینان از امنیت آن‌ها مجدداً مورد بررسی قرار گیرند. به این دلیل باید برای طرح سرریزها سیلاب‌هایی با دوره بازگشت بزرگ‌تری در نظر گرفت. با توجه به این موضوع افزایش حجم ذخیره سد و یا افزایش دبی تخلیه سرریز مورد توجه قرار می‌گیرد. سرریزهای کلید پیانویی یکی از ایده‌های بهبود یافته در جهت رفع مسائل می‌باشد.

---

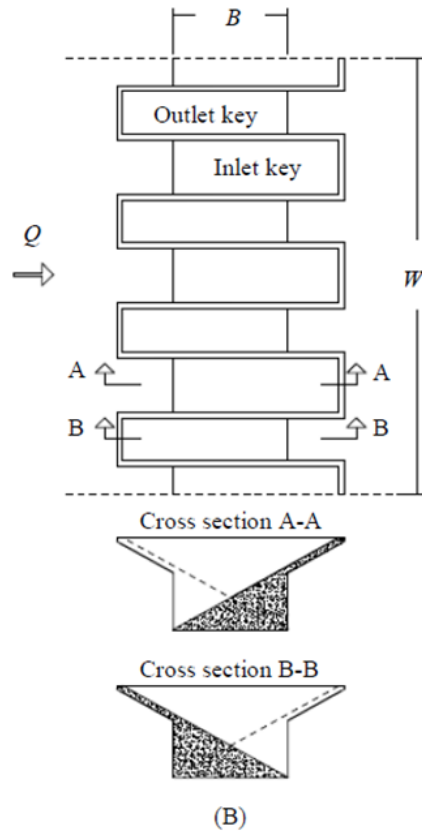
<sup>۱</sup> در بعضی منابع افزایش دبی تا  $100 \text{ m}^3/\text{s/m}$  نیز گزارش شده است.



شکل ۱-۳ سرریز کلید پیانویی

### ۱-۳-۱ خصوصیت، مزایا و کاربردهای سرریزهای کلید پیانویی

سرریز کلید پیانویی شکل بهبودیافته‌ای از سرریز کنگره‌ای هست. پایه‌های این نوع سرریز مستطیلی شکل می‌باشند. برخلاف سرریز لایبرنت که تاج آن عمودی است سرریز کلید پیانویی دارای سطحی مایل در سطح تاج است که در دو جهت بالادست و پائین‌دست متفاوت می‌باشد به دلیل این حالت به شکلی مشابه کلیدهای پیانو می‌باشند که به چنین نامی مشهور شده است. با توجه به میزان شیب میزان جلوآمدگی مقدار مشخصی دارد. کوچک بودن پایه این نوع سرریز نسبت به سرریز لایبرنت فضای کمتری را اشغال می‌کند و عملکرد هیدرولیکی بهتری دارد و راحت‌تر نصب می‌شوند حتی در فضاهای بسیار محدود فونداسیون مثل تاج سدهای وزنی قابل استفاده می‌باشند.[2]



شکل ۴-۱ شکل و پارامترهای هندسی سرریز کلید پیانویی [4]

سرریزها از بخش‌های پرهزینه‌ی سدها به شمار می‌روند. معمولاً حدود ۲۰٪ از هزینه ساخت سد صرف ساخت سرریز می‌گردد. به همین منظور طراحان به دنبال روش‌هایی برای اقتصادی کردن عملیات سدسازی هستند. [1] در این مسیر هدف طراحان آن است که بدون وارد آمدن لطمه به عملکرد هیدرولیکی و ضریب اطمینان سرریزها، به کاهش ابعاد و طراحی ساده‌تر ساختمان آن‌ها دست یابند. از این جهت سرریز کلید پیانویی می‌تواند بسیار مورد توجه باشد. در واقع وجود جلوآمدگی‌ها میزان حجم بتن لازم را کاهش می‌دهد و هندسه سرریز کمک به استفاده از قطعات پیش‌ساخته می‌نماید که به‌طور قابل توجهی هزینه‌ها را کاهش می‌دهد. [5]

در این سرریز وجود شیب برای دهانه‌های ورودی و خروجی باعث داشتن پایه‌هایی با ابعاد کمتر می‌کند. وجود این شیب باعث می‌شود در یک ابعاد پایه‌ی برابر سرریز کلید پیانویی طول مؤثر بیشتری نسبت به سرریز کنگره‌ای داشته باشد. [4]

سرریز کلید پیانویی مانند سرریز کنگره‌ای گزینه بسیار مناسبی برای سدهایی است که نیاز به ظرفیت تخلیه بالایی دارند و یا بخش کوچکی از مخزن را برای تخلیه سیلاب در نظر گرفته‌اند. وجود جلوآمدگی‌ها محدود شدن پایه‌ها باعث می‌شود تا سرریز به صورت مناسب روی تاج قرار گیرد که این امر سرریز کلید پیانویی را یک گزینه مفید برای نوسازی سدها می‌نماید. [5]

طراحی هیدرولیکی این سرریزها، به دلیل پیچیدگی الگوی جریان، به قدر کافی شناخته شده نیست. از این رو محققان زیادی در سراسر جهان به تحقیق در مورد شناخت هیدرولیک جریان عبوری روی این سرریزها و ارائه فرمول‌ها و روش‌های طراحی آن پرداخته‌اند. از مزایای این سازه که به کاهش هزینه‌های احداث سد کمک می‌کند، بالا بودن دبی عبوری از روی این سرریز، درازای بار هیدرولیکی کم و فضای موردنیاز کمتر است. برای بالا بردن تراز و ارتفاع سدها با هزینه کم استفاده از این گزینه می‌تواند مناسب باشد.

#### ۴-۱ ضرورت انجام تحقیق

سرریز کلید پیانویی دارای شکل خاص و هندسه ویژه با پارامترهای فراوان است. همچنین تاکنون شناخت کافی از عملکرد هیدرولیکی آن به دست نیامده و الگوی دقیقی برای طراحی این نوع سرریز ارائه نشده است از این رو طراحی اجزای این سرریز با مسائل ناشناخته فراوانی روبه‌رو می‌باشد.

تاکنون مطالعات آزمایشگاهی مختلف و همین‌طور شبیه‌سازی‌های عددی معدودی از این سرریز انجام گرفته است. مدل‌سازی‌های عددی تاکنون جریان روی این سرریز را به‌صورت آرام<sup>۱</sup> مدل کرده‌اند. از جمله سؤالات وارده این است که آیا استفاده از مدل‌های آشفتگی دیگر مدل‌سازی این سرریز را دقیق‌تر و با سرعت پردازش بهتری انجام می‌دهد یا خیر؟ همچنین با توجه به وجود پارامترهای مختلف در سرریز، تأثیرگذاری پارامترهای مختلف به‌طور کامل روشن نیست. تاکنون پیشنهادهایی برای بالا بردن کارایی این سرریز شده است و محققان در حال بررسی بر روی اجزای مختلف سرریز و استفاده از گزینه‌های ابعادی مختلف برای افزایش کارایی سرریز هستند.

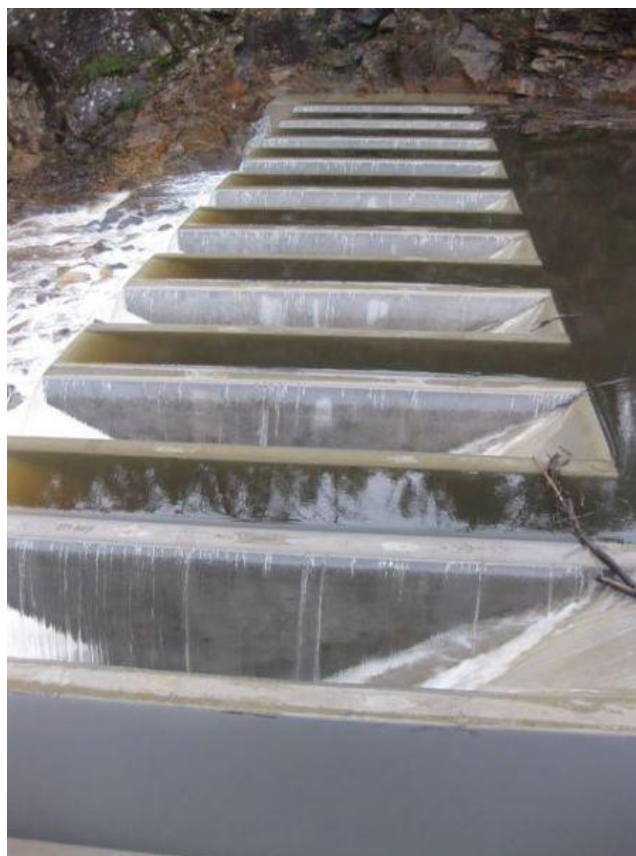
در این تحقیق با استفاده از روش دینامیک سیالات محاسباتی به شبیه‌سازی جریان بر روی این سرریز کلید پیلانویی پرداخته شده است. برای شناخت بیشتر با شکل هندسی این سرریز در شکل‌های زیر چند نمونه از این سرریزها را در چند نما نشان شده است.



شکل ۱-۵ سرریز کلید پیلانویی

---

<sup>1</sup> laminar



شکل ۶-۱ سرریز کلید پیانویی

## ۵-۱ هدف تحقیق

در ساخت و بهره‌برداری از سرریزهای کلید پیانویی محدودیت‌هایی وجود دارد. از آن جمله می‌توان به کافی نبودن مطالعات جامع و یکپارچه برای استفاده از این سرریزها اشاره کرد.

در این تحقیق به مطالعه اثرگذاری مدل‌های مختلف آشفتگی برای شبیه‌سازی جریان روی این سرریز و همین‌طور بررسی تأثیرگذاری یک سری پارامترهای هندسی و الگوها و روابط ارائه‌شده بر روی این سرریز سعی به شناخت بیشتر رفتار هیدرولیکی و عملکرد پارامترهای هندسی سرریز داریم. لمپریر در سال ۲۰۰۹ یک الگو برای پارامترهای مختلف این سرریز ارائه نمود. می‌توان گفت این الگو برآیند تحقیقات مختلف بر روی این سرریز و بر روی پارامترهای هندسی مختلف آن است. در این تحقیق اثرگذاری این الگو بررسی می‌شود همچنین تأثیرگذاری دیواره بر روی تاج سرریز از دیگر موارد بررسی در این پایان‌نامه می‌باشد.

## ۶-۱ روش تحقیق

در این تحقیق از نرم‌افزار دینامیک سیالات محاسباتی FLOW-3D که برای حل عددی معادلات حاکم بر جریان سیالت بر مبنای روش حجم محدود به کار می‌رود، استفاده خواهد شد. در ابتدا مدل عددی از مدل فیزیکی که توسط دیگر محققین در آزمایشگاه ساخته و مورد مطالعه قرار گرفته است (lemperier 2003) ایجاد می‌شود این مدل توسط نرم‌افزار Autocad ساخته‌شده و به نرم‌افزار وارد می‌شود سپس با تعریف شبکه حل و تعریف شرایط مرزی و معرفی فیزیک مدل‌سازی از جمله نوع سیال، انتخاب مدل‌های آشفتگی و تمهیدات لازم برای تعریف خروجی مناسب در نرم‌افزار شبیه‌سازی سرریز انجام گرفته است و در انتها نتایج صحت سنجی شده و با نتایج به‌دست‌آمده در مطالعه آزمایشگاهی مقایسه می‌شود سپس هدف اصلی پروژه یعنی حساسیت‌سنجی‌های مربوطه بر روی مدل و مطالعات پارامتریک برای رسیدن به حالت‌هایی با عملکرد بهتر انجام خواهد شد.



## ۷-۱ ساختار پایان نامه

روند انجام این پژوهش در ۶ فصل اصلی انجام شده است: در فصل اول به ضرورت و هدف و شیوه‌های انجام تحقیق پرداخته می‌شود. در فصل دوم به معرفی و بررسی ساختار این سرریز و بررسی هیدرولیکی سرریز پرداخته می‌شود؛ همچنین مطالعات پیشین در رابطه با عملکرد این سرریزها در این فصل قرار دارد. با توجه به این موضوع که مبنای این پژوهش مبتنی بر اساس شبی سازی عددی شکل گرفته است، لذا فصل سوم در رابطه با معادلات حاکم بر جریان و روش‌های عددی مدل‌سازی آن در این تحقیق خواهد بود. در فصل چهارم چگونگی مدل‌سازی این سرریز، شرایط مرزی و مدل آشفتگی و غیره شرح داده شده و با توجه به داده‌های آزمایشگاهی در دسترس، صحت سنجی مدل عددی ارائه می‌شود. در فصل پنجم به تأثیرگذاری مدل‌های آشفتگی مختلف، بررسی تغییرات پارامتریک شامل استفاده از دیواره، بررسی یک الگوی جدید پیشنهادی می‌پردازیم. فصل ششم یا فصل پایانی این تحقیق نیز دربردارنده نتایج اصلی حاصله از تحقیق حاضر و ارائه پیشنهادهایی برای تحقیقات آینده خواهد بود.



## فصل دوم

معرفی موضوع و تحقیقات انجام شده

سرریز های کلید پیانویی با افزایش طول موثر سرریز ، استفاده از شیب در دهانه ها ، استفاده از جلوآمدگی در دو طرف بالا دست و پائین دست سرریز و غیره توانسته شکل مناسبی برای عبور آب از روی تاج را فراهم نماید. در سرریز کلید پیانویی بخش های نا شناخته زیادی وجود دارد که محققین در حال مطالعه و بررسی بر روی آن ها هستند. در این فصل ابتدا به معرفی این سرریز می پردازیم و تاریخچه طراحی این سرریز و تغییرات صورت گرفته روی آن ارائه می شود سپس مطالعات انجام شده بر روی این سرریز را مرور می کنیم. این مطالعات به صورت تفکیک شده برای هر یک از پارامترهای سرریز ارائه شده است.

## ۲-۲ سرریز کلید پیانویی

اولین بار این نوع سرریز توسط لمپریدر موسسه Hydrocoop فرانسه و آزمایشگاه هیدرولیک و محیطزیست دانشگاه Biskra الجزایر مورد بررسی قرار گرفتند. [6]

پایه های این نوع سرریز مستطیلی شکل می باشند. برخلاف سرریز لایرننت که تاج آن عمودی است سرریز کلید پیانویی دارای سطحی مایل در سطح تاج است که در دو جهت بالادست و پائین دست متفاوت می باشد به دلیل این حالت به شکلی مشابه کلیدهای پیانو می باشند که به چنین نامی مشهور شده است. با توجه به میزان شیب میزان جلوآمدگی مقدار مشخصی دارد. کوچک بودن پایه این نوع سرریز نسبت به سرریز لایرننت فضای کمتری را اشغال می کند و عملکرد هیدرولیکی بهتری دارد و راحت تر نصب می شوند حتی در فضاهای بسیار محدود فونداسیون مثل تاج سدهای وزنی قابل استفاده می باشند.

از جمله مزیت های سرریزهای کلید پیانویی می توان به موارد زیر اشاره کرد. قابلیت احداث روی سدهای موجود و سدهای وزنی جدید را دارند، دبی مخصوص عبوری از سرریز را تا  $100 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$  افزایش می دهند، دبی عبوری از

این سرریزها حداقل ۴ برابر سرریزهای معمولی است، باعث افزایش ظرفیت مخزن می‌گردند، از لحاظ اقتصادی بسیار مقرون به صرفه بوده و هزینه نگهداری کمتری دارند.[2]

اولین سرریز پیمانویی در سال ۲۰۰۶ در سد گلورس در فرانسه تعبیه شد [7]. همچنین در سه سد دیگر در فرانسه نیز استفاده شده است به نام‌های سنت مارک (۲۰۰۸) اترویت (۲۰۰۹) گلوریتس (۲۰۱۰) به غیر از این‌ها در هند و ویتنام نیز سدهایی با این نوع سرریز احداث شده است.[8]



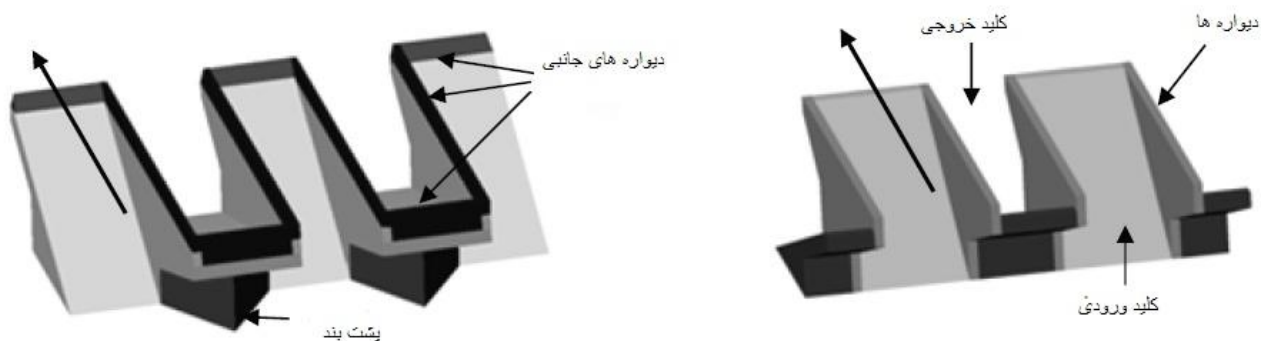
شکل ۱-۲ سرریز سد اترویت در فرانسه



شکل ۲-۲ سرریز سنت مارک در فرانسه

## ۲-۲-۱ شکل هندسی و اجزای سرریز کلید پیانویی

سرریز کلید پیانویی دارای شکل هندسی خاص و پارامترهای مختلفی می باشد. ساختمان سرریز کلید پیانویی را می توان ترکیبی از المان های مختلف توصیف کرد. از اجزای اصلی این سرریز می توان به دیواره جانبی، پشت بند ها، کلید ورودی، کلید خروجی و دیواره مابین آن ها اشاره کرد.[9]

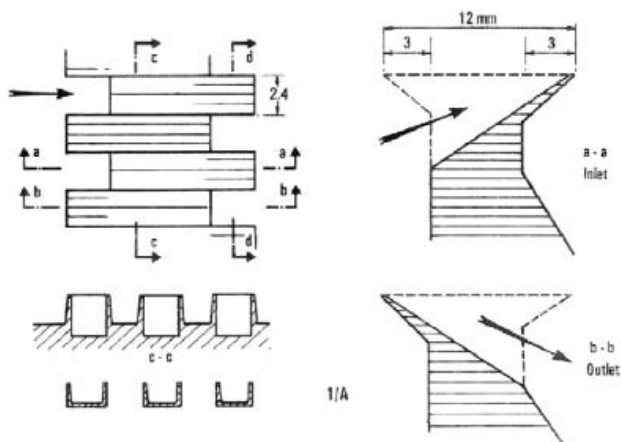


شکل ۲-۳ اجزای اصلی سرریز کلید پیانویی [9]

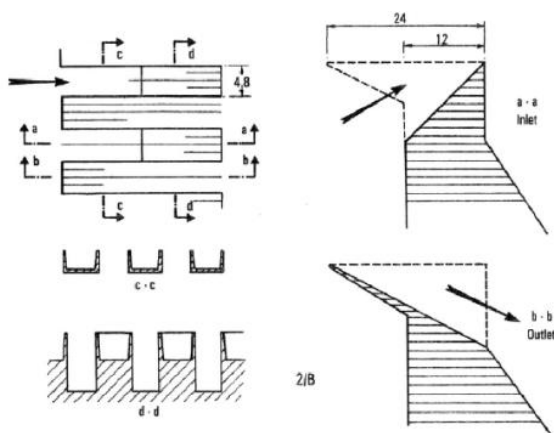
دو فرم اساسی برای این نوع سرریز وجود دارد.[6]

نوع A: در این نوع بیرون آمدگی در هر دو طرف پائین دست و بالادست وجود دارد. شکل متعادل سازه مزیتی است برای استفاده از قطعات بتن پیش ساخته و ممکن است برای دبی پیش از ۲۰ مترمکعب استفاده شود. اثرات کوچک بودن پایه همانطور که قبلا ذکر شد اجازه قرار گرفتن بر روی تاج سد و افزایش دادن دبی عبوری را می دهد.

نوع B: بیرون آمدگی فقط در بالادست قرار دارد. بار سازه کمتر است و برای دبی‌های بالا این نوع را برای پروژه‌های سد جذاب می‌کند و دبی‌های بیش از ۱۰۰ مترمکعب را اجازه عبور می‌دهد. [2]

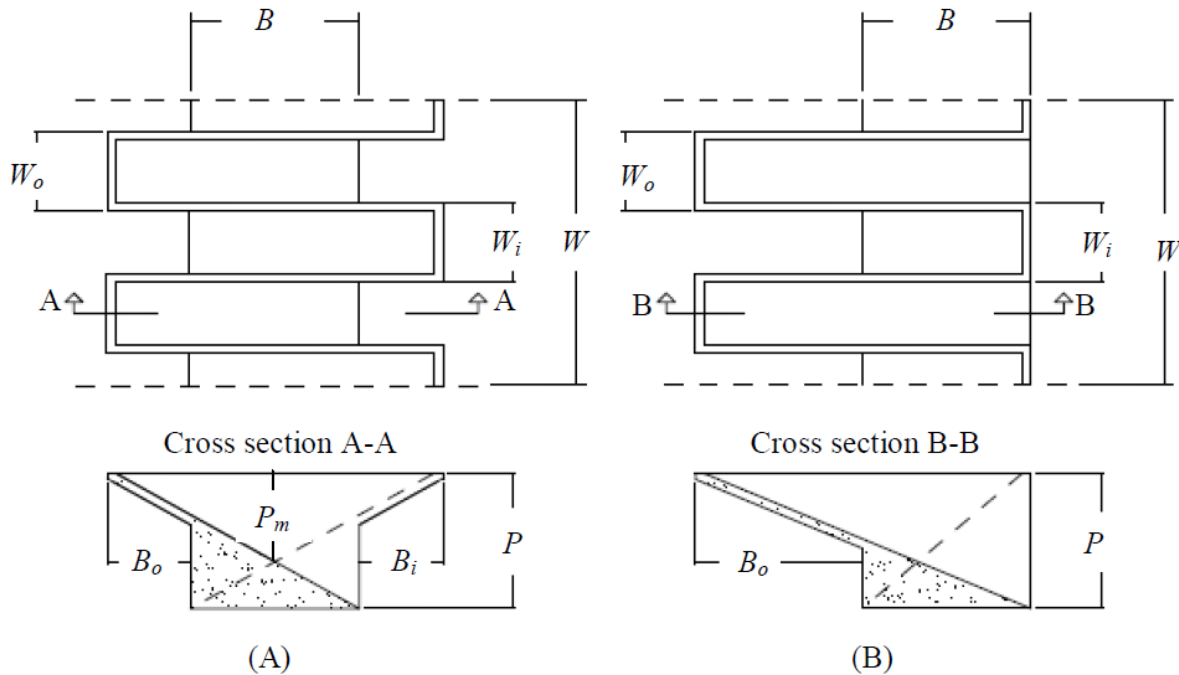


شکل ۲-۴ سرریز کلید پیانویی نوع A



شکل ۲-۵ سرریز کلید پیانویی نوع B

از جمله مهم‌ترین پارامترهای هندسی این نوع سرریز می‌توان به ارتفاع آن ( $P$ )، طول سرریز ( $L$ )، طول پایه<sup>۱</sup> ( $B$ )، عرض سرریز یا عرض پایه ( $W$ )، ارتفاع تا مرکز شیب کف ( $P_m$ )، شیب کلید ورودی ( $S_i$ )، شیب کلید خروجی ( $S_o$ )، جلوآمدگی بالادست ( $B_o$ )، جلوآمدگی پائین‌دست ( $B_i$ )، عرض کلید ورودی ( $W_i$ )، عرض کلید خروجی ( $W_o$ )، ضخامت دیواره‌ها ( $T_s$ ) اشاره کرد. از مهم‌ترین نسبت‌های هندسی می‌توان به نسبت طول سرریز به عرض ( $n=L/W$ )، نسبت جلوآمدگی در بالادست به جلوآمدگی در پائین‌دست ( $B_i/B_o$ )، نسبت عرض ورودی به خروجی ( $W_i/W_o$ ) و نسبت ضخامت دیواره به ارتفاع ( $T_s/P$ ) اشاره کرد. [4]



شکل ۲-۶ پارامترهای هندسی اصلی سرریز کلید پیاپی (سمت راست تیپ B، سمت چپ تیپ A) [4]

<sup>1</sup>-footprint



## ۲-۳ تاریخچه مطالعات

در این بخش به مطالعه تحقیقات انجام شده بر روی این سرریز در گذشته می پردازیم. ابتدا مدل سازی های عددی انجام گرفته بر روی این سرریز را مرور می کنیم و روش مدل سازی در آن ها را بررسی می کنیم. در ادامه آزمایش های انجام شده بر روی پارامترهای مختلف سرریز به صورت مجزا معرفی می گردد.

## ۲-۳-۱ مدل سازی ها

مطالعات انجام شده بر روی این سرریز بیشتر به صورت آزمایشگاهی بوده و با ساختن نمونه های فیزیکی از این سرریز و محاسبه دبی عبوری تحت تاثیر پارامتر های مختلف بررسی می شده است. غالباً با استفاده از نتایج دبی به دست آمده و قرار دادن در فرمول کلی سرریز ها (فرمول ۱) نتایج آزمایشات، نسبت به ضریب گذر دهی سرریز مطالعه شده است. مدلسازی فیزیکی در ابعاد بزرگ به ما کمک می کند تا رفتار هیدرولیکی سازه را بفهمیم و شرایط آزمایش را به شرایط واقعی نزدیک تر کنیم

در سال های اخیر چند مورد مطالعه عددی نیز بر روی این سرریز انجام شده است. اولین بررسی این سرریز به صورت عددی یک مدل عددی یک بعدی بود که توسط اریکوم و همکاران در سال ۲۰۱۰ انجام شد. در مدل اریکوم برای کوچک کردن حجم محاسبات از یک چرخه تکرار شونده متشکل از نیمی از دهانه ورودی و نیمی از دهانه خروجی و جدار بین آن ها می باشد. این مدل بر اساس شبیه سازی یک بعدی مجزا برای دهانه ورودی و خروجی تعریف شده است که با یک ارتفاع آب بالادست مشترک و همچنین قابلیت اثر متقابل بین دهانه ها که در واقع جابجایی دبی بر روی جداره بین دهانه ها هست، عمل می کند. نتایج خروجی این مدل سازی با نتایج آزمایشگاهی مقایسه شده و تطابق مناسبی داشته است. این مدل توانایی نمایش سطح آزاد جریان بر روی سرریز به صورت یک بعدی را نیز داشت. [10]

پس از آن پرالنگ و همکاران در سال ۲۰۱۱ یک مدل سه بعدی از این سرریز را با استفاده از نرم افزار دینامیک سیالات محاسباتی flow-3D ساختند و مطالعات پارامتری بر روی آن انجام دادند. این مدل بر اساس مدل آزمایشگاهی لمپریر و آمین که در سال ۲۰۰۳ ارائه شد ساخت شده و در این مدل نیز از یک نیمه از کلید ورودی و یک نیمه از کلید خروجی و جدار ما بین آن ها تشکیل شده است که در دو طرف از مرز متقارن استفاده نموده است. در این مدل از مدل های آشفتگی جریان استفاده نشده و جریان به صورت آرام (laminar) در نظر گرفته شده است. مدل معادله ناویر استوکس را با یک میلیون مش حل می نماید مدت زمان این مدل سازی ۳۰ ثانیه بوده که در زمان ۸ ساعت نیاز به حل دارد. [11]

در سال ۲۰۱۳ لفبر و همکاران در موسسه EDF-CEH در فرانسه یک مدل سازی دیگر از روی مدل آزمایشگاهی لمپریر و آمین انجام دادند این مدل در واقع مشابه مدل پرالنگ بود که با افزایش ابعاد مش زده شده و کاهش تعداد آن (۵۰۰۰۰ مش با حد اقل ابعاد ۲۰ سانتی متر) ساخته شده بود. در این مدل نیز از مدل های آشفتگی استفاده نشد و جریان به صورت آرام در نظر گرفته شد. [12]

در دو مدل سازی بالا تعریف فیزیک مساله و شبکه حل نسبتا مشابه بوده و فقط کاهش تعداد مش باعث افزایش سرعت حل پردازنده و کاهش حجم محاسبه و زمان حل شده است. در هر دو حالت از مدل سازی سه بعدی در حالت جریان آرام استفاده شده و نتایج بر حسب دبی استخراج شده است.

## ۲-۳-۲ بررسی پارامتری

با توجه به وجود پارامتر های مختلف هندسی در این سرریز محققین با ساخت مدل های مختلف از این سرریز، تاثیر گذاری هریک از پارامترهای هندسی این سرریز را مورد بررسی قرار داده اند در ادامه به تفکیک، مطالعات انجام شده بر روی هریک از اجزای سرریز و نتایج آن ها را مرور می کنیم.

## ۲-۳-۱-۲ مقایسه سرریز های نوع A و B

همان طور که در قبل اشاره شد دو تیپ از این نوع سرریز متداول شده است که به نوع A و B مشهور است. نوع A دارای جلو آمدگی در بالا دست و پائین دست به میزان مساوی بوده ( $B_i/B_0=1$ ) و نوع B دارای جلو آمدگی فقط در قسمت بالا دست می باشد ( $B_i/B_0=0$ ). [4]

آمین ولمپریر طی تحقیقاتی در سال ۲۰۰۳ اشاره داشتند که سرریز نوع B، ۱۰٪ افزایش کارایی نسبت به سرریز نوع A دارد و با کاهش بار سازه ای برای سد های وزنی مناسب است. سرریز نوع A هم به دلیل جلو آمدگی مشابه در بالا دست و پائین دست برای اجرا با بتن های پیش ساخته بسیار مناسب است. [6]

بارکودا و همکاران در سال ۲۰۰۶ هم مشابه تحقیقات قبلی به افزایش کارایی ۱۰٪ سرریز نوع B نسبت به A دست یافتند (در میزان ارتفاع و  $n$  مساوی). [13]

تاکنون مطالعات فراوانی بر روی این نوع سرریز انجام گرفته است. بیشتر این تحقیقات با ساخت مدل های فیزیکی از این نوع سرریز و انجام مطالعات آزمایشگاهی بوده است. مدل های عددی از این نوع سرریز نیز ساخته شده است. اغلب مدل های مطالعه شده از این نوع سرریز، سرریزهای نوع A بوده اند. [4]

## ۲-۳-۲-۲ بررسی تاثیر جلو آمدگی

در تحقیقات دیگری که از آمین و لمپریر در سال ۲۰۰۶ انجام شد تاثیر جلو آمدگی در سه حالت بررسی شد اول حالتی که جلو آمدگی در بالادست بیشتر از پائین دست می باشد حالت دوم میزان جلو آمدگی برابر و سومین حالت مربوط جلو آمدگی فقط در بالادست می باشد. آزمایش نشان داد حالت بدون جلو آمدگی در پائین دست (سرریز نوع B ( $B_i/B_0=0$ )) نسبت به حالتی که در پائین دست جلو آمدگی دارد ( $B_i/B_0=2$ ) کارایی خیلی بهتری دارد در یک نسبت ارتفاع به هد آب مشخص (۴/۰) تا ۱۲٪ افزایش کارایی مشاهده شد. از طرف دیگر در

حالت متقارن، که در بالادست و پائین دست جلو آمدگی داریم (سرریز نوع  $A(B_i/B_o=1)$ ) و در همان نسبت ارتفاع به هد آب مشخص ضریب دبی تا ۰.۷٪ بیشتر نسبت به حالت نامتقارن است. با توجه به این شواهد می توان گفت سرریز بدون جلو آمدگی در پائین دست گزینه خوبی برای دبی های بزرگ است و سرریز با جلو آمدگی متقارن نیز به جهت مناسب بودن برای اجرا توسط قطعات پیش ساخته گزینه اقتصادی خوبی می باشد. [1]

در یک مطالعه دیگر توسط ماچلیس و همکاران در دانشگاه لیگ در سال ۲۰۱۲ با یک مدل سازی دیگر انجام گرفت اشاره داشتند در رابطه با طول جلو آمدگی می توان گفت که یک مدل با شکل متقارن یعنی میزان جلو آمدگی برابر در بالادست و پائین دست یک گزینه قابل قبول برای پروژه های عمومی می باشد همچنین برای سد هایی در مناطق صنعتی سرریز هایی با جلو آمدگی بلند تر در بالادست می تواند بهبود بخش باشد. [14]

اندرسون در سال ۲۰۱۱ با ساختن یک مدل آزمایشگاهی از یک نوع سرریز لایبرنت مستطیلی باشیب کف مایل (مشابه یک سرریز کلید پیانویی بدون جلو آمدگی در دو طرف آن) و مقایسه آن با یک سرریز کلید پیانویی نشان داد گذردهی دبی چه در بالا دست و چه در پائین دست برای سرریز کلید پیانویی بالا تر از سرریز لایبرنت مستطیلی می باشد. اندرسون افزایش کارایی در سرریز کلید پیانویی را منبعت از وجود جلو آمدگی ها که باعث کاهش اثر استغراق موضعی می شوند عنوان کرد. [4]

پرالنگ و همکاران در سال ۲۰۱۱ با مطالعه عددی روی سرریز، یک مدل سرریز را با ثابت نگه داشتن طول آن و افزایش دادن طول جلو آمدگی به سمت بالادست (که مشابه حالت سرریز نوع  $B$  می شود) نتیجه گرفت که در صورت افزایش طول جلو آمدگی در بالا دست و کاهش آن در پائین دست گذردهی سرریز افزایش پیدا می نماید. اگر چه این میزان افزایش گذردهی دبی خیلی قابل توجه نبود به طور میانگین حدود ۲/۵٪ افزایش و در حالت ماکزیمم ۶/۶٪ افزایش گذردهی بوده است. پرالنگ نتیجه گرفت سرریز نوع  $B$  دارای کارایی بیشتری بوده است. این کارایی سرریز در هد های پائین تر تاثیر گذاری بیشتری دارد. البته توجه به پارامتر جلو آمدگی برای اجرای سرریز و پایداری سازه بسیار ضروری می باشد. [11]

## ۲-۳-۲-۳ بررسی نسبت عرض ورودی به خروجی ( $W_i/W_o$ )

یکی دیگر از پارامترهای بررسی شده در این سرریز میزان نسبت عرض ورودی به خروجی یا همان نسبت عرض کلید ورودی و خروجی است.

امین و لمپریز در سال ۲۰۰۳ و باراکودا و همکاران در سال ۲۰۰۶ میزان  $1/2$  را برای این نسبت پیشنهاد کرده و به میزان بهینه نزدیکتر دیده اند. در تحقیق دیگری به وسیله هین و همکاران در سال ۲۰۰۶ نیز میزان  $1,2$  پیشنهاد شد. [13][6]

لمپریز و امین در سال ۲۰۰۶ سه سرریز با نسبتهای  $W_i/W_o$  برابر  $0,67$  ،  $1$  و  $1/5$  را مورد آزمایش قرار دادند نتیجه گیری آن ها به این موضوع اشاره داشت که با افزایش این ضریب، کارایی سرریز افزایش می یابد. آنها ادعا کردند که  $W_i/W_o=1.2$  کارایی را نسبت به  $W_i/W_o=1$  تا  $5\%$  افزایش می دهد. [1]

لمپریز در سال ۲۰۰۹ میزان  $1,25$  را حالت بهینه برای این نسبت عنوان کرد. [15]

پرالنگ و همکاران یک بررسی توسط مدل سازی عددی در سال ۲۰۱۱ انجام داشتند که طی آن اشاره داشتند نسبت کلید ورودی و خروجی همواره باید بالای  $1$  باشد. آن ها اشاره داشتند میزان این نسبت به میزان هد روی سرریز مرتبط است و در هد های بالا این میزان کاهش می یابد. [11] اساساً تأثیر گذاری این ضریب در هد های بالا بیشتر است. به طور کلی افزایش کلید ورودی نسبت به خروجی مناسب تر است. [23]

اندرسون هم در سال ۲۰۱۱ با بررسی بر روی پنج حالت مختلف از این نسبت به این نتیجه رسید که بالاترین میزان کارایی در نسبت های  $1/25$  و  $1/5$  می باشد. اندرسون عنوان کرد میزان گذردهی سرریز با نسبت  $1/25$  در حالتی که نسبت هد  $H/P > 0,6$  است از نسبت  $1/5$  بیشتر بوده و در  $H/P < 0,6$  نسبت  $1/5$  برای کلید های ورودی به خروجی از نسبت  $1/25$  کارایی بیشتری دارد. ماچلیس و همکاران در سال ۲۰۱۲ آزمایشاتی را روی محدوده  $1/25$  تا  $1/5$  را برای حالت بهینه این نسبت معرفی کردند. [4]

در بررسی عددی دیگری که توسط لفبر وهمکاران در سال ۲۰۱۳ انجام گرفت دهانه های ورودی و خروجی به صورت مجزا مورد بررسی قرار گرفت و میزان ۰/۴ متر تا ۳ متر برای دهانه خروجی مناسب دیده شد در صورتی که دهانه ورودی ۱ متر تا ۴ متر در نظر گرفته شود.[12]

دوسد گلوریس وسنت مارک که این نوع سرریز را دارا می باشند دارای ضریب  $W_i/W_o$  به ترتیب ۱,۴۳ و ۱,۴۱ هستند تمامی تحقیقات اذعان دارند که نسبت های  $W_i/W_o > 1$  کارآیی بیشتری نسبت به  $W_i/W_o < 1$  دارند.

## ۲-۳-۲-۴ مدخل دهانه ورودی

پرانگ وهمکاران در سال ۲۰۱۱ مطالعه ای را بر مدخل دهانه ورودی انجام داد. تاثیر دهانه های ورودی و خروجی بر گذردهی سرریز کاملاً اثبات شده است. مقطع مدخل ورودی مساحت مستطیلی شکل حاصل ضرب عرض دهانه ورودی در ارتفاع سرریز است ( $W_i * P$ ) دو پارامتر ارتفاع و عرض دهانه براین مقطع تاثیر گذارند. در این تحقیق افزایش ارتفاع و کاهش عرض دهانه مورد بررسی قرار گرفت. کاهش عرض دهانه ورودی احتمالاً نرخ جریان را افزایش می دهد البته پدیده اصطکاک هم ممکن است تاثیر منفی بگذارد. پرانگ وهمکاران نتیجه گرفتند کاهش عرض دهانه ورودی اگر همزمان با کاهش عرض خروجی همراه شود می تواند تاثیرات مثبتی روی گذردهی بگذارد. همچنین افزایش ارتفاع به همراه ثابت نگه داشتن عرض های ورودی و خروجی می توان تا ۲۰٪ گذردهی را افزایش دهد. در زمانی که در دهانه سد دارای محدودیت باشیم افزایش ارتفاع سرریز می تواند موثر باشد البته باید به اصطکاک توجه شود.[11]

## ۲-۳-۲-۵ شیب کف سرریز

لمپریر و جوان در سال ۲۰۰۵ کمترین میزان شیب کف را ۱:۲ (افقی: عمودی) در نظر گرفته اند.[16]

بارکودا و همکاران ۲۰۰۶ گزارش کرده است با افزایش میزان شیب (البته در هد های بالا) از ۱:۲ به ۲:۳ گذردهی سرریز تا ۲۰٪ افزایش می یابد که این میزان شیب برای هر دو نوع A و B می باشد. [13]

امین ولمپریدر سال ۲۰۰۶ سه مدل مختلف را با مشخصات سابق و ارتفاع مختلف آزمایش کرده اند که در واقع شیب های متفاوتی به وجود می آورد. آن ها گزارش کردند که با افزایش ۲۵٪ ارتفاع گذردهی تا ۶٪ افزایش می یابد. لمپریدر در سال ۲۰۰۹ میزان شیب ۸:۱/۱ را برای سرریز پیشنهاد کرد. [1]

ماچلیس و همکاران ۲۰۱۱ در مطالعات آزمایشگاهی میزان بهینه شیب را مورد مطالعه قرار دادند. آن ها سرریز با هفت شیب مختلف که عبارت بودند از ۳:۲، ۱:۱، ۴:۳، ۶:۱۰، ۱:۴، ۳:۸، ۱:۲ را بررسی نمودند نتایج آن تحقیق شیب ۳:۸ را دارای گذردهی بیشینه معرفی کرد. [17]

به طور کلی از تحقیقات انجام شده بر می آید که با افزایش دادن ارتفاع و شیب افزایش گذر دهی ممکن است. اندرسون در سال ۲۰۱۱ مدل های آزمایشگاهی متفاوتی از سرریز کلید پیانویی و سرریز لایبرنت شیب دار را در شیب های مختلف مورد آزمایش قرار داد در تحقیقات اندرسون تاثیر شیب در سرریز کلید پیانویی تقریباً مشابه بود که به همین دلیل شیب را از پارامترهای تاثیر گذار و مهم این سرریز محسوب نمی داند. [4]

در مطالعه لفر و همکاران در سال ۲۰۱۳ در رابطه با ارتفاع سرریز انجام داد به طور کلی به این نتیجه رسید که با افزایش ارتفاع ظرفیت دبی افزایش پیدا می کند لفر به چند مورد درباره ی افزایش ارتفاع اشاره کرد. با افزایش ارتفاع، مقطع کلید ورودی بزرگتر شده و سرعت در کلید کاهش می یابد همچنین شیب کلید خروجی افزایش یافته و تخلیه از این ناحیه بهبود می یابد. استغراق موضعی در پائین دست کاهش می یابد. [12]

## ۲-۳-۲-۶ نسبت طول تاج به عرض سرریز ( $n=L/W$ )

این نسبت برابر است با نسبت طول تاج سد به صورت غیر خطی به عرض سرریز. لمپریدر و جون در سال ۲۰۰۵ مقدار ی بین ۴ تا ۷ را برای این پارمتر پیشنهاد کردند.

لمپریر در سال ۲۰۰۹ عدد ۵ را میزان نزدیک به بهینه برای پارامتر  $n$  معرفی کرد. [16]

بارکودا و همکاران در سال ۲۰۰۶ میزان بهینه برای  $n$  را عدد ۶ عنوان کرد. [13] امین ولمپریر در سال ۲۰۰۶ گزارش کردند در مقادیر هد ( $H/P$ ) های پائین، مقادیر بالای  $n$  (۸ تا ۵) نتیجه مناسبی برای دریافت کارآیی می دهند ولی در مقادیر بالای هد ( $H/P$ ) بالا رفتن  $n$  تاثیر مثبتی ندارد. [1] هین و همکاران در سال ۲۰۰۶ برای  $H/P$  های پائین عدد ۷ را برای  $n$  مناسب تر و برای  $H/P$  های بالا میزان ۵ و یا ۶ را با صرفه اقتصادی ارزیابی کرد. [18]

### ۲-۳-۲-۷ شکل تاج سرریز

در تحقیقات انجام شده شکل تاج سرریز بر میزان کارآیی سرریز اثر گذار بوده است در تحقیقات بارکودا و همکاران در سال ۲۰۰۶ و ریبرو و همکاران در سال ۲۰۰۷ سه حالت هندسی متفاوت برای شکل تاج سرریز مورد بررسی قرار گرفت: حالت ربع دایره ای بالادست، حالت ربع دایره ای پائین دست و حالت صاف؛ نتایج تحقیقات آن ها نشان داد که حالت ربع دایره ای بالا دست کارآیی بالا تری را دارد اگرچه تغییرات میزان دبی مشخص برای هر شکل هندسی سرریز به صورت مستند وجود ندارد. [19] در تحقیقات دیگر حالت های نیم دایره، شکل پخی و مثلثی نیز مورد بررسی قرار گرفت.

### ۲-۳-۲-۸ هوادهی

هین و همکاران در سال ۲۰۰۶ به این نتیجه دست یافتند که به طور کلی سرریز کلید پیانویی به دلیل داشتن جلوآمدگی و حالت طره ای دارای هوادهی بهتری نسبت به سرریز لابیرنت دوزنقه ای هستند. [18] مطالعه موردی سد سنت مارک در فرانسه توسط ریبرو و همکاران در سال ۲۰۰۷ گزارش کرد که هوادهی در تاج برای جلوگیری از لرزش های نامطلوب در بدنه سرریز ضروری است. [19]



## ۲-۳-۲-۹ تأثیر دیواره

ریبرو در سال ۲۰۰۹ تأثیرگذاری دیواره را بر روی تاج سرریز به صورت موردی در سد اتریوت مطالعه کرد. اضافه کردن دیواره باعث بالا رفتن ارتفاع بدون افزایش طول و همین طور ثابت ماندن شیب می شود. استفاده از دیواره باعث مستقل شدن پارامترهای شیب و ارتفاع از هم می شود و مطالعه‌ی جداگانه هر دو را دقیق تر می نماید. [20]

اندرسون در سال ۲۰۱۱ با مقایسه دو نوع سرریز کلید پیانویی همزمان دارای دیواره و پشتبند دایره‌ای، با سرریز کلید پیانویی ساده نشان داد گذردهی دبی در حالت وجود پشتبند و دیواره بیشتر از حالت ساده هست. [4]

مطالعه ریبرو و همکاران نشان داد با افزایش دادن ارتفاع سرریز تا  $12/3\%$  به واسطه‌ی قرار دادن دیواره روی تاج (تقریباً ۱ متر در نمونه آزمایش) گذردهی سرریز را تا  $15\%$  نسبت به حالت بدون دیواره افزایش می دهد. [20]

پرانگ و همکاران در سال ۲۰۱۱ بر روی تأثیرگذاری دیواره روی تاج تحقیقاتی انجام دادند و دیواره‌هایی به ارتفاع  $0/5$  ،  $1$  و  $2$  متر مورد آزمایش قرار گرفت. نتایج آن‌ها نشان داد دیواره در بالادست خروجی تأثیر مثبت دارد و حجم عبوری دبی از کلید خروجی را افزایش می دهد و متعاقب آن اثر استغراق را کاهش می دهد. همچنین وجود دیواره در پائین دست دهانه ورودی گذردهی را کاهش می دهد. دریافت دبی در این حالت، در هدهای پائین بسیار مؤثر بوده و تا  $46/6\%$  افزایش یافته است. همچنین وجود دیواره برای خروجی سرریز بسیار مفید بوده است. پرانگ و همکاران توصیه کردند که وجود دیواره در بالادست خروجی و عدم وجود آن در پائین دست ورودی مناسب است. [11]

لفبر و همکاران در سال ۲۰۱۳ در ادامه تحقیقات قبلی (پرانگ و همکاران ۲۰۱۱) یک دیواره سراسری در طول تاج قرار دادند و میزان دبی را به صورت مجزا بر روی ورودی و خروجی آن مطالعه کردند آن‌ها هم گزارش کردند تأثیر وجود دیواره در روی خروجی مفید بوده است اما به طور کلی تأثیر زیادی ندارد و افزایش گذردهی در حدود  $5\%$  بوده است. [12]

## ۲-۳-۲-۱۰ استفاده از پشت بند در پائین جلوآمدگی پائین دست

در بعضی از تحقیقات استفاده از پشت بند در پائین جلوآمدگی پائین دست استفاده می کنند اندرسون در سال ۲۰۱۱ و لفبر و همکاران در سال ۲۰۱۳ با آزمایش بر روی چند نوع هندسه متفاوت در پشت بند سرریز کلید پیانویی تاثیر گذاری آنها را آزمودند. این پشت بند ها و شکل هیدرودینامیک آن ها جریان را برای ورود به دهانه ورودی کمک می کنند. نتایج نشان داد بهترین اثر وجود این پشت بند ها حدود ۵٪ کارایی را افزایش می دهد. در هد های پائین این تاثیر کمتر است که به دلیل پائین بودن سرعت جریان است و شکل های مختلف پشت بند تاثیر زیادی بر گذردهی ندارند. تحقیقات نشان داد شکل مستطیلی پشت بند، نسبت به شکل دایره ای تاثیر بهتری دارد. استفاده از پشت بند دارای تاثیرات مثبت ولی محدودی می باشد. وجود پشت بند از لحاظ سازه ای برای پایداری سازه سرریز نیز مناسب است که این امر به دلیل افزایش دادن وزن در بخش بالا دست سرریز می باشد.

[11][12]

## ۲-۳-۲-۱۱ استفاده از جداره جانبی مایل

لفبر و همکاران در سال ۲۰۱۳ با آزمایش یک ایده دیگر دیواره ی جانبی مابین کلید ورودی و خروجی را در حالت های مایل متفاوت آزمایش کردند. در این تحقیق چند حالت برای دیواره بین دهانه ها آزمایش شد که در شکل نمایش داده شده است:

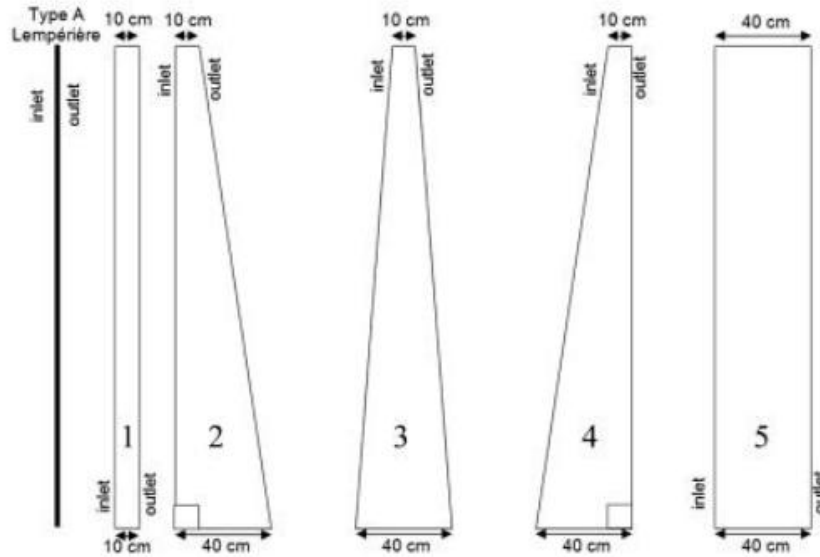
-دیواره عمودی با افزایش ضخامت ۱۰ سانتی متری

- دیواره مایل به سمت خروجی، ۱۰ سانتی متر ضخامت در ابتدا و ۴۰ سانتی متر ضخامت در پائین

- دیواره مایل در دو سمت، ۱۰ سانتی متر ضخامت در بالا و ۴۰ سانتی متر ضخامت در پائین

- دیواره مایل به سمت ورودی، ۱۰ سانتی متر ضخامت در بالا و ۴۰ سانتی متر ضخامت در پائین

- دیواره عمودی با ضخامت ۴۰ سانتی متر



شکل ۲-۷ مقطع دیواره های مایل در تحقیقات لغبر و همکاران در سال ۲۰۱۳

نتایج نشان داد که از لحاظ هیدرولیکی حالت مایل به سمت دو طرف بهترین حالت می باشد که البته ملاحظات اجرایی آن نیز قابل توجه است. [12]

### ۲-۳-۳ الگوی طراحی لمپریر ۲۰۰۹

پس از انجام تحقیقات مختلف بر روی این سرریز لمپریر در سال ۲۰۰۹ یک الگو برای طراحی این سرریز ارائه کرد. این مدل طراحی براساس یک پارامتر با عنوان  $P_m$  می باشد که در واقع با استفاده از این پارامتر ابعاد اجزای مختلف سرریز تعریف می گردد. الگوی طراحی ارائه شده توسط لمپریر برآیند نتایج تحقیقات مختلفی است که

در گذشته بر روی این سرریز انجام گرفته است. محققین با آزمایشات بر روی پارامترهای مختلف نسبت یا اندازه ای را برای پارامتر مورد نظر ارائه داده اند. الگوی لمپریر این حالت بهینه برای پارامترهای مختلف را در یک حالت کلی با این الگو ارائه نموده است.

این پارامتر  $P_m$  را می توان میزان ارتفاع از محل تقاطع ورودی تا خروجی تا بالای سرریز تعریف نمود. البته شایان ذکر است که لمپریر اشاره می کند که تاثیر گذاری مثبت این طرح برای حالتی است که هد آب روی سرریز در ارتفاعی در محدوده  $0.4P_m$  تا  $2P_m$  باشد.

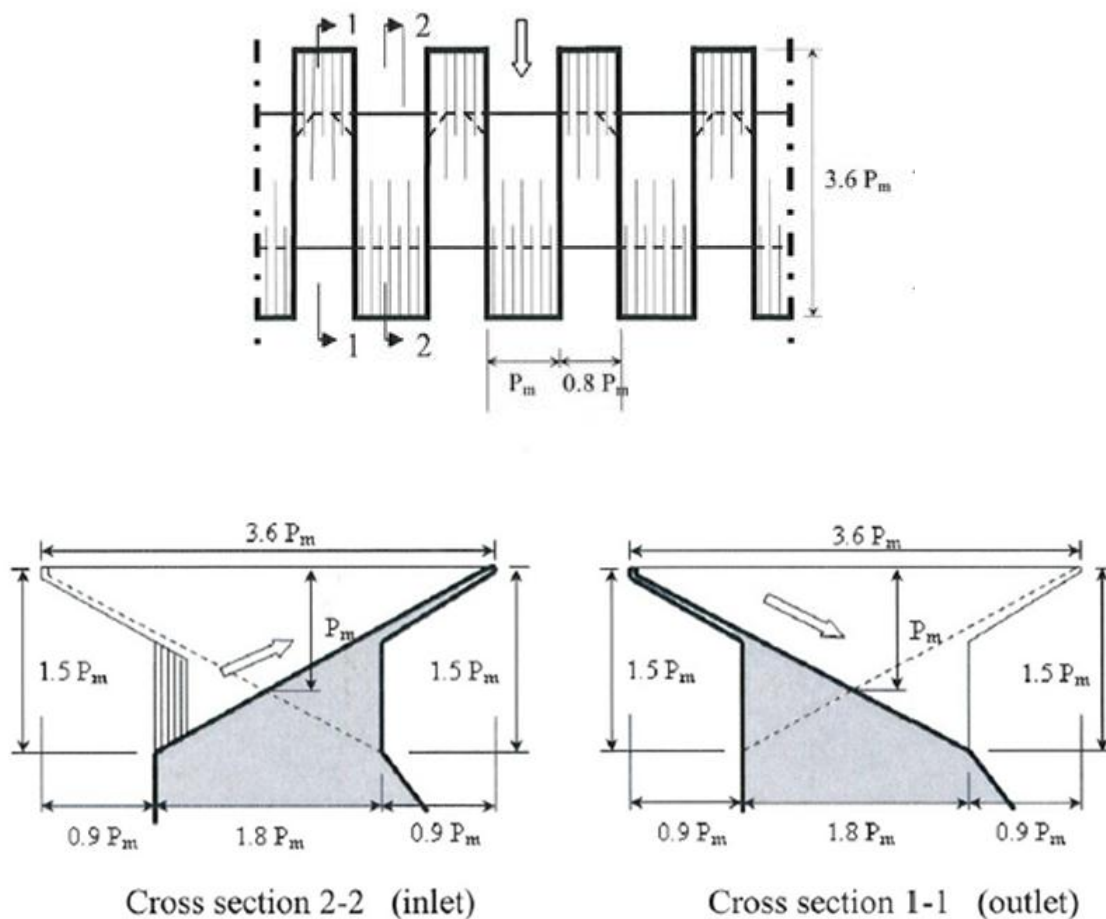
لمپریر پیشنهاد می کند در صورت نبود محدودیت برای ارتفاع و ابعاد در ساختگاه سرریز افزایش دادن پارامتر  $P_m$  و ارتفاع سرریز نسبت به افزایش دادن تعداد دهانه ها می تواند اقتصادی و به صرفه تر باشد. با افزایش ارتفاع  $P_m$  و افزایش ارتفاع کل سرریز مقادیر پارامترهای دیگر هم مبتنی بر نسبت های ارائه شده افزایش می یابند.

همچنین لمپریر برای محدوده مشخص شده برای استفاده از سرریز، رابطه ای برای دبی خروجی از سرریز ارائه می کند. این رابطه به صورت زیر است:

$$q = 4.3 h \sqrt{P_m} \quad (1-2)$$

که در آن  $q$  دبی واحد عرض عبوری از روی تاج سرریز می باشد و نیز  $h$  ارتفاع آب روی تاج و  $P_m$  نیز پارامتر پایه برای طراحی این سرریز است که در بالا معرفی شده است.

مدل طراحی ارائه شده توسط لمپریر در شکل های زیر نشان داده شده است. [15]



شکل ۲-۸ مدل طراحی ارائه شده توسط لمپریر

## ۲-۴ خلاصه و جمع بندی فصل

در این فصل ابتدا به معرفی سرریز کلید پیانویی و تاریخچه ساخت و طراحی آن اشاره کردیم. در ادامه شکل هندسی سرریز و اجزای آن معرفی شد. سپس به مطالعه تحقیقات انجام گرفته روی سرریز پرداختیم. مدل سازی های عددی که تا کنون بر روی این سرریز انجام شده است معرفی شد. پس از آن پارامترهای مختلف سرریز به تفکیک مورد مطالعه قرار گرفت در انتها نیز الگوی طراحی جدید ارائه شده توسط لمپریر معرفی شده است

این فصل در بردارنده مطالبی در خصوص بررسی تاثیرات پارامترهای مختلف هندسی بر عملکرد و کارایی سرریز کلید پیانویی بود . همچنین به معرفی و ذکر کاربرد ها و مزایای این سرریز پرداخته شد .

پژوهش های پیشین زیر بنایی برای تحقیقاتی است که در آینده انجام می گیرد در این تحقیق نیز مبتنی بر تحقیقات گذشته یک مدل عددی با استفاده از نرم افزار FLOW-3D ساخته شده و برخی پارامتر های سرریز و ایده های برای بهتر کردن مدل سازی سرریز مورد بررسی قرار گرفت.

## فصل ۳

معرفی نرم افزار و معادلات حاکم بر جریان

### ۱-۳ مقدمه

برای شناخت پدیده های فیزیکی و آشنایی بیشتر با ویژگی ها و مختصات آن برای استفاده از آن پدیده و کشف ماهیت آن ها به صورت کلی می توان از سه روش استفاده کرد:

- بررسی پدیده مورد نظر در شرایط واقعی (مشاهده، آزمایش صحرایی)
- ساخت مدل فیزیکی از روی مدل واقعی در مقیاس کوچک تر در آزمایشگاه و انجام بررسی بر روی آن
- بیان پدیده به صورت نظری (ریاضی) و حل روابط ریاضی از طریق اعمال شرایط موجود در طبیعت بر مدل.

به دو حالت اول روش های تجربی و حالت سوم به روش تئوریک مشهور است.

در روش های تئوری، ابتدا با مشاهده پدیده فیزیکی، به بیان معادلات حاکم مربوطه پرداخته می شود. مشکلی که در اینجا وجود دارد این است که برخلاف برخی پدیده ها که برای آن ها مدل های ریاضی مناسبی وجود دارد و حل تحلیلی ارائه شده است، پدیده های فیزیکی وجود دارند که هنوز مدل تحلیلی مناسبی برای آن ها یافت نشده است. در این مواقع استفاده از روش های عددی به عنوان یک راه حل برای حل مسائل جریان با عنوان دینامیک سیالات محاسباتی (CFD) مطرح می شود.

### ۲-۳ روش حل

در این تحقیق با توجه به توانایی ها و امکانات و محدودیت های نرم افزارهای موجود، نرم افزار دینامیک سیالات محاسباتی FLOW-3D برای شبیه سازی جریان بر روی سرریز کلید پیانویی استفاده شده است. این نرم افزار



مبتنی بر روشی که به روش حجم محدود<sup>۱</sup> مشهور است می‌باشد. این روش به دلیل مستتر بودن خاصیت بقا جرم در آن، در حل میدان جریان سیال نسبت به سایر روش‌ها برتری دارد.[21]

### ۳-۳ معرفی نرم‌افزار FLOW-3D

نرم‌افزار FLOW-3D یک نرم‌افزار قوی در زمینه دینامیک سیالات محاسباتی می‌باشد که توسط شرکت Flow Science, Inc تولید، توسعه، پشتیبانی می‌شود. این نرم‌افزار برای تحقیق در رابطه با رفتار یک، دو و سه‌بعدی دینامیکی سیالات در محدوده کاربردی وسیعی طراحی شده است. روش حل معادلات در این نرم‌افزار بر اساس روش حجم محدود می‌باشد. این نوع مدل‌های ریاضی از جمله ابزارهای قدرتمند برای حل معادلات پیچیده در مکانیک سیالات می‌باشند. امروزه با افزایش سرعت کامپیوترها، استفاده از این مدل‌ها گسترش چشمگیری یافته است. یکی از قابلیت‌های عمده این نرم‌افزار برای آنالیزهای هیدرولیکی، توانایی مدل کردن جریان‌های سطح آزاد با روش VOF می‌باشد. این روش توسط Hirt and Nichols (1981) ارائه شده است.[22]

نرم‌افزار FLOW-3D، از یک شبکه متشکل از سلول‌های مستطیلی استفاده می‌کند. این شبکه دارای مزایایی برای تولید آسان و نظم مناسب برای بهبود بخشیدن به شبیه‌سازی عددی است که به کمترین ذخیره حافظه احتیاج دارد. استفاده از این نرم‌افزار با توجه به توانایی گرافیکی و ارائه نتایج سه‌بعدی جریان با توجه به هر نوع شکل هندسی سازه‌های هیدرولیکی، می‌تواند اطلاعات مفیدی به طراح در جهت بهینه‌سازی شکل هندسی سازه مورد نظر ارائه نماید.[21]

---

<sup>1</sup> Finite Volume Method

این نرم‌افزار توانایی نمایش تغییرات لحظه‌ای پارامترهای هیدرولیکی مختلف مانند سرعت در جهات مختلف و در هر مقطع دلخواه از سازه را به صورت فایل متنی یا گرافیکی دارا می‌باشد. همچنین نرم‌افزار توانایی نمایش به صورت یک، دو و سه‌بعدی نیز می‌باشد. [24]

نرم‌افزار FLOW-3D الگوهای فیزیکی مختلفی را در خود دارد از جمله می‌توان به آب‌های کم‌عمق، لزجت، کاویتاسیون، آشفستگی، کشش سطحی و محیط‌های متخلخل اشاره کرد. این مدل‌ها در زمینه‌های مختلفی همچون هیدرولیک، هوافضا، ریخته‌گری، علوم دریایی، نفت، گاز، طراحی تزریق مرکب و غیره کاربرد دارد. [21]

این نرم‌افزار با استفاده از تقریب احجام محدود معادله‌های حاکم بر حرکت سیالات را حل می‌کند و همه متغیرها را در مرکز سلول محاسبه می‌کند به غیر از سرعت که مقدار آن در مرکز وجوه سلول حساب می‌شود. در این نرم‌افزار از دو تکنیک VOF و FAVOR استفاده می‌شود. [24]

در ادامه به توضیح دو تکنیک VOF و FAVOR می‌پردازیم:

### - روش حجم سیال (VOF)

این روش برای نشان دادن رفتار سیال در سطح آزاد استفاده می‌گردد. در این روش ناحیه‌ای که باید مدل شود، ابتدا به شبکه‌ای از المان‌های کوچک‌تر و یا حجم کنترل‌هایی تقسیم می‌شود. برای المان‌های حاوی سیال مقادیر عددی متغیرهایی از جمله فشار و سرعت در داخل آن‌ها قرار می‌گیرد.

در زمانی که جریان دارای سطح آزاد می‌باشد، برخی از سلول‌ها وجود دارند که در سطح جریان قرار می‌گیرند و این سلول‌ها به صورت کامل پر از سیال نمی‌باشند و به صورت نیمه‌پر هستند. همین‌طور برخی از سلول‌ها به طور کامل پر از سیال هستند و برخی سلول‌ها به طور کامل خالی‌اند. در این روش یک کمیت  $F$  برای نشان دادن وضعیت سیال تعیین شده است. این کمیت جزئی از سلول را که توسط سیال احاطه شده است را مشخص می‌کند.

این کمیت تابع حجم سیال (Volume of fluid) گفته می‌شود. با تعیین این مقدار می‌توان محل سطح آزاد و زاویه آن را در میدان حل با توجه به کنترل میزان سیال در سلول‌های مجاور مشخص کرد. سیال در سلول در ناحیه سطح آزاد به سلول مجاور با سیال بیشتر نزدیک است. تابع  $F$  در سلول در محیط سیال برابر یک و در خارج از سیال برابر صفر است.

از ویژگی‌های روش VOF ثابت بودن شبکه جریان است. هیچ‌گونه تغییر شکل و جابجایی در شبکه وجود ندارد.

### - روش کسر مساحت - حجم مانع FAVOR

این روش برای شبیه‌سازی سطوح و اجسام صلب مثل مرزهای هندسی استفاده می‌شود. مشابه بالا که از جز حجم هر سلول برای نمایش سطح سیال استفاده می‌کنند یک کمیت جز حجم دیگر برای تعیین سطوح صلب مورد استفاده قرار می‌گیرد. زمانی که در هر سلول حجم اشغال شده توسط بدنه صلب مشخص باشد با روشی مشابه روش VOF می‌توان مرز صلب را در داخل شبکه ثابت مشخص کرد. این مرز برای تعیین شرایط مرزی دیواره که جریان باید از آن تبعیت کند به کار برده می‌شود. همین‌طور این کمیت می‌تواند در مشخص کردن حجمی از سلول که توسط بدنه صلب اشغال نشده استفاده شود.

این نرم‌افزار شامل سه مرحله پیش پردازنده<sup>1</sup>، پس پردازنده<sup>2</sup> و پردازنده<sup>3</sup> می‌باشد. در مرحله پیش پردازش می‌توان هندسه ناحیه مورد نظر و شبکه حل را برای حوزه محاسباتی به وجود آورد. برای نمایش بخش‌های جامد در مرزها و موانع در شبکه حل از روش FAVOR استفاده کرد که از قابلیت‌های مناسب نرم‌افزار است. در قسمت پس پردازش نتایج محاسبه شبکه حل را به صورت گرافیکی و فایل متنی ارائه می‌کند. [21]

---

<sup>1</sup> Pre processor

<sup>2</sup> Post processor

<sup>3</sup> process

### ۳-۴ معادلات حاکم

نرم افزار FLOW-3D معادلات حاکم بر حرکت سیال را با استفاده از تقریبات احجام محدود حل می کند. محیط جریان به شبکه‌هایی با سلول‌هایی تقسیم‌بندی می شود که برای هر سلول مقادیر کمیت‌های وابسته وجود دارد. یعنی همه متغیرها در مرکز سلول محاسبه می شوند؛ به جز سرعت که در مرکز وجوه سلول محاسبه می شود. معادلات حاکم بر جریان که در این نرم افزار استفاده می شود معادلات ناویر استوکس در سه جهت می باشد. این معادلات که معرف سرعت می باشند از تعادل نیروهای وارد بر یک حجم کوچک آب در جریان آرام به دست می آید. در این قسمت به معادلات حاکم بر حرکت سیال و مدل‌های آشفتگی که در نرم افزار استفاده می شود اشاره می شود. ابتدا مناسب است سیستم‌های مختصات موجود در این مدل معرفی شوند.

### ۳-۴-۱ سیستم‌های مختصات

معادلات دیفرانسیلی که در FLOW-3D حل می شوند در دو مختصات کارتیزین  $(x, y, z)$  و استوانه‌ای نوشته می شوند. در صورتی که معادلات به فرم استوانه‌ای نوشته شوند مختصات  $X$  به صورت جهت شعاعی تعبیر می شود و مختصات  $Y$  نیز به مختصات زاویه انتقال داده می شود و مختصات  $Z$  مختصات محوری می باشد. در حالت مختصات استوانه‌ای عبارت‌هایی به معادله حرکت کارتیزین اضافه می شوند این عبارت‌ها دارای یک ضریب به نام  $\xi$  می باشند که اگر  $\xi=0$  باشد مختصات مربوط به هندسه کارتیزین بوده و وقتی  $\xi=1$  هست هندسه استوانه‌ای حاصل می شود. به صورت کلی در نرم افزار FLOW-3D کسرهای مساحت و حجم مستقل از زمان هستند. باین وجود این کمیت‌ها ممکن است زمانی که در مدل موانع متحرک استفاده شود، تغییر کنند.

### ۳-۴-۲ معادلات حاکم بر جریان آشفته

معادلات حاکم بر جریان که در نرم‌افزار FLOW-3D از آن استفاده شده است، معادلات ناویر استوکس در سه بعد می‌باشد. این معادلات که معرف سرعت جریان می‌باشند، از تعادل نیروهای وارد بر یک حجم کوچک آب در جریان آرام به دست آمده است. با استفاده از روش تنش‌های رینولدزی اثر جریان متلاطم را برای این معادلات لحاظ می‌کنیم. روش میانگین رینولدز که به (RANS)<sup>۱</sup> موسوم است شامل سرعت و فشار متوسط و سرعت و فشار نوسانی بوده که با قرار دادن این متغیرها در معادله ناویر- استوکس و مرتب‌سازی آن‌ها، معادله ناویر- استوکس برای جریان متلاطم به دست می‌آید.

در سیستم مختصات کارتزین، معادلات حاکم بر جریان عبارت‌اند از معادله پیوستگی و معادله مومنتم که در ذیل اشاره شده‌اند:

#### - معادله پیوستگی

معادله پیوستگی جریان از قانون بقای جرم و با نوشتن رابطه تعادل جرم برای یک المان سیال به دست می‌آید. به صورت کلی این معادله به صورت زیر نوشته می‌شود [21]:

$$V_F \frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(\rho u A_x) + R \frac{\partial}{\partial y}(\rho v A_y) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho w A_z) + \xi \frac{\partial \rho u A_x}{x} = R_{DIF} + R_{SOR} \quad (۱-۳)$$

که در آن  $V_f$  کسری از حجم باز جریان است،  $\rho$  جرم مخصوص سیال،  $R_{DIF}$  ترم نفوذپذیری آشفتگی و  $R_{SOR}$  برابر منبع جرم است. اجزا سرعت  $(u, v, w)$  در جهات  $(x, y, z)$  و یا  $(r, \theta, z)$  هستند.  $A_x, A_y, A_z$  به ترتیب کسرهای سطح باز برای جریان در جهت‌های  $x, y, z$  هستند. مقدار ضریب  $R$  بستگی به انتخاب نوع سیستم

<sup>1</sup> Reynolds Averaged Navier Stokes

مختصات دارد. در حالتی که از سیستم مختصات استوانه‌ای استفاده شود مشتقات  $y$  باید به مشتقات قطبی تبدیل شوند:

$$\frac{\partial}{\partial y} \rightarrow \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial \theta} \quad (2-3)$$

این تبدیل به این صورت انجام می‌گیرد که:

$$\frac{r}{r_m} \cdot \frac{\partial}{\partial y} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial \theta} \quad (3-3)$$

در این حالت  $y = r_m \theta$  که  $r_m$  یک شعاع مبنای ثابت است. انتقالی که در معادله بالا نشان داده شد با ضرب عبارت  $R = r_m / r$  روی هر مشتق  $y$  در معادله کارتیزین اصلی به دست می‌آید. در مختصات کارتیزین  $R$  برابر ۱ و  $\xi$  برابر صفر است. در مختصات استوانه‌ای  $\xi$  برابر ۱ است.

ترم اول سمت راست معادله پیوستگی جرم برابر با ترم نفوذپذیری آشفتگی است:

$$RDIF = \frac{\delta}{\delta x} \left( v_\rho A_x \frac{\delta \rho}{\delta x} \right) + R \frac{\delta}{\delta y} \left( v_\rho A_y \frac{\delta \rho}{\delta y} \right) + \frac{\delta}{\delta z} \left( v_\rho A_z \frac{\delta \rho}{\delta z} \right) + \xi \frac{\rho v_\rho A_x}{x} \quad (4-3)$$

در این رابطه  $v_\rho$  برابر با  $\mu/\rho$  بوده که  $\mu$  ضریب پخش مومنتم (لزجت) و  $\rho$  یک عدد ثابت است که معکوس آن مربوط به عدد آشفتگی اشمیت است. این نوع پخش جرم تنها برای سنجش مراحل اختلاط آشفتگی بوده و تنها برای حالتی که دانسیته سیال کاربردی غیریکنواخت باشد به کار می‌رود.

عبارت آخر سمت راست معادله پیوستگی جرم،  $R_{sor}$  ترم مربوط به دانسیته است و در شرایطی که یک سیالی به جریان اضافه می‌گردد می‌تواند مورد استفاده قرار بگیرد. به‌عنوان مثال در مدل‌سازی تزریق جرم در خلل و فرج یک

دیوار استفاده می‌شود. برای سیالات غیرقابل تراکم که دانسیته تغییر نمی‌نماید  $\mathbf{r}$  در معادله پیوستگی ثابت است و معادله (۳-۱) به صورت زیر ساده‌سازی می‌شود. [21]

$$\frac{\partial}{\partial x}(uA_x) + R \frac{\partial}{\partial y}(vA_y) + \frac{\partial}{\partial z}(wA_z) + \xi \frac{uA_x}{x} = \frac{R_{SOR}}{\rho} \quad (۵-۳)$$

### - معادله مومنتم

معادلات حرکت برای مؤلفه هر سرعت سیال در سه  $(u, v, w)$  در سه جهت مختصات که معادلات ناویر - استوکس هستند در پائین آمده است:

$$\begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left\{ uA_x \frac{\partial u}{\partial x} + vA_y R \frac{\partial u}{\partial y} + wA_z \frac{\partial u}{\partial z} \right\} - \xi \frac{A_y v^2}{xV_F} &= -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + G_x + f_x - b_x - \frac{R_{SOR}}{\rho V_F} (u - u_w - \delta u_s) \\ \frac{\partial v}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left\{ uA_x \frac{\partial v}{\partial x} + vA_y R \frac{\partial v}{\partial y} + wA_z \frac{\partial v}{\partial z} \right\} + \xi \frac{A_y uv}{xV_F} &= -\frac{1}{\rho} \left( R \frac{\partial p}{\partial y} \right) + G_y + f_y - b_y - \frac{R_{SOR}}{\rho V_F} (v - v_w - \delta v_s) \\ \frac{\partial w}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left\{ uA_x \frac{\partial w}{\partial x} + vA_y R \frac{\partial w}{\partial y} + wA_z \frac{\partial w}{\partial z} \right\} &= -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + G_z + f_z - b_z - \frac{R_{SOR}}{\rho V_F} (w - w_w - \delta w_s) \end{aligned} \quad (۶-۳)$$

در این معادلات  $G_x, G_y, G_z$  و  $f_x, f_y, f_z$  شتاب‌های بدنه و  $b_x, b_y, b_z$  و  $\mathbf{b}_z$  افت جریان در محیط‌های دارای خلل و فرج و ترم آخر در سمت راست مربوط به تزریق جرم در سرعت صفر است.  $\mathbf{U}_w = (u_w, v_w, w_w)$  مؤلفه‌های سرعت جز منبع است که در شرایط معمول صفر است.  $\mathbf{U}_s = (u_s, v_s, w_s)$  مؤلفه های سیال در سطح منبع نسبت به خود آن است.

برای تغییرات لزجت دینامیکی، شتاب ناشی از لزجت در جهات سه گانه عبارت‌اند از:

$$\begin{aligned} \rho'_{\mathcal{R}f_x} &= \omega'_{\mathcal{R}x} - \left\{ \frac{\delta}{\delta x} (A_x \tau_{xx}) + R \frac{\delta}{\delta y} (A_y \tau_{xy}) + \frac{\delta}{\delta z} (A_z \tau_{xz}) + \frac{\xi}{x} (A_x \tau_{xx} - A_y \tau_{yy}) \right\} \\ \rho'_{\mathcal{R}f_y} &= \omega'_{\mathcal{R}y} - \left\{ \frac{\delta}{\delta x} (A_x \tau_{xy}) + R \frac{\delta}{\delta y} (A_y \tau_{yy}) + \frac{\delta}{\delta z} (A_z \tau_{yz}) + \frac{\xi}{x} (A_x + A_y \tau_{xy}) \right\} \\ \rho'_{\mathcal{R}f_z} &= \omega'_{\mathcal{R}z} - \left\{ \frac{\delta}{\delta x} (A_x \tau_{xz}) + R \frac{\delta}{\delta y} (A_y \tau_{yz}) + \frac{\delta}{\delta z} (A_z \tau_{zz}) + \frac{\xi}{x} (A_x \tau_{xz}) \right\} \end{aligned} \quad (7-3)$$

به طوری که در روابط داریم:

$$\begin{aligned} \tau_{xx} &= -2\mu \left\{ \frac{\delta u}{\delta x} - \frac{1}{3} \left( \frac{\delta u}{\delta x} + R \frac{\delta v}{\delta y} + \frac{\delta w}{\delta z} + \frac{\xi u}{x} \right) \right\} \\ \tau_{yy} &= -2\mu \left\{ R \frac{\delta v}{\delta y} + \xi \frac{u}{x} - \frac{1}{3} \left( \frac{\delta u}{\delta x} + R \frac{\delta v}{\delta y} + \frac{\delta w}{\delta z} + \frac{\xi u}{x} \right) \right\} \\ \tau_{zz} &= -2\mu \left\{ \frac{\delta w}{\delta z} - \frac{1}{3} \left( \frac{\delta u}{\delta x} + R \frac{\delta v}{\delta y} + \frac{\delta w}{\delta z} + \frac{\xi u}{x} \right) \right\} \\ \tau_{xy} &= -\mu \left\{ \frac{\delta v}{\delta x} + R \frac{\delta u}{\delta y} - \frac{\xi v}{x} \right\} \\ \tau_{xz} &= -\mu \left\{ \frac{\delta u}{\delta z} + \frac{\delta w}{\delta x} \right\} \\ \tau_{yz} &= -\mu \left\{ \frac{\delta v}{\delta z} + R \frac{\delta w}{\delta y} \right\} \end{aligned} \quad (8-3)$$

### ۳-۴-۳ مدل‌های آشفته‌گی

اساس معادلات حاکم بر جریان‌های آرام و آشفته یکسان بوده و از معادلات پیوستگی و ناویر-استوکس پیروی می‌کند. در جریان‌های همراه با تلاطم و آشفته‌گی از معادلات متوسط گیری شده زمانی جهت در نظر گرفتن اثرات آشفته‌گی استفاده می‌شود. با این عمل یک سری عبارت‌های اضافی در معادلات ناویر استوکس ظاهر می‌شود که از



نوع تنش تفسیر می‌شوند که آن‌ها را تنش‌های آشفته‌گی (تنش‌های رینولدز) می‌گویند. مدل‌های آشفته‌گی برای حل عبارت‌های اضافی ظاهر شده در معادلات ناویر استوکس مورد استفاده قرار می‌گیرند.

بر اساس فرضیه بوزینسک می‌توان با استفاده از ضریبی به نام لزجت گردابی، تنش‌های رینولدزی را به گرادیان‌های سرعت نسبت داد. چون لزجت گردابی برای برآورد تنش‌های آشفته‌گی به کار می‌رود می‌بایست تابعی از خصوصیات جریان آشفته باشد دو مقیاس سرعت و طول برای فرموله کردن لزجت گردابی به کار می‌رود. مدل‌های آشفته‌گی برای تخمین دو پارامتر مقیاس سرعت و طول توسعه داده شدند.

نرم‌افزار FLOW-3D از پنج مدل آشفته‌گی استفاده می‌کند که در ادامه به اختصار آن‌ها را شرح می‌دهیم: [21]

### ۳-۴-۳-۱ مدل طول اختلاط پراتل

ساده‌ترین مدل آشفته‌گی ارائه شده مدل طول اختلاط پراتل می‌باشد. این مدل فرض را بر این می‌گذارد که لزجت سیال با اختلاط آشفته‌گی مرتبط است و در قسمت‌هایی که تنش برشی افزایش یافته است مقدار لزجت نیز افزایش می‌یابد.

مدل طول اختلاط پراتل فرض می‌کند که به وجود آمدن و از بین رفتن آشفته‌گی در تمام نقاط جریان دارای یک تعادل می‌باشد:

$$P_T + G_T = \varepsilon_T \quad (9-3)$$

که در آن  $P_T$  و  $G_T$  به ترتیب عبارت‌اند از تولید آشفته‌گی در اثر برش و شناوری و  $\varepsilon_T$  نیز اتلاف آشفته‌گی است.

اتلاف آشفستگی می تواند به صورت زیر نوشته شود:

$$\varepsilon_T = CNU \sqrt{\frac{3}{2}} \frac{k_T^{3/2}}{TLEN} \quad (10-3)$$

در رابطه فوق  $K_T$  انرژی جنبشی آشفستگی و  $TLEN$  مقیاس طول آشفستگی است که توسط کاربر قابل تعریف است و  $CNU$  پارامتری است که به طور پیش فرض ۰/۰۹ در نظر می گیریم. با استفاده از ترکیب دو معادله بالا می توان میزان لزجت کینماتیکی آشفستگی را به صورت زیر برآورد کرد:

$$v_T = TLEN \sqrt{\frac{2k_T}{3}} \quad (11-3)$$

به دلیل وجود فرضیات محدودکننده، این مدل نسبت به مدل های دیگر استفاده کمتری می یابد.

### ۳-۴-۲ مدل های انتقال آشفستگی

به دلیل این که سه روش یک معادله ای انتقال آشفستگی، روش دو معادله ای  $K-\varepsilon$  و روش گروه های نرمال شده RNG دارای معادلات مشابه و سیری مرتبط به هم هستند این سه روش را به ترتیب در این بخش شرح می دهیم.

#### - مدل یک معادله ای انتقال آشفستگی

در این مدل از یک رابطه دیفرانسیلی بر حسب  $K$  که انرژی جنبشی آشفستگی است استفاده می شود. کمیت  $k$  با حل معادله ناویر استوکس برای این پارامتر قابل تعیین است.

معادله حمل برای  $K$  عبارت است از:

$$\frac{\partial k_T}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left\{ u A_x \frac{\partial k_T}{\partial x} + v A_y \frac{\partial k_T}{\partial y} + w A_z \frac{\partial k_T}{\partial z} \right\} = P_T + G_T + Diff_T - \varepsilon_T \quad (12-3)$$

انرژی جنبشی آشفته  $P_T$  و تولید  $A_z, A_y, A_x, V_F$  عبارت از توابع عملگر FAVOR در نرم افزار است و  $K_T$  انرژی جنبشی آشفته و  $P_T$  تولید انرژی جنبشی آشفته است:

$$P_T = CS\text{PRO} \left( \frac{\mu}{\rho V_F} \right) \left\{ \begin{array}{l} 2A_x \left( \frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + 2A_y \left( R \frac{\partial v}{\partial y} + \xi \frac{u}{x} \right)^2 + 2A_z \left( \frac{\partial w}{\partial z} \right)^2 \\ + \left( \frac{\partial v}{\partial x} + R \frac{\partial u}{\partial y} - \xi \frac{v}{x} \right) \left[ A_x \frac{\partial v}{\partial x} + A_y \left( R \frac{\partial u}{\partial y} - \xi \frac{v}{x} \right) \right] \\ + \left( \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right) \left( A_z \frac{\partial u}{\partial z} + A_x \frac{\partial w}{\partial x} \right) \\ + \left( \frac{\partial v}{\partial z} + R \frac{\partial w}{\partial y} \right) \left( A_z \frac{\partial v}{\partial z} + A_y R \frac{\partial w}{\partial y} \right) \end{array} \right\} \quad (13-3)$$

که در آن CS\text{PRO} پارامتر آشفته است که مقدار پیش فرض آن برابر ۱ است.

ترم اثر شناوری که توسط  $G_T$  در معادله دیده می شود به صورت زیر است:

$$G_T = -CRHO \left( \frac{\mu}{\rho^3} \right) \left( \frac{\partial \rho}{\partial x} \frac{\partial p}{\partial x} + R^2 \frac{\partial \rho}{\partial y} \frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial \rho}{\partial z} \frac{\partial p}{\partial z} \right) \quad (14-3)$$

مقدار CRHO به صورت پیش فرض برابر صفر است. در جریان‌های با شبیه‌سازی شناوری حرارتی برابر ۲/۵ گرفته می‌شود.

عبارت پخش (Diff) نیز به صورت زیر می‌باشد:

$$Diff_T = \frac{1}{V_F} \left\{ \frac{\partial}{\partial x} \left( \nu_k A_x \frac{\partial k_T}{\partial x} \right) + R \frac{\partial}{\partial y} \left( \nu_k A_y R \frac{\partial k_T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \nu_k A_z \frac{\partial k_T}{\partial z} \right) + \xi \frac{\nu_k A_x k_T}{x} \right\} \quad (15-3)$$

$$\nu_k = RMTKE \left( \frac{\mu}{\rho} \right)$$

$\nu$  عبارت است از ضریب پخش و بر اساس مقدار موضعی لزجت آشفته محاسبه می‌شود پارامتر  $RMTKE$  برای تعیین ضریب پخش آشفته‌گی است که به صورت پیش فرض مقدارش برابر ۱ است (این مقدار در مدل RNG برابر ۱/۳۹ می‌باشد). نرخ اتلاف  $\epsilon_T$  در این مدل مشابه مدل طول اختلاط پراپانتل به انرژی جنبشی آشفته‌گی بستگی دارد.

### مدل K-ε -

این مدل شامل دو معادله انتقال برای انرژی جنبشی آشفته‌گی ( $k$ ) و نرخ استهلاک کرنش ( $\epsilon$ ) است. در این روش یک معادله برای اتلاف انرژی هم باید حل بشود. معادله انتقال برای اتلاف آشفته‌گی،  $\epsilon_T$  عبارت است از:

$$\frac{\partial \epsilon_T}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left\{ u A_x \frac{\partial \epsilon_T}{\partial x} + v A_y R \frac{\partial \epsilon_T}{\partial y} + w A_z \frac{\partial \epsilon_T}{\partial z} \right\} = \frac{CDIS1 \cdot \epsilon_T}{k_T} (P_T + CDIS3 \cdot G) + Diff_\epsilon - CDIS2 \frac{\epsilon_T^2}{k_T} \quad (16-3)$$

که در آن پارامترهای CDIS3، CDIS2، CDIS1 پارامترهای بی‌بعدی هستند که مقادیرشان به صورت پیش فرض به ترتیب برابر ۱/۴۴، ۱/۹۲ و ۰/۲ می‌باشد. پخش اتلاف نیز به صورت زیر می‌باشد:

$$Diff_{\varepsilon} = \frac{1}{V_F} \left\{ \frac{\partial}{\partial x} \left( \nu_{\varepsilon} A_x \frac{\partial \varepsilon_T}{\partial x} \right) + R \frac{\partial}{\partial y} \left( \nu_{\varepsilon} A_y R \frac{\partial \varepsilon_T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \nu_{\varepsilon} A_z \frac{\partial \varepsilon_T}{\partial z} \right) + \xi \frac{\nu_{\varepsilon} A_x \varepsilon_T}{x} \right\} \quad (17-3)$$

### - مدل RNG

مدل RNG از معادلاتی نظیر معادلات مدل K-ε استفاده می‌کند بعضی از ضرایب در مدل K-ε به صورت تجربی استخراج شده بودند که این مقادیر در روش RNG به صورت صریح تعیین شده است. مقادیر CDIS1 و CNU متفاوت از روش K-ε و به ترتیب برابر ۱/۴۲ و ۰/۰۸۵ می‌باشد. و ضریب CDIS2 با استفاده از دو عبارت انرژی و تولید آشفتگی به دست می‌آید. در این روش از روش‌های آماری برای استخراج معادلات متوسط گیری شده استفاده می‌شود.

### ۳-۳-۴-۳ مدل شبیه‌سازی گردابه های بزرگ

این مدل که به LES موسوم است اگرچه دارای نتایج دقیق تری نسبت به مدل‌های متوسط گیری رینولدز است اما دارای هزینه محاسباتی بالا می‌باشد. این مدل از این قاعده اساسی پیروی می‌کند که تمام ساختارهای آشفتگی که قابل محاسبه با شبکه‌های محاسباتی هستند به طور مستقیم محاسبه شوند و فقط ساختارهای ریزی که قابل محاسبه نیستند، تقریب زده شود.

### ۵-۳ جمع‌بندی و خلاصه فصل

در این فصل به معرفی نرم‌افزار، بررسی مدل‌های عددی و روش‌های حل آن‌ها پرداختیم. در این نرم‌افزار از تقریب حجم محدود و تفاضل محدود برای محاسبه مکانی و زمانی متغیرهای معادلات حرکت استفاده می‌شود. سپس نرم‌افزار و مدل‌های استفاده‌شده و معادلات حاکم بر سیال و مدل‌های آشفتگی استفاده‌شده در آن ارائه شد. در فصل بعد به مدل‌سازی جریان روی سرریز کلید پیلانویی و بررسی عملکرد نرم‌افزار خصوصاً در مدل‌های آشفتگی مختلف می‌پردازیم.

## فصل ۴

### صحت سنجی مدل سازی

#### ۴-۱ مقدمه

در این فصل سرریز کلید پیانویی با مدل عددی نرم‌افزار FLOW-3D مدل‌سازی می‌شود و نتایج به‌صورت کمی صحت سنجی شده است. داده‌های به‌دست‌آمده در مطالعه آزمایشگاهی لمپریر و آمین در سال ۲۰۰۳ در هدهای مختلفی انجام شده است. [6] در این تحقیق مدل‌سازی سرریز کلید پیانویی در ۵ هد ۰/۵، ۱، ۱/۵، ۲، ۴ انجام گرفته است. مدل این سرریز با توجه به ابعاد مدل لمپریر ۲۰۰۳ ساخته شده و به نرم‌افزار وارد گردیده است. در این فصل مراحل تعریف شبکه حل و تعیین فیزیک مسئله و شرایط مرزی مشخص شده‌اند. استفاده از شرایط مرزهای متقارن در دو طرف این سرریز لازمه این کار می‌باشد و حجم محاسبه را به میزان حداقل خود می‌رساند. میزان نتیجه خروجی را برحسب دبی خروجی ارزیابی می‌کنیم. این میزان با تقسیم بر عرض مدل به‌صورت دبی واحد عرض ارائه می‌شود که با نتایج آزمایشگاهی آمین و لمپریر در سال ۲۰۰۳ صحت سنجی می‌شود.

#### ۴-۲ مشخصات مدل

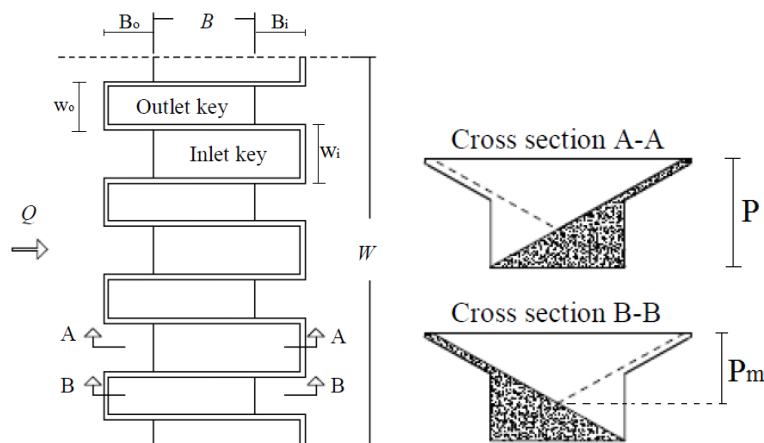
در این تحقیق مشابه تحقیقات پرنالنگ و همکاران در سال ۲۰۱۱ و لغبر و همکاران در سال ۲۰۱۳ برای مدل‌سازی سرریز از مدلی از سرریز تیپ A که لمپریر در سال ۲۰۰۳ ارائه کرده بود، استفاده شده است. این مدل در واقع مدلی است که لمپریر سرریز کلید پیانویی را برای اولین بار معرفی نموده است. مدل‌سازی مبتنی بر ابعاد واقعی سرریز انجام گرفته است. باید توجه داشت که در مدل‌سازی آزمایشگاهی عرض دهانه‌های ورودی و خروجی و همین‌طور میزان جلوآمدگی بالادست و پائین‌دست برابر هستند. در جدول ۴-۱ اندازه هرکدام از پارامترهای سرریز به همراه نماد آن آورده شده است. در شکل ۴-۱ نیز مشخصات هندسی این سرریز نمایش داده شده است.



جدول ۱-۴ مشخصات پارامترهای هندسی سرریز مورد مطالعه

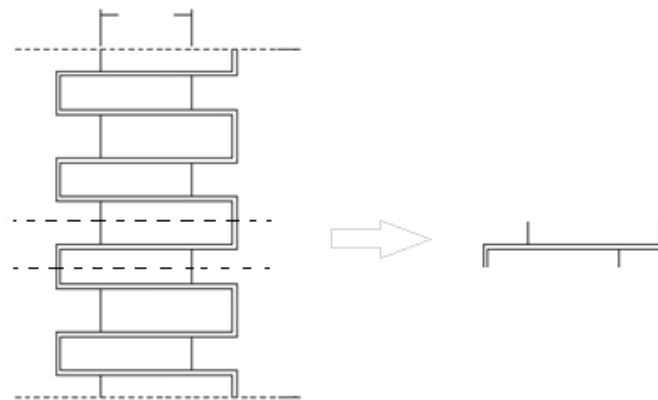
ردیف	پارامتر هندسی	نماد پارامتر هندسی	اندازه
۱	عرض سرریز	B	۱۲m
۲	ارتفاع سرریز	P	۴m
۳	ارتفاع	$P_m$	۲/۶۶۷m
۴	عرض کلید ورودی	$W_i$	۲/۴m
۵	عرض کلید خروجی	$W_o$	۲/۴m
۶	جلوآمدگی ورودی	$B_i$	۳m
۷	جلوآمدگی خروجی	$B_o$	۳m
۸	ضخامت جدارها	$T_s$	۰/۰۲m*
۹	طول تاج سرریز	$L_u$	۲۸/۸m

\* ضخامت جداره در مدل آزمایشگاهی نسبت به ابعاد کلی به صفر میل می کند و در این مدل ۰/۰۵m در نظر گرفته شد



شکل ۱-۴ مشخصات هندسی سرریز کلید پیانویی نوع A

در این مدل‌سازی با توجه به شکل متقارن و تکرارشونده تاج سرریز، فقط یک جز تکرارشونده از سرریز برای مدل‌سازی استفاده شده است با توجه به شکل هندسی سرریز که در بالا مشاهده می‌شود، برای شبیه‌سازی از یک بخش سرریز متشکل از یک‌نیمه از کلید ورودی و یک‌نیمه از کلید خروجی و دیواره مابین این دو کلید استفاده شده است. استفاده از این مدل باعث کوچک شدن فیزیک شبیه‌سازی و پائین آمدن حجم محاسبات لازم برای حل می‌باشد. این مدل در ابعاد واقعی سرریز آزمایش شده توسط آمین و لمپریر می‌باشد.



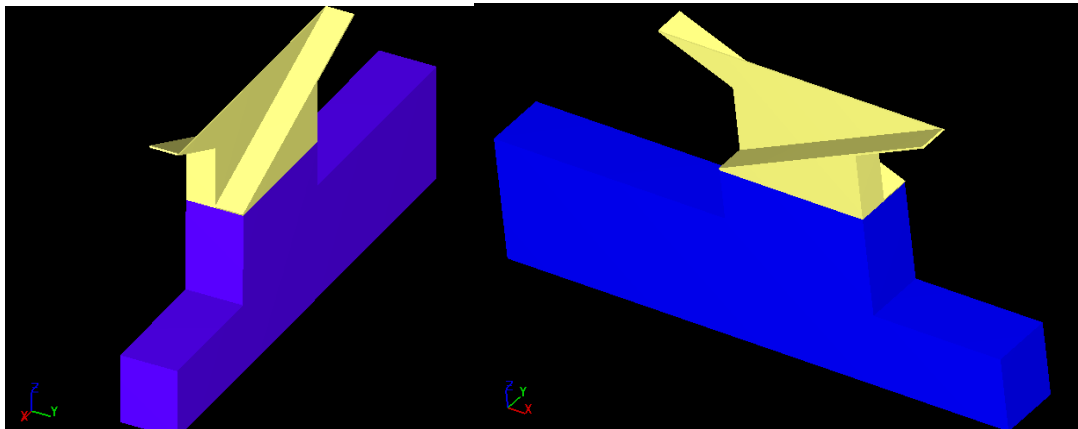
شکل ۲-۴ بخش مدل‌سازی شده با استفاده از مرز متقارن

### ۳-۴ مشخصات میدان حل

#### ۱-۳-۴ مدل‌سازی

ابتدا هندسه فیزیک سرریز با توجه به ابعاد مدل آزمایشگاهی در نرم‌افزار AutoCad ساخته شد. برای وارد کردن مدل به نرم‌افزار FLOW-3D می‌بایست فایل با فرمت stl از AutoCad استخراج و در نرم‌افزار FLOW-3D وارد کنیم. برای مشخص کردن بخش جامد در کف بالادست و پائین دست سرریز، با استفاده از امکانات نرم‌افزار چند

حجم مکعب مستطیلی در زیر سرریز و در قسمت‌های جلو و عقب آن قرار می‌دهیم. در شکل زیر مدل ساخته‌شده در نرم‌افزار را مشاهده می‌کنید.



شکل ۳-۴ مدل ساخته‌شده در نرم‌افزار به همراه قسمت جامد در کف بالادست و پائین‌دست

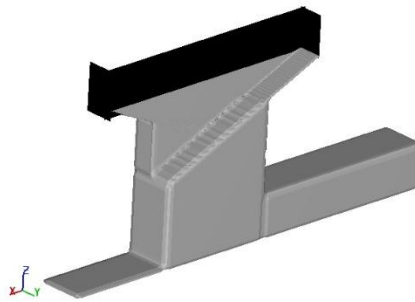
#### ۲-۳-۴ تنظیمات نرم‌افزار و فیزیک مدل‌سازی

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

سپس در قسمت فیزیک نرم‌افزار شتاب ثقل را با توجه به واحد در جهت منفی  $Z$  به مقدار  $9/81$ - تعریف می‌کنیم. جریان را به صورت VISCIOUS در نظر می‌گیریم. همچنین فشار هیدروستاتیک را در جهت محور  $Z$  تعریف می‌کنیم.

#### ۴-۳-۱ تنظیمات اندازه‌گیری دبی خروجی

برای اندازه‌گیری میزان دبی خروجی از روی تاج سرریز از قسمت Baffles استفاده می‌کنیم. Baffle یک صفحه مجازی است که در طول مدت شبیه‌سازی اطلاعات مربوط به دبی از صفحه و نیروهای وارد بر آن را ثبت می‌نماید. محل قرارگیری این صفحه باید بر روی تاج سرریز باشد. با توجه به شکل مدل از سه صفحه Baffle برای اندازه‌گیری دبی استفاده شده است. این سه صفحه بر روی کلید ورودی، جداره‌ی بین دو کلید و کلید خروجی قرار می‌گیرد. میزان دبی عبوری از این سه صفحه به‌صورت مجزا ارائه می‌گردد که با جمع آن‌ها میزان دبی عبوری از سرریز به دست می‌آید. این مستقل بودن میزان دبی در سه بخش مختلف سرریز امکان مطالعه دقیق تر در عملکرد هر کدام از سه بخش را در حالت‌های مختلف می‌دهد. در نمایش حالت FAVOR محل قرارگیری Baffle ها نیز نمایش داده می‌شود. در شکل زیر این صفحات baffle مشاهده می‌شود.



شکل ۴-۴ محل قرارگیری baffle در روی تاج سرریز در حالت FAVOR

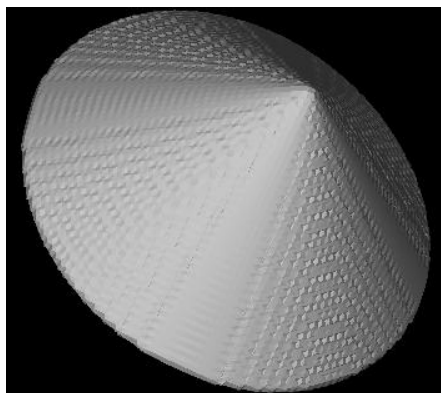
#### ۴-۳-۳ شبکه‌بندی

نرم‌افزار FLOW-3D، فقط قابلیت مش زنی با شبکه‌های حل به‌صورت منظم و مکعبی را دارد شاید این موضوع یک نقطه ضعف برای نرم‌افزار به نظر آید ولی در این حالت با توجه به تولید آسان این نوع شبکه و نیاز به حافظه کمتر سرعت تولید شبکه حل را افزایش می‌دهد. همچنین استفاده از دو ابزار مفید FAVOR و VOF استفاده از این نوع شبکه را دارای مزیت می‌کند. [24]

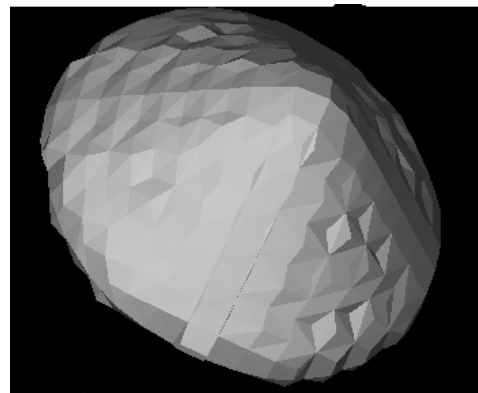
با استفاده از روش FAVOR ما می‌توانیم احجام جامد مدل‌سازی شده در نرم‌افزار را نمایش بدهیم که با این کار می‌توانیم قابلیت و تاثیر گذاری مش مناسب برای مدل را ارزیابی و به یک مش زنی قابل قبول دست بیابیم.

مش زنی یکی از مهم‌ترین قسمت‌های یک مدل‌سازی می‌باشد از یک طرف ابعاد بزرگ برای سلول‌های مش ممکن است بخش جامد و سیال را به خوبی نمایش ندهند که این امر مدل‌سازی را ناقص و نتایج را نامناسب می‌کند. در بخش‌های با شکل هندسی پیچیده و نقاطی که میزان گرادیان‌ها زیاد است ابعاد مش باید به اندازه کافی کوچک باشد. از سوی دیگر 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 یک‌میزان بهینه که هم مدل‌سازی را به درستی پشتیبانی کند و هم بیش‌ازحد لازم حجم پردازش را افزایش ندهد باید برای هر مدل انتخاب شود.

در شکل زیر تاثیر گذاری تعداد مش برای شبکه حل در یک مدل را مشاهده می‌کنید.



(ب)



(الف)

شکل ۴-۵ تاثیر مش زنی بر هندسه احجام : (الف) یک‌شکل مخروطی با ۱۰۰۰۰ مش (ب) همان شکل با ۱۰۰۰۰۰۰ مش

برای مش زنی مدل می‌توان از دو روش استفاده کرد. هم می‌توانیم تعداد سلول را مشخص کنیم و هم ابعاد سلول را به نرم‌افزار بدهیم. در این مدل‌سازی ما ابعاد سلول را مشخص کردیم.

با توجه به این که در این تحقیق، مدل‌سازی در هدهای مختلفی انجام شده و با بالا رفتن ارتفاع آب ابعاد شبکه حل کمی زیاد می‌شود ابعاد سلول بین ۱۰ تا ۱۲ سانتی‌متر در نظر گرفته می‌شده است.

در نقاطی که شکل جامد ما داری سطوح با ضخامت کمتر بوده است مثل دیواره مابین کلیدها و یا بخش جلوآمدگی‌ها در دو طرف با استفاده از قابلیت نرم‌افزار و ایجاد صفحاتی مجازی به اسم Mesh Plane ابعاد سلول را تا رسیدن به حالت مناسب تنظیم می‌نماییم.

برای هر Mesh Plane می‌تواند ابعاد یا اندازه مش را تعریف کرد. اگر ابعاد خاصی به Mesh Plane بدهیم این ابعاد را به‌عنوان اندازه سلول‌های مجاور صفحه در نظر می‌گیرد و اندازه بقیه سلول‌ها تا Mesh Plane بعدی به تدریج به‌اندازه ابعادی که به‌طور کلی مدل معرفی شده است، برسد. اگر به یک Mesh Plane تعداد سلول را بدهیم این تعداد را میزان سلول‌های موجود بین این صفحه تا صفحه مجاور بعدی در نظر می‌گیرد. صفحات انتهایی شبکه حل که در مرزها قرار دارند نیز Mesh Plane محسوب می‌شوند.

#### ۴-۳-۱ نسبت اندازه و نسبت شکل

برای استفاده از Mesh Plane 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.

## - نسبت اندازه

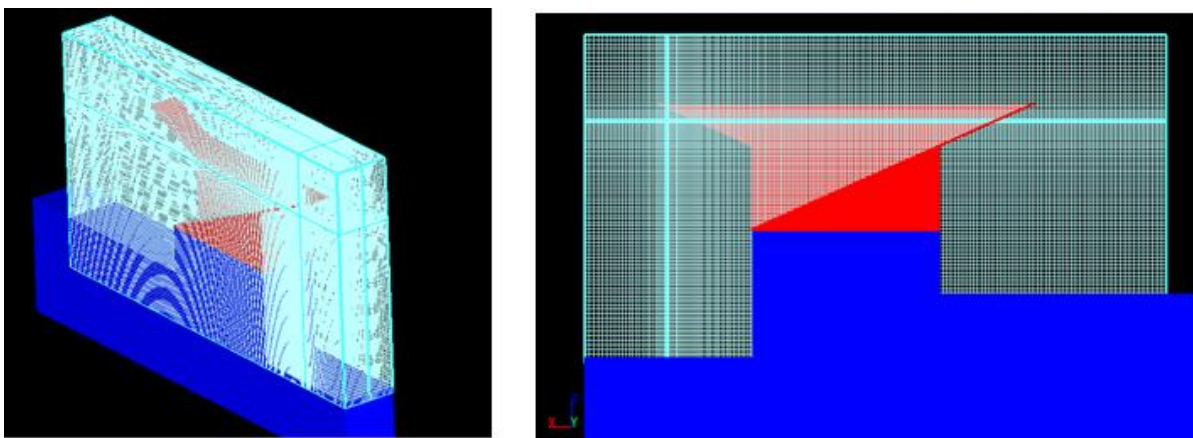
نسبت اندازه به نسبت ابعاد دو سلول مجاور هم در یک امتداد خاص گفته می‌شود. این نسبت در سه جهت  $x$ ،  $y$  و  $z$  مورد بررسی قرار می‌گیرد. برای استخراج نتایج درست و دقیق همین‌طور کاهش حجم پردازش می‌بایست حداکثر میزان مجاز برای این نسبت  $1/25$  می‌باشد. به‌طور کلی در حالت ایده آل این نسبت باید برابر ۱ و یا تا حد ممکن نزدیک به ۱ باشد.

## - نسبت شکل

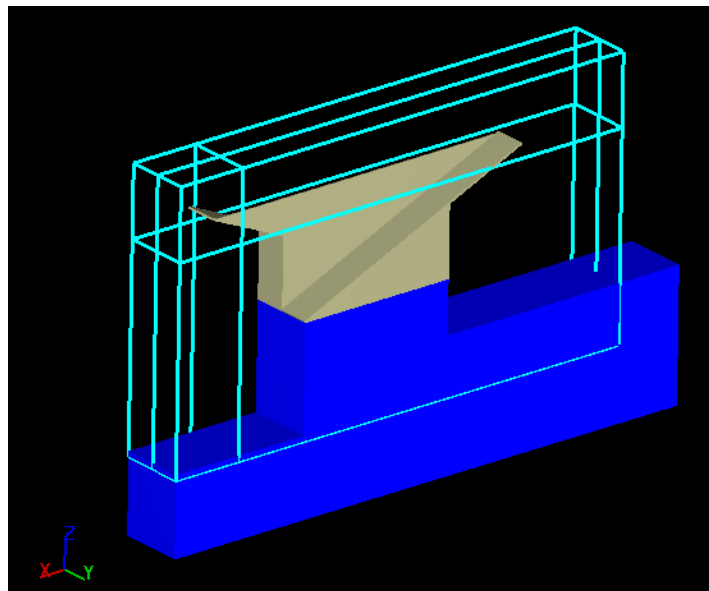
نسبت شکل به نسبت بزرگ‌ترین بعد یک سلول به کوچک‌ترین بعد همان سلول گفته می‌شود. نسبت شکل در سه صفحه  $x$ - $y$ ،  $x$ - $z$  و  $y$ - $z$  مورد بررسی قرار می‌گیرد. میزان این نسبت هم می‌بایست کمتر از ۳ باشد همین‌طور مشابه بالا این نسبت هم هر چه به عدد ۱ نزدیک باشد مناسب‌تر است.

در این مدل‌سازی، این نسبت‌ها حتی‌المقدور به حالت بهینه نزدیک می‌باشد.

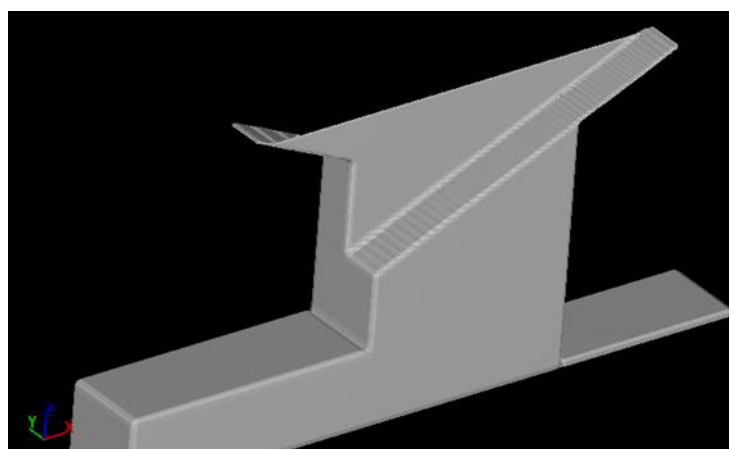
در شکل‌های زیر شبکه حل و Mesh Plane ها و نمایش مدل با روش FAVOR را مشاهده می‌کنید.



شکل ۴-۶ شبکه حل برای مدل



شکل ۷-۴ Mesh Plane های مدل سازی

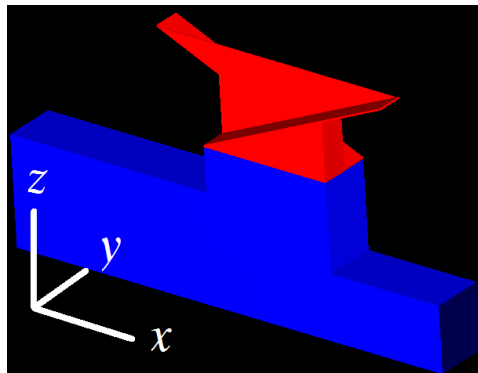


شکل ۸-۴ مدل نمایش مدل با FAVOR



#### ۴-۳-۴ شرایط مرزی میدان

پس از شبکه‌بندی میدان و نمایش کامل تمام بخش‌های فیزیک مدل توسط نرم‌افزار شرایط مرزی را برای بلوک مش بندی تعریف می‌کنیم. برای بلوک مش بندی شده شش وجه وجود دارد که شش شرط مرز به آن‌ها داده می‌شود. این شرایط به صورت شرط‌های ماکزیمم و مینیمم در جهات  $x$ ،  $y$  و  $z$  معرفی می‌شوند. در شکل زیر محورهای مختصات استفاده شده در مدل‌سازی نمایش داده شده است. با توجه به شکل زیر شرط مرزی مینیمم در جهت  $x$  مربوط به ورودی جریان و شرط ماکزیمم در جهت  $x$  برای خروجی جریان می‌باشد. شروط مینیمم و ماکزیمم در جهت  $y$  برای دو سمت جانبی مدل و شرط ماکزیمم و مینیمم در جهت  $z$  به ترتیب مربوط به کف و سقف مدل می‌باشند.



شکل ۴-۹- محورها مختصات مدل‌سازی

#### - شرط مینیمم $x$ :

این شرط مربوط به ورودی جریان می‌باشد. در این مرز از شرط مرزی فشار ثابت (specified pressure) استفاده می‌شود. فشار در میدان حل به صورت رقم سطح سیال به نرم‌افزار داده می‌شود. با توجه به این که داده‌های آزمایشگاهی بر اساس میزان دبی تخلیه در هدهای مختلف است ارتفاع آب در این مرز به میزان ارتفاع آب موردنظر ثابت می‌شود.

### - شرط ماکزیمم $x$ :

این شرط 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.

### - شرط مرزی در جهت $y$ :

در جهت  $y$  دو سمت جانبی مدل می باشند که از شرط مرز متقارن (symmetry) استفاده کرده ایم. در این حالت شرایط قسمت خارج از شبکه حل را دقیقاً مشابه شرط روی مرز در نظر گرفته می شود. استفاده از این شرط کمک شایانی به ساده سازی مدل سازی دارد. با این روش می توان حجم شبکه حل را تا حداقل کاهش داد.

### - 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 می کنیم این شرط مشابه یک دیوار عمل می کند و انتخاب مناسبی برای کف مخزن می باشد.

### - شرط مرزی ماکزیمم $z$ :

شرط مرزی انتخاب شده برای این صفحه که قسمت بالایی شبکه حل می باشد نیز مشابه ورودی از مرز فشار ثابت استفاده می شود در این حالت باید میزان Fluid Fraction را برابر صفر در نظر بگیریم. برای این مرز می شود از مرز متقارن نیز استفاده کرد به شرطی که سیالی به این مرز نرسد. در این صورت شرایط بالای شبکه حل به صورت حالت اتمسفر در نظر گرفته می شود.

#### ۴-۳-۵ زمان شبیه‌سازی

در نرم‌افزار حالت‌های متفاوتی برای پایان محاسبه وجود دارد که بسته به نوع مدل‌سازی می‌توان از آن‌ها استفاده کرد. همین‌طور می‌توان زمان مدل‌سازی را به‌صورت مستقیم به نرم‌افزار داد این زمان باید به‌میزانی باشد که جریان به حالت پایدار رسیده باشد. در این حالت میزان دبی تخلیه باید به یک مقدار ثابت رسیده باشد. با توجه به تحقیقات قبلی انجام‌شده مدت‌زمان ۳۰ ثانیه برای مدل‌سازی در نظر گرفته شد. مشاهده نتایج نشان می‌دهد پس از حدود ۱۲ ثانیه از محاسبه نتایج به حالت پایدار می‌رسد.

پس از پایان مدل‌سازی اولیه با توجه افزایش حالت‌های مدل‌سازی در قسمت حساسیت سنجی زمان انجام مدل‌سازی راکمی پایین‌تر و در حدود ۱۲ تا ۲۰ کاهش دادیم.

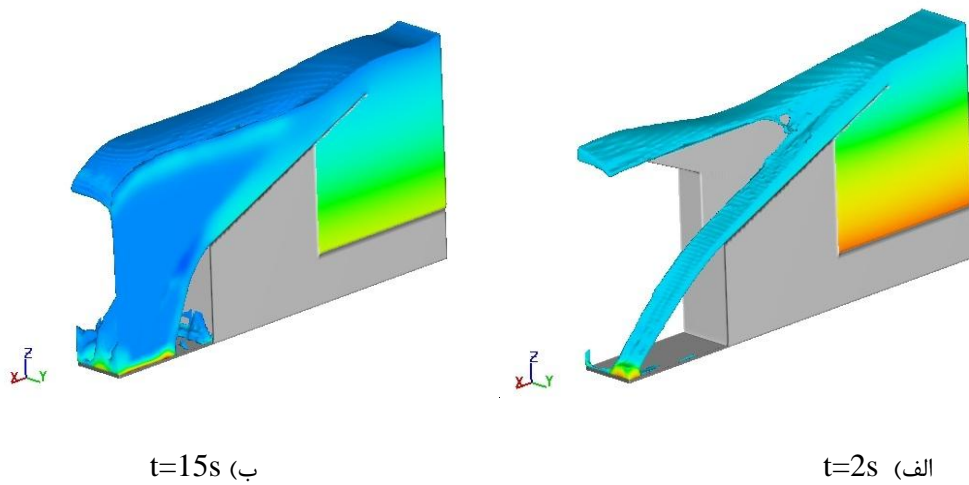
#### ۴-۳-۶ مدل آشفتگی

با توجه به این‌که نتایج مدل‌سازی بر اساس میزان دبی است شاید به نظر برسد که آشفته بودن مدل جریان تأثیر زیادی بر نتایج ندارد. در تحقیقات قبلی مدل‌سازی در حالت جریان آرام انجام‌گرفته است. اگرچه شاید استفاده از مدل آشفته نتایج دبی را تغییری ندهد ولی ممکن است در نمایش عملکرد هیدرولیکی جریان در سرریز تأثیر داشته باشد. در این مدل‌سازی جریان به‌صورت پایه با مدل آشفتگی RNG شبیه‌سازی شده است و سپس در مدل‌های آشفتگی مختلف بررسی شده است.

پس از تأیید نتایج مدل‌سازی در فصل بعد نتایج مدل‌سازی برای حالت‌های مدل‌های آشفتگی یک معادله‌ای، مدل دو معادله‌ای K-ε و مدل دو معادله‌ای RNG و حالت جریان آرام نیز مورد بررسی و نتایج آن‌ها مقایسه خواهد شد.

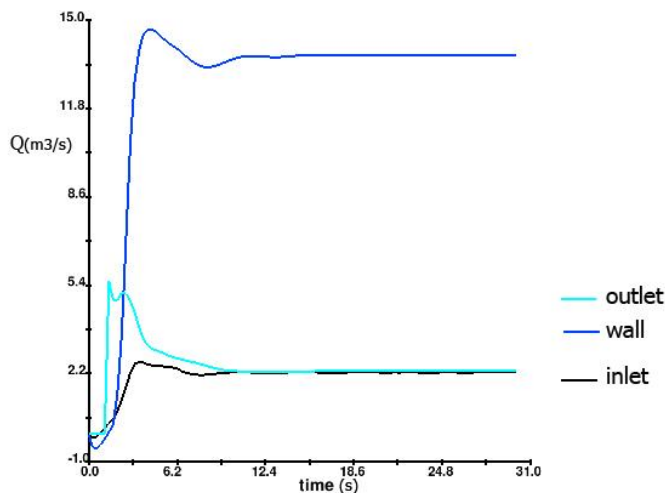
#### ۴-۴ بررسی نتایج و صحت سنجی

مدل‌سازی برای مدت ۳۰ ثانیه در نرم‌افزار انجام گرفت و نتایج بر اساس میزان دبی عبوری از روی تاج سرریز به وسیله صفحات مجازی Baffle در مدت‌زمان‌های مختلف ثبت گردیده می‌شود. در شکل زیر مقادیر دبی عبوری از صفحات Baffle برحسب زمان نمایش داده شده است.



شکل ۴-۱۰ نمایش گرافیکی سه‌بعدی جریان روی سرریز در ثانیه‌های دوم پانزدهم اجرا شبیه‌سازی

در شکل ۴-۱۱ نمودار تغییرات دبی نسبت به زمانی که توسط نرم‌افزار ترسیم شده است نمایش داده شده است همان‌طور که در شکل نشان داده شده است نتایج شبیه‌سازی پس از ۱۲ ثانیه همگرا شده است ولی به جهت افزایش اطمینان تا ۳۰ ثانیه این زمان شبیه‌سازی را ادامه دادیم. با توجه به صرفه جویی در وقت و اجراهای مکرر نرم‌افزار، در شبیه‌سازی‌های بعدی با توجه به همگرا شدن مدل در این مدت‌زمان شبیه‌سازی را کاهش می‌دهیم. نتایج در سه Baffle قرار گرفته در سه بخش ورودی، خروجی و جدار میانی دو کلید ثبت شده و توسط سه نمودار مشخص شده‌اند. دبی عبوری از روی تاج سرریز برابر با مجموع این سه مقدار خواهد بود.



شکل ۴-۱۱ نتایج نرم افزار برای دبی عبوری مربوط به هد ۱ متر

برای صحت سنجی نتایج به دست آمده از مدل عددی با نتایج آزمایشگاهی در جدول ۴-۲ مورد مقایسه قرار گرفته است. نتایج بر اساس دبی واحد عرض می باشد و با تقسیم دبی تخلیه بر عرض مدل، میزان دبی واحد عرض به دست می آید. با توجه نتایج جدول ۴-۲ می بینیم که میزان خطای بین نتایج مدل عددی با نتایج آزمایشگاهی بین ۰/۳۸ تا ۶ درصد می باشد که این میزان نشان دهنده تطابق مناسب نتایج و مؤید صحت مدل سازی عددی می باشد.

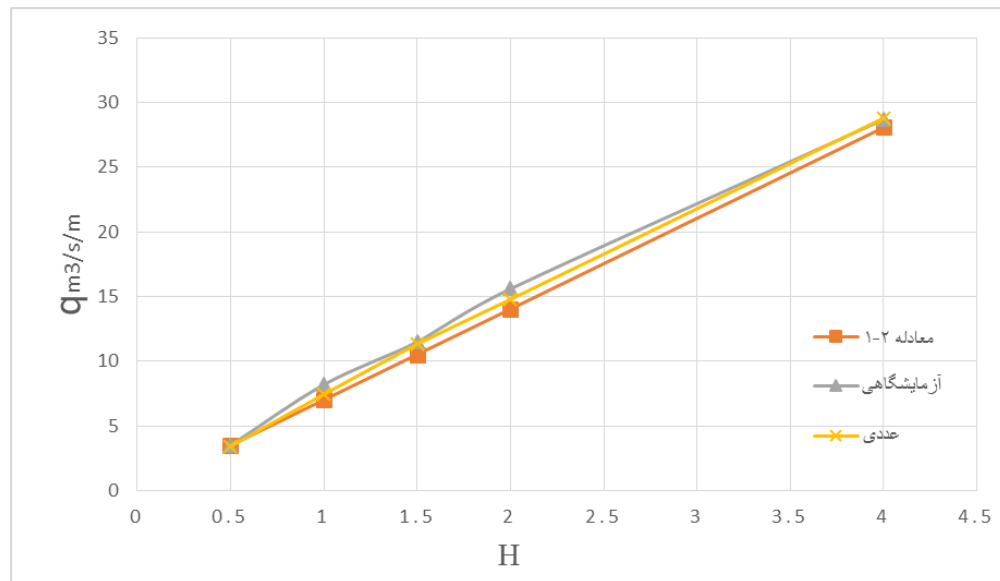
میزان خطای مدل سازی را با روش زیر محاسبه می کنیم:

$$\text{خطا} = (Q_{\text{num}} - Q_{\text{exp}}) / Q_{\text{exp}} \quad (۴-۱)$$

که در آن  $Q_{\text{num}}$  نشان دهنده دبی در مدل عددی،  $Q_{\text{exp}}$  نشان دهنده دبی آزمایشگاهی می باشد.

جدول ۲-۴ مقایسه نتایج مدل عددی و نتایج آزمایشگاهی

هد بالادست m	H/P	مدل آزمایشگاهی q m <sup>3</sup> /s/m	مدل عددی q m <sup>3</sup> /s/m	خطا %
۰/۵	۰/۱۲۵	۳/۵	۳/۴۳	-۲
۱	۰/۲۵	۸/۲	۷/۶۵	-۶/۱۵
۱/۵	۰/۳۷۵	۱۱/۵	۱۱/۳۲	-۱/۵۷
۲	۰/۵	۱۵/۶	۱۴/۸	-۵/۱۳
۴	۱	۲۸/۷	۲۸/۸۱	۰/۳۸



شکل ۱۲-۴ نمودار تغییرات دبی نسبت به ارتفاع هد

همان‌طور که در فصل ۲ اشاره شد لمپریر در سال ۲۰۰۹ رابطه (۱-۲) را برای میزان دبی بر روی سرریز ارائه کرده بود. نتایج مدل عددی و نتایج آزمایشگاهی و همچنین دبی‌های به‌دست آمده در رابطه فوق‌الذکر در نمودار شکل ۴-۱۲ نشان داده شده‌اند همان‌طور که مشاهده می‌شود نتایج مدل عددی و همین‌طور رابطه (۱-۲) و نتایج آزمایشگاهی انطباق مناسبی باهم دارند.

#### ۴-۵ جمع‌بندی و خلاصه فصل

در این فصل ابتدا مشخصات مدل آزمایشگاهی مطالعه شده توسط آمین و لمپریر در سال ۲۰۰۳ را ارائه نمودیم. پس از معرفی مشخصات مدل، به تنظیمات نرم‌افزار و شرایط لازم برای مدل‌سازی اشاره شد. برای افزایش سرعت حل و کاهش حجم محاسبات لازم برای مدل‌سازی و همین‌طور با توجه به هندسه متقارن سرریز کلید پیانویی از کوچک‌ترین قسمت تکرارشونده سرریز یعنی نیمی از دهانه ورودی و نیمه دهانه خروجی و جدار میانی آن‌ها برای مدل‌سازی استفاده شده است.

یک بلوک شبکه‌بندی با سلول‌هایی به ابعاد ۱۰ تا ۱۲ سانتی‌متر برای شبکه حل در نظر گرفته شد. میزان سلول‌های شبکه حل با توجه به شبکه‌بندی‌های مربوط به هدهای مختلف حدود ۵۰۰۰۰۰ سلول می‌باشد. شبیه‌سازی به مدت ۳۰ ثانیه برای مدل انجام گرفت و نتایج برحسب دبی توسط صفحات مجازی Baffle که در روی تاج سرریز به‌صورت مجزا در سه قسمت کلید ورودی و خروجی و دیواره بین آن‌ها قرار گرفته است، به دست آمد.

نتایج مدل به‌صورت کمی بر اساس میزان دبی تخلیه در هدهای مختلف استخراج شد و نتایج آن در جدول ۴-۲ با میزان دبی آزمایشگاهی مقایسه شد. همان‌طور که مشاهده می‌شود نتایج عددی دارای تطابق مناسبی با مقادیر آزمایشگاهی می‌باشد که میزان ماکزیمم خطا برابر ۶٪ و مینیمم آن کمتر از ۱٪ می‌باشد.

مدل آشفته‌گی استفاده شده برای شبیه‌سازی به‌طور پایه مدل RNG بوده و در فصل بعد تأثیرگذاری مدل‌های آشفته‌گی مختلف را بر روی نتایج ارزیابی می‌کنیم.

با توجه به تأیید شدن مدل‌سازی انجام‌گرفته در فصل آینده به حساسیت سنجی مدل‌سازی می‌پردازیم. حساسیت سنجی با بررسی ایجاد تغییر در پارامترهای هندسی سرریز و همچنین قرار دادن دیواره بر روی تاج سرریز انجام می‌گیرد.



## فصل ۵

### حساسیت سنجی

## ۵-۱ مقدمه

در فصل قبل نتایج دبی روی سرریز به دست آمده در مدل سازی عددی با مقادیر دبی مدل سازی آزمایشگاهی صحت سنجی شد و دیدیم که این مدل سازی تطابق مناسبی با مدل آزمایشگاهی دارد. در این فصل از مدل سازی عددی به حساسیت سنجی و بررسی چند حالت مختلف که با ایجاد تغییرات و انجام اصلاحاتی بر روی هندسه سرریز انجام شده است، می پردازیم.

ابتدا تاثیر گذاری چند مدل آشفتگی مختلف بر روی مدل سازی را مورد مطالعه قرار می دهیم. این بررسی با مقایسه نتایج حل نرم افزار و مدت زمان حل و حجم محاسبه در حالت های مختلف آشفتگی انجام می گیرد.

در فصل دوم به مدل لمپریر که در سال ۲۰۰۹ برای بهبود عملکرد سرریز کلیدپیانویی ارائه شده است اشاره شده بود. در این فصل مدل سرریز ساخته شده بر اساس الگوی لمپریر ۲۰۰۹ اصلاح شده و نتایج مدل سازی جریان بر روی آن با حالت اولیه مقایسه می شود.

بررسی دیگری که بر هندسه سرریز انجام گرفته است استفاده از دیواره بر روی تاج سرریز است که در حالت های مختلف انجام گرفته است. نتایج مدل سازی در حالت های مختلف با توجه به فرمول کلی سرریز ها به صورت ضریب دبی استخراج می شود و با هم مقایسه می گردند.

## ۵-۲ تاثیر مدل آشفتگی

نرم افزار FLOW-3D از پنج مدل آشفتگی برای مدل سازی استفاده می کند. این مدل ها به ترتیب مدل طول اختلاط پرانتل، مدل یک معادله ای، مدل دو معادله ای K- $\epsilon$ ، مدل RNG و مدل شبیه سازی گردابه های بزرگ یا

LES می‌باشند. برای بررسی تاثیر مدل های آشفتگی بر شبیه سازی نرم افزار از یک حالت شبیه سازی به صورت پایه استفاده کردیم و نتایج برای مدل های مختلف آشفتگی را با هم مقایسه می نماییم.

باید به این نکته توجه داشت که نتایج مدل سازی بر اساس میزان دبی روی سرریز می باشد و تاثیر گذاری مدل های آشفتگی بر میزان دبی بسیار محدود است لذا به نظر می رسد تفاوت مدل های آشفتگی بر میزان دبی خیلی قابل توجه نباشد در جدول زیر نتایج دبی در حالت های مختلف مقایسه شده است. در این بررسی مدل یک معادله ای، مدل های دو معادله ای K-ε و مدل RNG و حالت بدون آشفتگی مقایسه شده و از حالت LES و طول اختلاط پرانتل استفاده نشده است.

مدل لمپریر ۲۰۰۳ در هد ۱/۵ متر برای این بررسی انتخاب شده است. مدت زمان شبیه سازی برای این مدل ۱۵ ثانیه در نظر گرفته شده است. میزان دبی واحد عرض بر روی این سرریز برابر  $11/5 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$  می باشد که نتایج حالت های مختلف با این میزان مقایسه می شود.

جدول ۱-۵ میزان دبی محاسبه شده با مدل های آشفتگی متفاوت

مدل آشفتگی	میزان دبی واحد عرض $\text{m}^3/\text{s}/\text{m}$	میزان دبی واحد عرض آزمایشگاهی $\text{m}^3/\text{s}/\text{m}$	خطا %
بدون آشفتگی	۱۱/۰۴	۱۱/۵	۴
مدل یک معادله ای	۱۰/۲۸	۱۱/۵	۱۰/۶
K-ε مدل دو معادله ای	۱۱/۳۴	۱۱/۵	۱/۳
مدل RNG	۱۱/۳۲	۱۱/۵	۱/۵

میزان دبی برای مدل های آشفتگی شبیه سازی استخراج شده و در جدول ۱-۵ آورده شده است با توجه به نمودار استفاده از مدل های دو معادله ای K-ε و مدل RNG میزان خطایی برابر ۱/۳٪ تا ۱/۵٪ نسبت به حالت

آزمایشگاهی دارد. می توان گفت استفاده از مدل های دومعادله نتایج دقیق تری را حاصل کرده است. باید توجه داشت تاثیر گذاری مدل ها آشفته گی می تواند بر قسمت های مختلف مدلسازی متفاوت باشد و بررسی آن فقط در مقادیر دبی روی تاج سرریز نمی تواند به طور کامل این تاثیرگذاری را نمایش دهد. در صورت افزایش طول شبکه حل و مدل سازی پائین دست سرریز تاثیرگذاری مدل های آشفته گی بیشتر می شود.

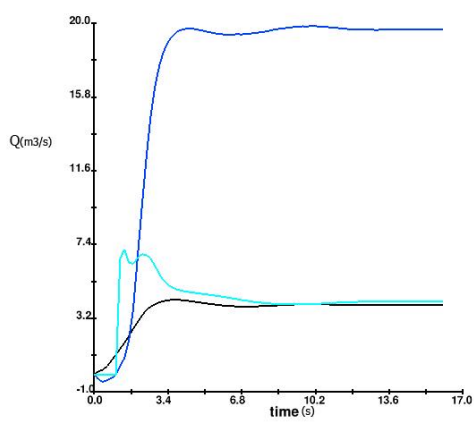
در جدول ۵-۲ میزان تاثیر گذاری مدل های آشفته گی بر مدت زمان اجرای نرم افزار و حجم پردازش مقایسه شده است. علاوه بر دقت نتایج مدل سازی میزان زمان شبیه سازی و حجم پردازش برای آن نیز می تواند بسیار تعیین کننده است. از جمله پارامتر های تعیین کننده بر حجم محاسبه و زمان اندازه گام زمانی می باشد که در ادامه به بررسی آن ها می پردازیم. باید اشاره کرد منظور از حجم پردازش، حجم فایل خروجی مربوط به هر کدام از مدل سازی ها می باشد که می تواند معیار مناسبی برای مقایسه حجم محاسبات مربوط به مدل ها باشد.

جدول ۵-۲ زمان شبیه سازی و حجم پردازش در مدل های آشفته گی مختلف

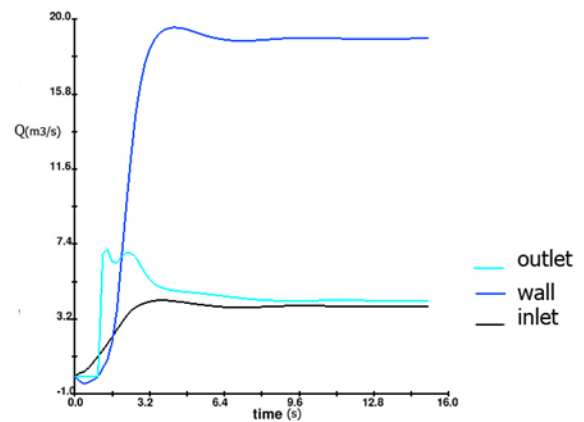
مدل آشفته گی	حجم پردازش mb	زمان شبیه سازی min
بدون آشفته گی	۱۸۷	۸۱
مدل یک معادله ای	۲۰۹	۱۹۸
مدل دو معادله ای K-E	۲۵۲	۱۱۴
مدل RNG	۲۵۲	۱۰۸

با توجه به جدول ۵-۲ میزان زمان برای شبیه سازی ۱۵ ثانیه ای مدل برای حالت بدون آشفته گی برابر ۸۱ دقیقه می باشد و حجم محاسبات پائین تر بوده است در صورتی که در معادله های دو معادله ای با توجه به افزایش حجم محاسبه زمان افزایش خیلی زیادی نداشته و می توان گفت نسبتاً زمان مناسبی برای اجرا شدن نرم افزار می باشد. در مدل یک معادله ای نیز می بینیم که زمان محاسبه افزایش بیشتری داشته که این امر به میزان گام

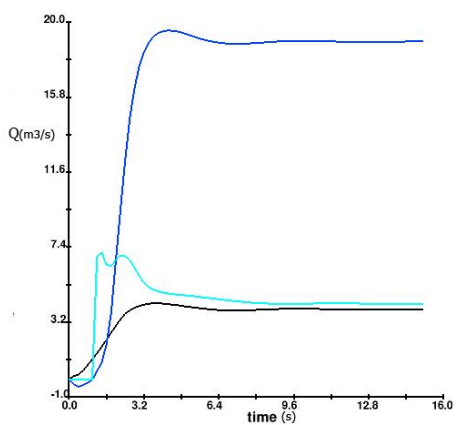
زمانی برای حل مدل نیز مرتبط است. با توجه به حالت های بالا می توان گفت مدل های دو معادله ای نتایج قابل قبول تری داشته اند. در ادامه نمودار های تغییرات دبی نسبت به زمان را برای حالت های مختلف بررسی می کنیم.



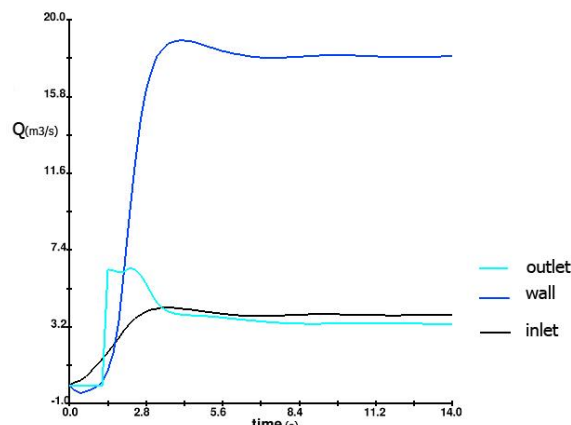
مدل دو معادله ای K-ε



مدل دو معادله ای RNG



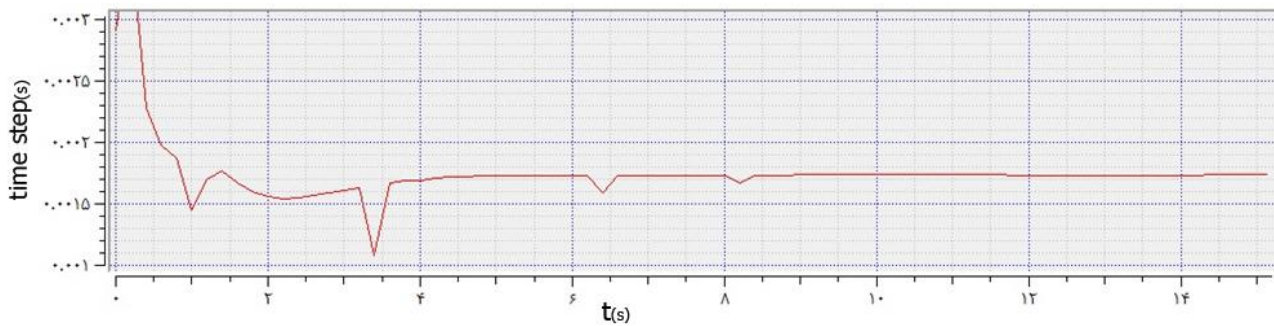
حالت بدون آشفته گی



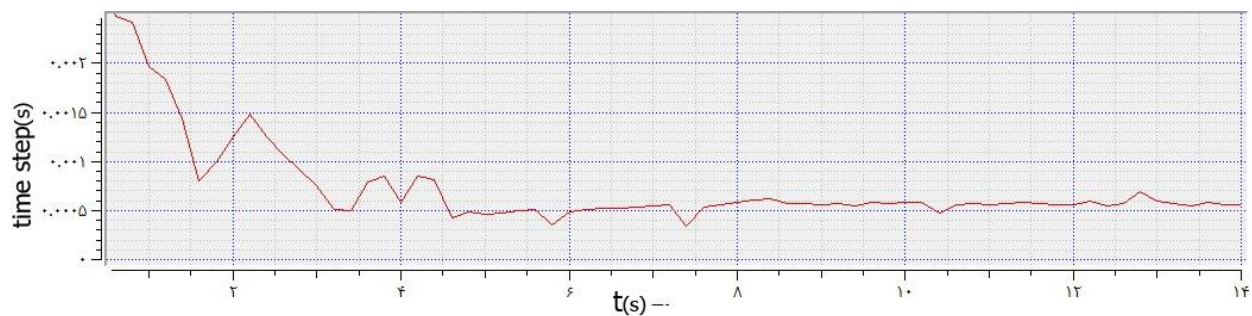
مدل یک معادله ای

شکل ۵-۱ نمودار های تغییرات دبی به زمان در مدل های مختلف آشفته گی

در شکل ۵-۱ می بینیم که در تمامی حالات میزان دبی همگرایی مناسبی دارند و در محدوده مناسبی قرار گرفته اند البته به نظر می رسد استفاده از مدل آشفتگی برای داشتن نتایج همگرا و نداشتن نوسان در نمودار مناسب تر می باشد در برخی موارد دیده شده استفاده از مدل جریان بدون آشفتگی ایجاد نوسان زیادی در نتایج می نماید. تغییرات گام زمانی نسبت به زمان از جمله خروجی های نرم افزار در حال اجرای مدل سازی می باشد که می تواند برای مقایسه حالت های مختلف اطلاعات خوبی به ما بدهد در شکل های زیر تغییرات گام زمانی در خط زمانی نمایش داده ایم.



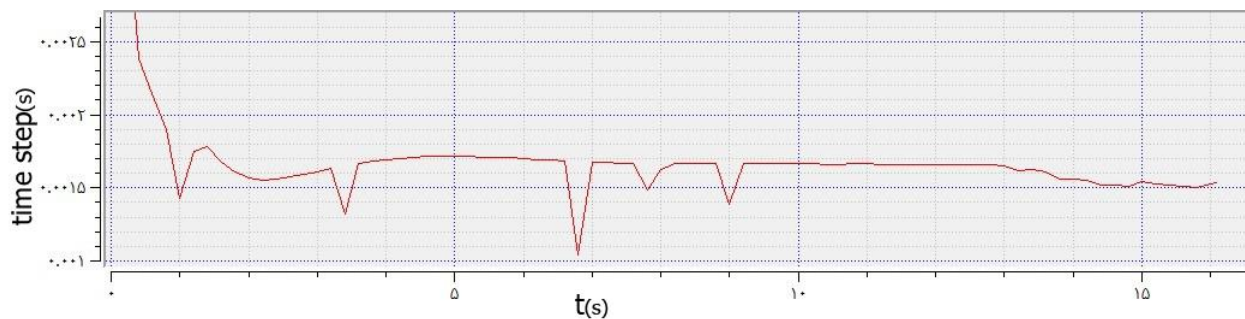
جریان در حالت بدون آشفتگی



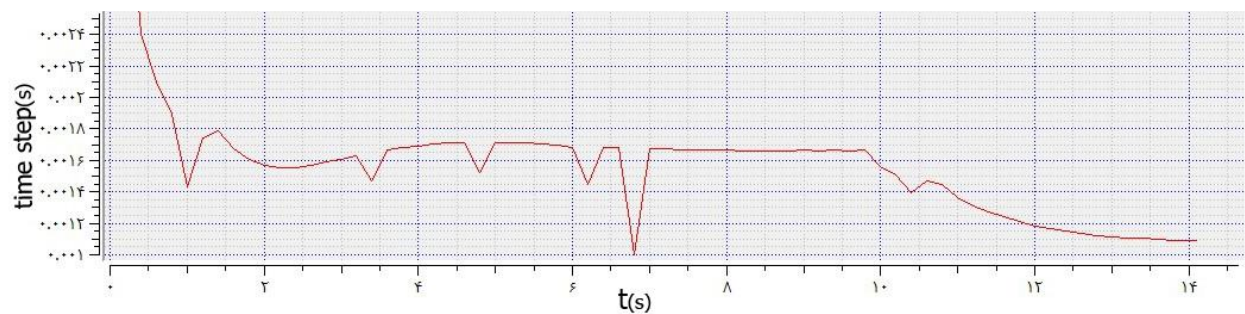
مدل یک معادله ای

شکل ۵-۲ تغییرات گام زمانی نسبت به زمان در اجرای نرم افزار در حالت های بدون آشفتگی و یک معادله ای

با توجه به نمودارهای شکل بالا می توانیم محدوده اندازه گام زمانی را برای حالت های مختلف بررسی کنیم همان طور که می بینیم در حالت آرام گام زمانی تقریباً در محدوده مشخصی در حدود  $10^{-3} * 1/7$  ثانیه قرار دارد و نوسان و تغییرات خاصی ندارد. می توان گفت استفاده از این مدل برای حل مناسب بوده است. در حالت مدل یک معادله ای این رقم به  $10^{-4} * 6$  کاهش یافته و کم شدن گام زمانی در واقع افزایش یافتن حجم محاسبه را نشان می دهد.



مدل دو معادله ای K-ε



مدل دو معادله ای RNG

شکل ۳-۵ تغییرات گام زمانی نسبت به زمان در اجرای نرم افزار در حالت های مدل K-ε و RNG

در مدل یک معادله ای هم میزان گام زمانی تغییرات زیادی ندارد و در محدوده ی نسبتاً ثابتی قرار گرفته است. در حالت مدل دو معادله ای K-ε گام زمانی در حدود  $10^{-3} * 1/5$  می باشد که میزان خوبی به نظر می رسد در این

حالت هم تغییرات زیادی در گام زمانی نمی بینیم در چند مورد تغییراتی در زمان کوتاه اتفاق می افتد و در انتها نیز گام زمانی رو به کاهش می رود ولی سیر تغییرات قابل قبول می باشد. در حالت مدل دو معادله ای RNG نیز تغییرات در حدود  $10^{-3} * 1/6$  که همانند حالت K-ε در چند مورد تغییراتی در زمان کوتاه اتفاق می افتد همین طور میزان گام زمانی پس از ثانیه ۱۰ کاهش یافته و به حدود  $10^{-3} * 1/1$  کاهش یافته است.

با توجه به بررسی نمودار های مختلف بالا به نظر می رسد استفاده از حالت های دو معادله ای نسبتا مشابه هم بوده اند. از نظر دقت نیز مدل های دو معادله ای دقیق تر بوده اند ولی حجم محاسبه مقاداری بیشتر است. در نمودار های گام زمانی نیز میزان گام زمانی در مدل های دو معادله ای و همین طور حالت بدون آشفتگی مناسب تر بوده است. و می توان با توجه به شرایط و اهداف از هر کدام استفاده نمود. لازم به ذکر است نوع و قدرت پردازنده نیز در انتخاب شرایط حل می تواند تاثیر گذار باشد.



## ۳-۵ بررسی الگوی طراحی لمپریز

همان طور که در فصول قبل اشاره شد هنوز ابعاد ناشناخته زیادی از این سرریز وجود دارد که محققان در حال تحقیق بر روی آن هستند و همچنان استاندارد دقیقی برای ساخت این سرریز وجود ندارد. لمپریز در سال ۲۰۰۹ الگویی برای طراحی این سرریز ارائه کرده است. در واقع الگوی ارائه شده توسط لمپریز برآیند تحقیقات انجام شده بر روی این سرریز تا کنون است. در شکل های زیر این نسبت ابعاد سرریز نمایش داده شده است برای مثال بر اساس غالب تحقیقات گذشته میزان عرض دهانه ورودی می بایست  $1/2$  تا  $1/25$  برابر عرض دهانه خروجی باشد تا حالت بهینه یا عملکرد بیشینه سرریز را داشته باشیم که در این الگو هم ارائه شده است. نتایج ارائه شده توسط تحقیقات انجام شده مختلف بر روی تک تک اجزای سرریز برای این الگو استفاده شده است. میزان جلوآمدگی برای دو طرف ورودی و خروجی سرریز در این الگو برابر می باشد. همین طور شیب در دهانه های ورودی و خروجی برابر در نظر گرفته شده است.

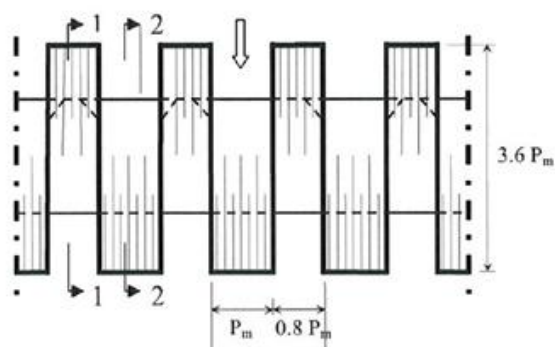
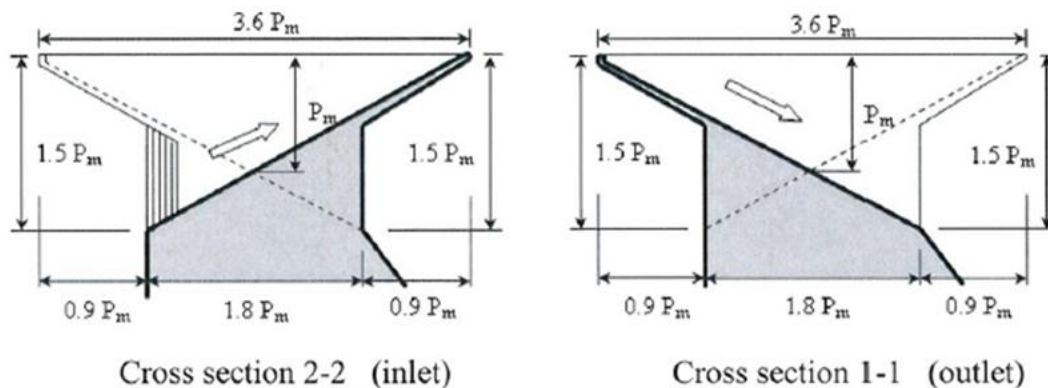
در این الگو، پارامترهای هندسی مختلف سرریز با توجه به یک پارامتر با عنوان  $P_m$  تعریف می شود. این پارامتر میزان ارتفاع از محل تقاطع دهانه های ورودی و خروجی تا بالای سرریز می باشد.<sup>۱</sup> لمپریز پیشنهاد می کند در صورت نبود محدودیت برای ارتفاع و ابعاد در ساختگاه سرریز افزایش دادن پارامتر  $P_m$  و ارتفاع سرریز نسبت به افزایش دادن تعداد دهانه ها می تواند اقتصادی و به صرفه تر باشد. با افزایش ارتفاع  $P_m$  و افزایش ارتفاع کل سرریز مقادیر پارامترهای دیگر هم مبتنی بر نسبت های ارائه شده افزایش می یابند.

همچنین لمپریز عنوان می کند این طرح را برای حالتی که هد آب روی سرریز در ارتفاعی در محدوده  $0/4P_m$  تا  $2P_m$  باشد ارائه کرده است.

در فصل دوم نیز به این توضیحات در رابطه با این الگو اشاره شده بود.

---

<sup>۱</sup> به این الگو در فصل دوم هم اشاره شده بود

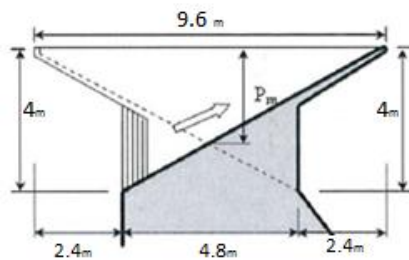


شکل ۴-۵ الگو ارائه شده توسط لمپریر در سال ۲۰۰۹

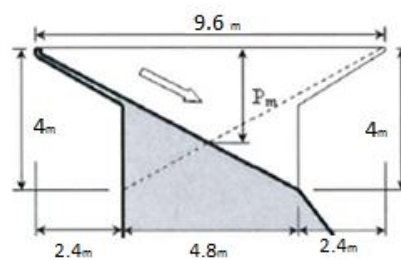
برای بررسی تأثیرگذاری این الگوی طراحی، مختصات ابعادی مدل شبیه‌سازی (لمپریر ۲۰۰۳) را با مقادیر نسبت‌های ارائه شده توسط این الگو تغییر دادیم. پارامترهای مختلف در این الگو مبتنی بر  $P_m$  بوده است و در واقع همان‌طور که در اشکال بالا مشخص است این مقدار برابر ارتفاع محل تقاطع کلیدهای ورودی و خروجی تا سطح بالای سرریز است. ارتفاع سرریز در مدل شبیه‌سازی برابر ۴ می‌باشد که با توجه به آن مقدار پارامتر  $P_m$  برابر ۲/۶۶۷ می‌گردد. با توجه به این مقدار پارامترهای مختلف سرریز را برای الگوی لمپریر محاسبه می‌نماییم. در جدول زیر ابعاد جدید مبتنی بر نسبت‌های ارائه شده نمایش داده شده است.

جدول ۳-۵ مقادیر تغییر یافته ابعاد براساس الگوی لمپریز

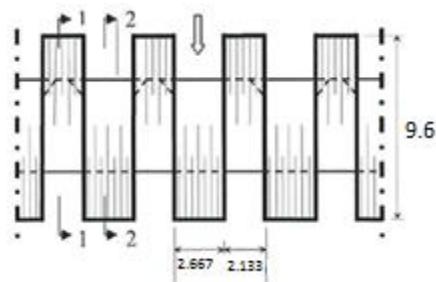
اندازه تغییر یافته	اندازه اولیه	نماد	پارامتر هندسی	ردیف
۹/۶m	۱۲m	B	عرض سرریز	۱
۴m	۴m	P	ارتفاع سرریز	۲
۲/۶۶۷m	۲/۶۶۷m	P <sub>m</sub>	ارتفاع	۳
۲/۶۶۷m	۲/۴m	W <sub>i</sub>	عرض کلید ورودی	۴
۲/۱۳۳m	۲/۴m	W <sub>o</sub>	عرض کلید خروجی	۵
۲/۴m	۳m	B <sub>i</sub>	جلو آمدگی ورودی	۶
۲/۴m	۳m	B <sub>o</sub>	جلو آمدگی خروجی	۷
۱۲m	۱۴/۴m	L <sub>u</sub>	طول تاج سرریز	۹



Cross section 2-2 (inlet)

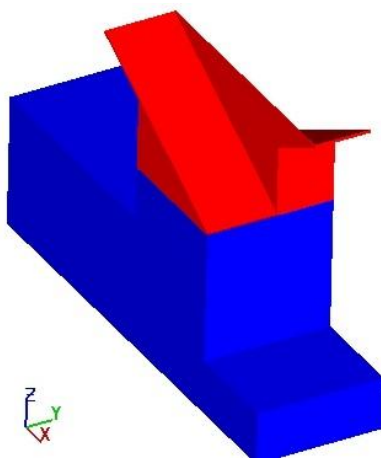


Cross section 1-1 (outlet)

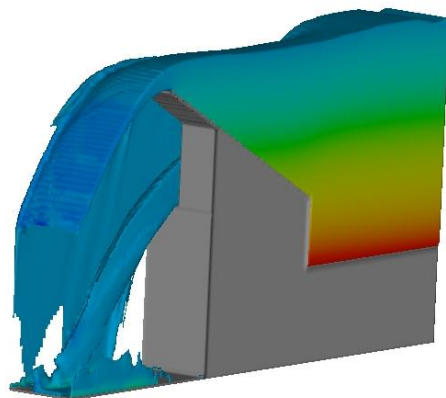


شکل ۵-۵ ابعاد تغییر یافته مدل شبیه سازی

مدل جدید با ابعاد اصلاح شده در نرم افزار Auto cad ساخته شده و به نرم افزار وارد می شود. مشابه حالت پایه تنظیمات برای نرم افزار انجام گرفته و شبیه سازی صورت گرفته است. نتایج مدل سازی برای حالت جدید براساس دبی تخلیه استخراج گردید.



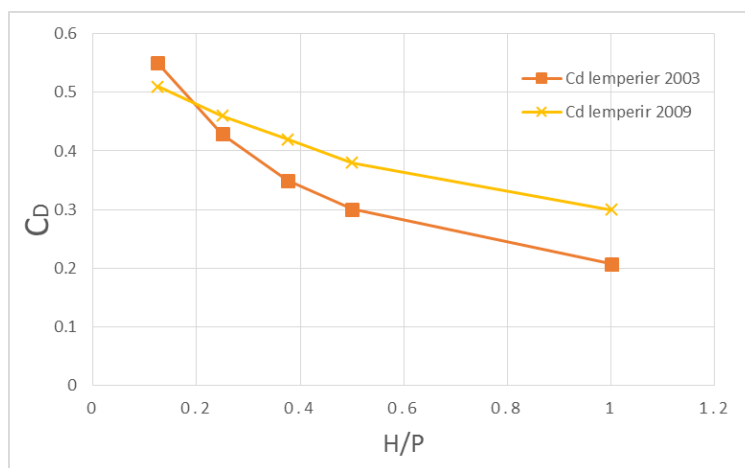
شکل ۵-۶ مدل سرریز کلید پیانویی بر اساس الگوی لمپریر ۲۰۰۹



شکل ۵-۷ جریان بر روی سرریز کلید پیانویی با الگوی لمپریر ۲۰۰۹

همان طور که در نمودار شکل ۵-۸ مشاهده می شود، به طور کلی با افزایش میزان  $H/P$  میزان ضریب دبی یک سیر نزولی را دارد. همان طور که در بالا گفته شد این طرح برای محدوده ای بین  $0.4P_m$  تا  $2P_m$  ارائه شده است

با توجه به میزان  $P_m$  در مدل اولیه می توان گفت که این محدوده برای این مدل تقریباً برابر ۱ متر تا ۵ متر می باشد. در شکل ۵-۸ تغییرات ضریب دبی نسبت به هد برای دو حالت لمپریر ۲۰۰۳ و لمپریر ۲۰۰۹ نشان داده شده است. همان طور که مشاهده می شود پیش از اینکه مقدار  $H/P$  به ۰/۴ برسد که در واقع در حدود ارتفاع هد ۱ متر است و در مقدار  $H/P$  برابر ۰/۲، به تدریج میزان  $C_d$  طرح لمپریر ۲۰۰۹ نسبت به حالت اولیه افزایش پیدا می کند. این افزایش میزان ضریب دبی در هد های بالاتر تا حدود ۳۰ تا ۴۰٪ نیز می رسد و براین اساس می توان گفت طرح اصلاح شده مدل با الگوی لمپریر کارایی سرریز را افزایش داده و می تواند الگوی مناسبی برای طراحی باشد.

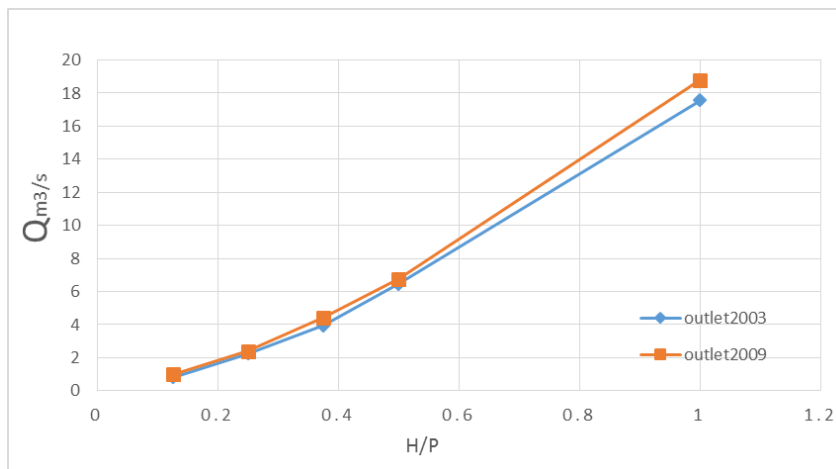


شکل ۵-۸ نمودار تغییرات  $C_d$  نسبت به  $H/P$

با استفاده از صفحات مجزای ثبت دبی، نمودار تغییرات دبی در قسمت های مختلف سرریز قابل بررسی می باشد با بررسی تغییرات دبی در سه بخش خروجی، ورودی و جدار ما بین دهانه ها می توان اثر گذاری طرح جدید را به صورت دقیق تر مورد مطالعه قرار داد.

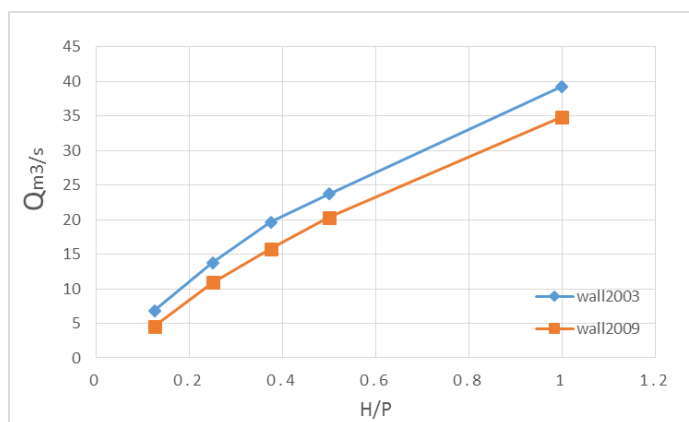
در شکل ۵-۹ تغییرات دبی بر روی دهانه خروجی سرریز را نشان می دهد همان طور که مشاهده می شود میزان تغییرات دبی تفاوت چندانی ندارد. نکته قابل ملاحظه این است که در مدل لمپریر ۲۰۰۹ عرض دهانه خروجی

نسبت به مدل لمپریر ۲۰۰۳ کوچکتر شده است به میزان ۰/۸ عرض دهانه ورودی در مدل لمپریر ۲۰۰۳ رسیده است با این وجود میزان دبی گذرنده از این بخش سرریز در حالت جدید از حالت قبلی مقداری بیشتر است.



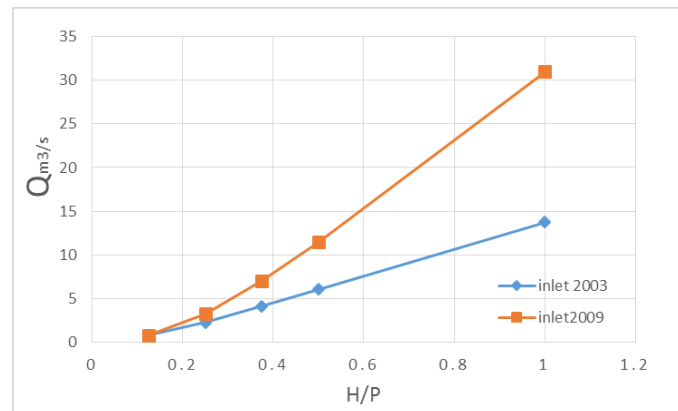
شکل ۵-۹ تغییرات دبی در قسمت دهانه خروجی

شکل ۵-۱۰ میزان تغییرات دبی در قسمت دیواره جدار دو دهانه را نمایش می دهد. در این بخش از سرریز دبی عبور کرده از دیواره برای مدل اولیه یعنی مدل لمپریر ۲۰۰۳ نسبت به حالت جدید یعنی لمپریر ۲۰۰۹ میزان بیشتری می باشد. باید توجه داشت که طول سرریز درالگوی جدید لمپریر برابر  $P_m \frac{3}{6}$  بوده و این مقدار برابر  $9/6$  متر می گردد در حالی که در حالت اولیه طول سرریز ۱۲ متر بوده است. با توجه به این که طول سرریز کاهش پیدا کرده است این میزان کاهش دبی عبوری در قسمت دیواره میانی منطقی می باشد.



شکل ۵-۱۰ تغییرات دبی در قسمت جدار میانی دهانه ها

میزان دبی گذر کننده از پائین دست قسمت ورودی سرریز نیز در شکل ۵-۱۱ نشان داده شده است. میزان افزایش دبی در این بخش از سرریز بسیار بالا بوده و تا حدود ۱۰۰٪ افزایش دبی را نیز مشاهده می کنیم. از جمله عوامل موثر در این بالا رفتن دبی را می توان افزایش عرض دهانه ورودی در این مدل نام برد.



شکل ۵-۱۱ تغییرات دبی در قسمت دهانه ورودی

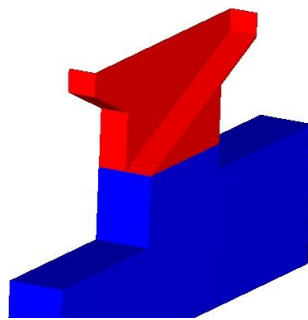
در رابطه با نمودار های بالا که به صورت مجزا مقادیر دبی را نمایش می دهند باید به این نکته توجه نمود که این نتایج براساس میزان دبی گذرکننده از سرریز می باشد و این مقادیر به پارامتر های مختلفی از جمله ابعاد هندسی وابسته است .

## ۴-۵ تأثیرگذاری دیواره‌ها

تا کنون مطالعاتی درباره استفاده از دیواره بر روی سرریز کلید پیانویی انجام گرفته است. استفاده از دیواره در حالت های متفاوت هندسی قابل بررسی است. با استفاده از دیواره ضمن افزایش ارتفاع سرریز می توان شیب دهانه های سرریز را ثابت نگه می دارد. در این بخش اثر قرار دادن دیواره را در حالت های مختلف بررسی می کنیم. از آن جمله به بررسی اثر دیواره بر مدل لمپریر ۲۰۰۳، الگوی جدید طراحی لمپریر ۲۰۰۹، مدل لمپریر ۲۰۰۹ با تغییر در عرض دهانه های ورودی و خروجی و همین طور استفاده از یک ایده جدید با عنوان دیواره مایل می توان اشاره کرد.

### ۴-۵-۱ بررسی اثر دیواره بر مدل لمپریر ۲۰۰۳:

در ادامه استفاده از یک دیواره بر روی تاج سرریز برای افزایش دادن کارایی و قدرت گذردهی سرریز بررسی شد. براساس تحقیقات قبلی ارتفاع های متفاوتی برای دیواره روی تاج سرریز در نظر گرفته شده که با توجه به تحقیقات قبلی و برای این حالت از یک دیواره به ارتفاع ۱ متر بر روی تاج سرریز استفاده نمودیم.

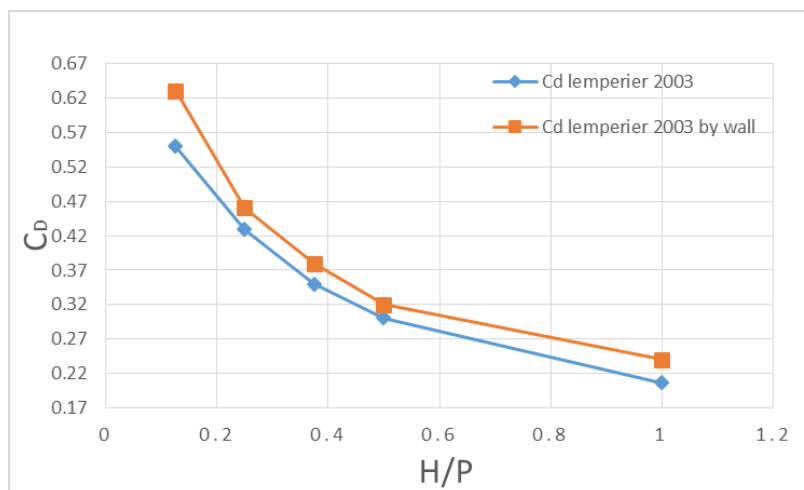


شکل ۴-۵-۱۲ مدل لمپریر ۲۰۰۳ با دیواره ۱ متری

نمودار شکل زیر میزان ضریب دبی مربوط به ۲ حالت مدل اولیه (لمپریر ۲۰۰۳) و مدل سرریز به همراه دیواره را نشان می دهد همان طور که در نمودار مشخص است استفاده از دیواره نیز نتایج ضریب دبی را نسبت به حالت

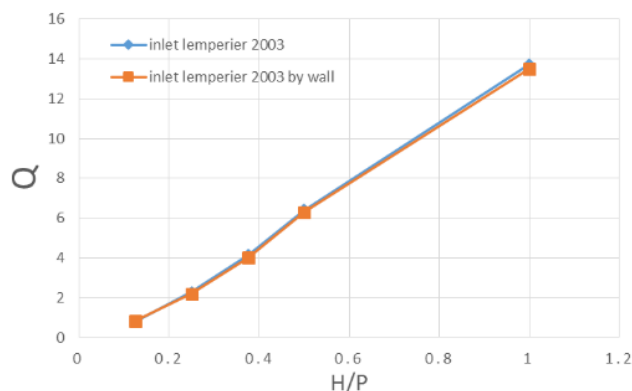


اولیه بالاتر برده و گذردهی سرریز را افزایش می دهد. این افزایش تاثیر در  $H/P$  های مختلف برای ضریب دبی بین ۰.۶٪ تا ۱.۵٪ می باشد.



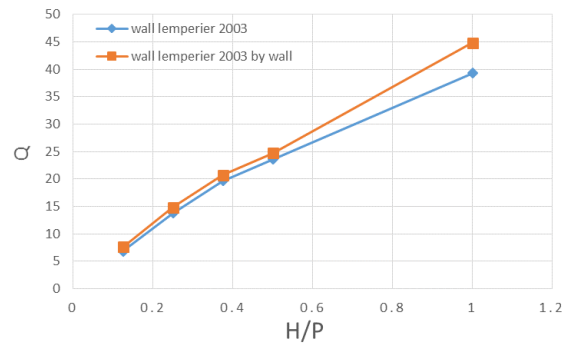
شکل ۵-۱۳ تغییرات ضریب دبی نسبت به ارتفاع هد برای مدل لمپریه ۲۰۰۳ با دیواره و بدون آن

با توجه به استخراج نتایج به صورت مجزا از سه بخش سرریز، میزان تغییرات دبی در هر بخش مورد تحلیل قرار گرفته است. در شکل های زیر میزان دبی در سه بخش دهانه بالادست خروجی، دیواره بین دهانه ها و پایین دست ورودی به صورت مجزا در هد های مختلف نشان داده شده است. نتایج شکل ۵-۱۴ نشان می دهد که تاثیر دیواره ها در قسمت ورودی سرریز با حالت بدون دیواره تفاوت محسوسی ندارد و مقادیر دبی برابرند حتی در بعضی نقاط میزان دبی در حالت با دیواره از حالت اولیه کمتر نیز می باشد.



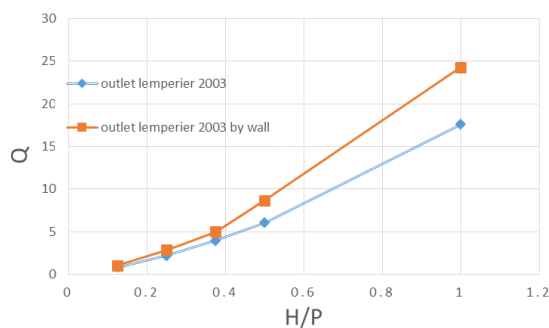
شکل ۵-۱۴ بررسی تاثیر دیوار بر لمپریه ۲۰۰۳ در پائین دست دهانه ورودی

بر روی جدار بین ورودی و خروجی با افزایش هد آب استفاده از دیواره روی تاج دبی را افزایش می دهد این افزایش بین ۰.۴٪ تا ۱.۳٪ می باشد. همان طور که مشاهده می شود با افزایش یافتن ارتفاع هد این اختلاف بیشتر می شود.



شکل ۵-۱۵ بررسی تاثیر دیوار بر لمپریر ۲۰۰۳ در قسمت جدار بین دهانه ها

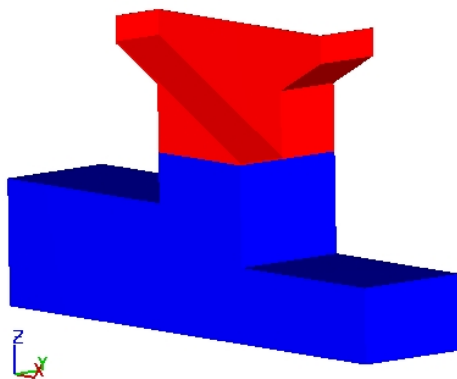
در قسمت خروجی استفاده از دیواره روی تاج میزان دبی را به صورت قابل توجهی افزایش می دهد و در H/P برابر ۱ این افزایش تا حدود ۰.۴٪ می رسد. طبق نتایج دبی بر قسمت های مختلف سرریز، می توان گفت تاثیر دیواره بر روی تاج سرریز در بعضی قسمت ها مناسب و در بعضی دیگر بی تاثیر و یا حتی دارای اثر منفی می باشد. با توجه به اثر مثبت دیواره در بخش خروجی و این که در حالت اصلاح شده لمپریر ۲۰۰۹ عرض دهانه خروجی به میزان ۰/۸ عرض ورودی کاهش می یابد به نظر می رسد استفاده از دیواره برای شکل اصلاح شده سرریز تاثیر مناسبی نداشته باشد.



شکل ۵-۱۶ بررسی تاثیر دیوار بر لمپریر ۲۰۰۳ در قسمت خروجی

#### ۵-۴-۲ بررسی اثر دیواره بر مدل لمپریر ۲۰۰۹:

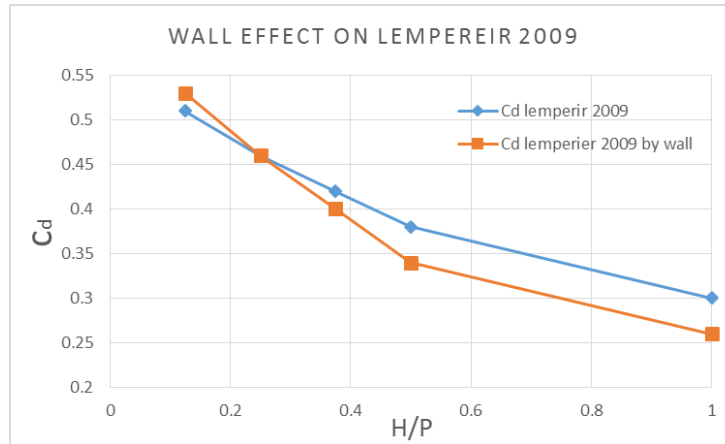
همان طور که در دو بخش قبل دیده شد اصلاح مدل سرریز با طرح جدید لمپریر قدرت گذردهی سرریز را افزایش داده است. همین طور قرار دادن دیواره بر روی سرریز نیز ضریب دبی سرریز را افزایش می دهد. با توجه به افزایش یافتن قدرت گذردهی سرریز در دو حالت قبل، این بار اثر قرار دادن دیواره بر روی سرریز مدل لمپریر ۲۰۰۹ را مورد بررسی قرار می دهیم. برای این منظور یک مدل از این نوع سرریز با قرار دادن دیواره بر روی تاج ساخته شده و به نرم افزار وارد شد. ارتفاع دیواره استفاده شده مانند حالت قبلی یک متر در نظر گرفته شده است.



شکل ۵-۱۷ مدل ساخته شده از لمپریر ۲۰۰۹ با دیواره

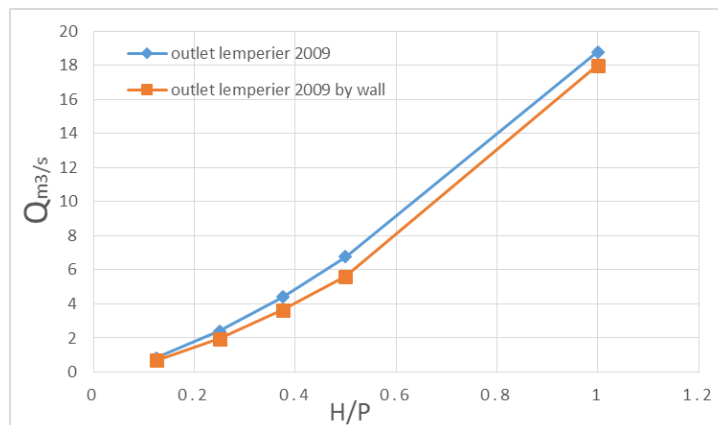
تغییرات میزان ضریب دبی نسبت به ارتفاع برای دو حالت مدل لمپریر ۲۰۰۹ و لمپریر ۲۰۰۹ به همراه دیواره در نمودار شکل ۵-۱۸ نشان داده شده است.

همان طور که نشان داده شده استفاده از دیواره تاثیر مثبتی روی گذردهی سرریز نداشته و با افزایش ارتفاع هد آب میزان ضریب کاهش نیز می یابد. کوچک تر شدن عرض دهانه خروجی سرریز و افزایش عرض دهانه ورودی و تاثیر گذاری بالای دیواره بر دهانه خروجی را می توان از جمله عوامل موثر برای این کاهش قدرت گذردهی عنوان کرد.



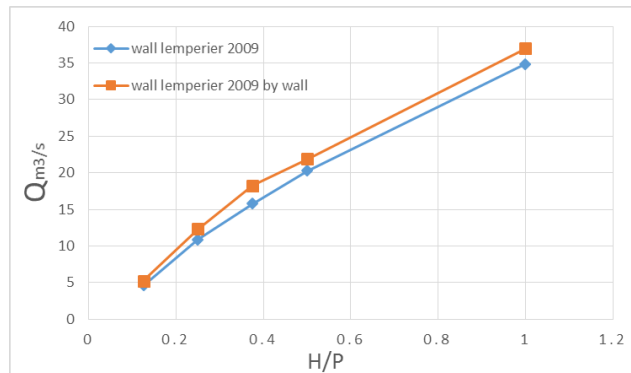
شکل ۵-۱۸ نمودار تغییرات ضریب دبی نسبت به ارتفاع هد برای لمپرییر ۲۰۰۹ همراه با دیواره و بدون آن

در نمودارهای شکل‌های زیر تاثیر گذاری دیواره به صورت مجزا نشان داده می‌شود. در نمودار شکل ۵-۱۹ اثر دیواره بر روی دهانه خروجی نشان می‌دهد که قرار دادن دیواره روی تاج سرریز تاثیر کاهشی بر گذر دهی در قسمت خروجی سرریز دارد. در این بخش سرریز استفاده از دیواره میزان دبی را تا ۱۵٪ کاهش داده است.



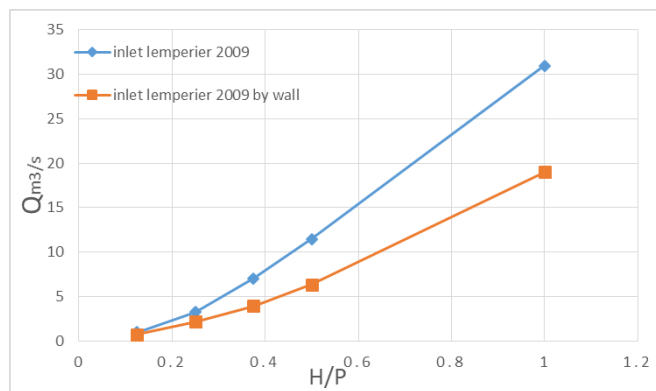
شکل ۵-۱۹ اثر دیواره بر قسمت خروجی سرریز لمپرییر ۲۰۰۹

تاثیر دیواره روی تاج برای جدار بین دهانه تغییرات دبی را افزایش می‌دهد. این افزایش تا حدود ۱۵٪ می‌باشد.



شکل ۵-۲۰ اثر دیواره بر سرریز لمپیر ۲۰۰۹ در قسمت جدار بین دهانه ها

بخش تاثیر گذار در کاهش ضریب دبی در این حالت قسمت ورودی می باشد همان طور که در نمودار شکل زیر مشاهده می کنید میزان دبی برای پائین دست قسمت ورودی سرریز با قرار گرفتن دیواره به شدت نسبت به حالت اولیه کاهش می یابد. این کاهش دبی تا حدود ۴۵٪ در هد های بالاتر می رسد.



شکل ۵-۲۱ اثر دیواره بر سرریز لمپیر ۲۰۰۹ در قسمت ورودی

پائین دست دهانه ورودی سرریز در صورت قرار گرفتن دیواره اثری منفی نشان می دهد. در مدل لمپیر ۲۰۰۹ با بزرگتر شدن عرض این قسمت این اثر منفی نیز افزایش یافته است. در قسمت خروجی سرریز با وجود کوچکتر شدن عرض دهانه میزان ضریب دبی کاهش یافته است اما این میزان کاهش ضریب دبی بسیار خفیف تر نسبت به دهانه ورودی بوده است.

همان طور که مشاهده شد اثر قرارگیری دیواره روی تاج سرریز برای مدل لمپریر ۲۰۰۹ تاثیر مثبتی نداشت و حتی با افزایش هد میزان ضریب دبی کاهش بیشتری پیدا می کند. بررسی اثر دیواره بر سرریز لمپریر ۲۰۰۳ و لمپریر ۲۰۰۹ نشان می دهد که تاثیر دیواره اثر مثبتی بر دهانه خروجی سرریز کلید پیانویی دارد و در قسمت ورودی این اثر منفی است در جدار بین دهانه ها نیز تاثیری خفیف اما مثبت دارد. در ادامه برای بررسی بیشتر این موضوع سرریز مدل لمپریر ۲۰۰۹ را با یک تغییر در عرض دهانه های ورودی و خروجی مورد بررسی قرار می دهیم و اثر قرار گرفتن دیواره بر این حالت را مورد آزمون قرار می دهیم.

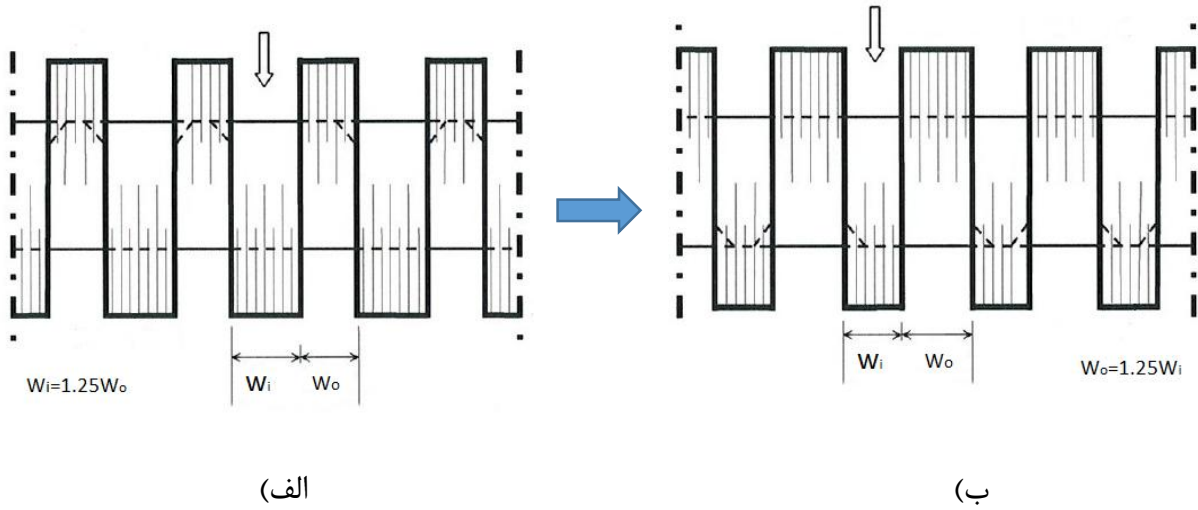
#### ۵-۴-۳ بررسی اثر دیواره بر مدل تغییر یافته لمپریر ۲۰۰۹

#### ۵-۴-۳-۱ مدل تغییر یافته لمپریر ۲۰۰۹

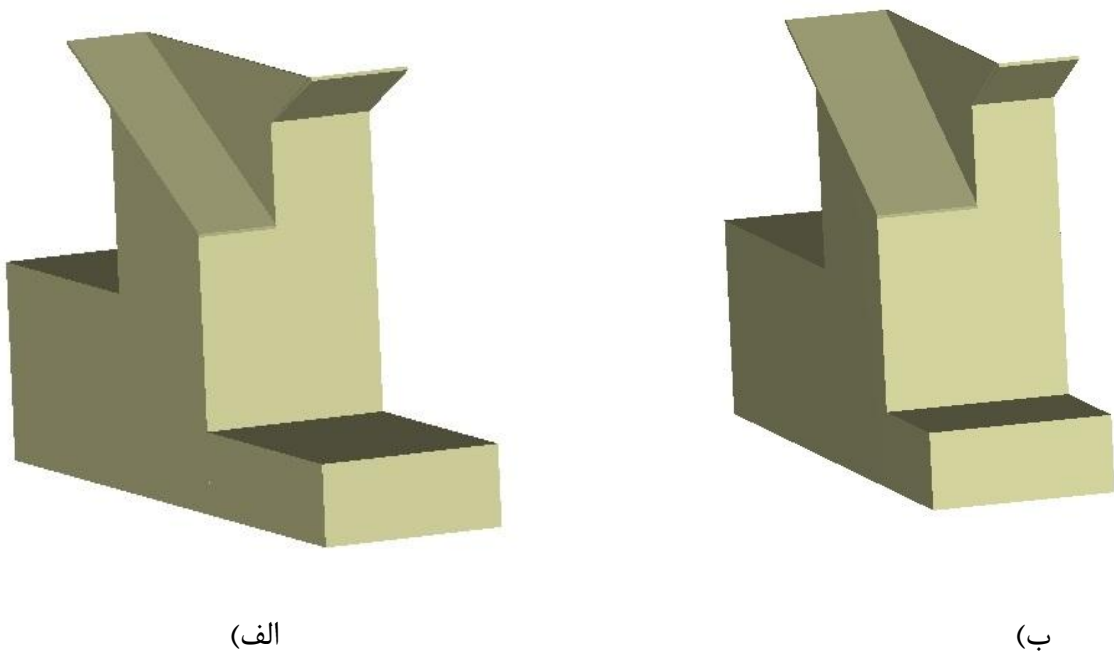
همان طور که در فصل قبل مشاهده شد استفاده از دیواره بر روی تاج سرریز مدل لمپریر تاثیر مثبتی نداشته است. و همچنین بررسی اثر دیواره در قسمت های ورودی و خروجی نیز تاثیر مثبت قسمت خروجی و اثر منفی قسمت ورودی را مشخص کرده است. با توجه به این که در مدل لمپریر ۲۰۰۹ عرض دهانه ورودی ۱/۲۵ برابر عرض در دهانه خروجی است سعی شده است با ایجاد تغییر در مدل لمپریر ۲۰۰۹ اثر گذاری دیواره برای یافتن حالت های کارا تر را بررسی کنیم .

طرح مدل لمپریر ۲۰۰۹ مبتنی بر مطالعات مختلف انجام شده، استخراج شده است و در بخش ۵-۳ نیز دیدیم که این الگو گذردهی دبی از روی سرریز را افزایش می دهد اما با قرار دادن دیواره، این الگو نمی تواند کارایی مناسبی از خود نشان دهد. در این بخش قصد آزمایش این فرضیه را داریم که با قرار دادن دیواره در حالتی با نسبت عکس دهانه ها می توانیم کارایی بیشتری از سرریز را شاهد باشیم .

لذا مدل لمپریر ۲۰۰۹ را با توجه به نکته بالا تغییر می دهیم و این بار عرض دهانه های خروجی را  $1/25$  برابر عرض دهانه ورودی می نماییم.

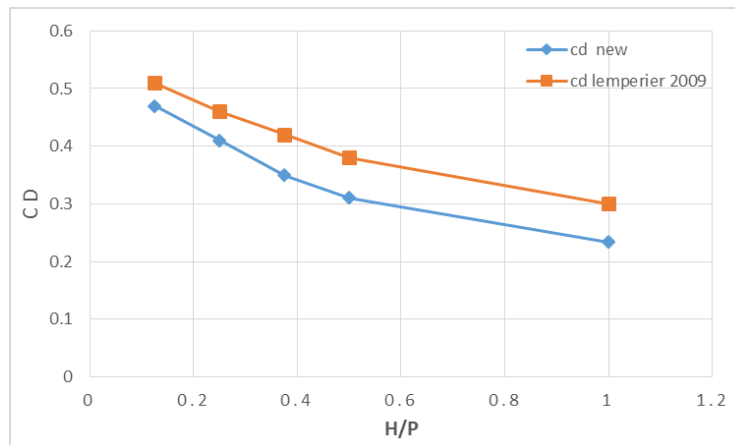


شکل ۲۲-۵ مدل لمپریر ۲۰۰۹ (الف) و شکل تغییر یافته آن (ب)



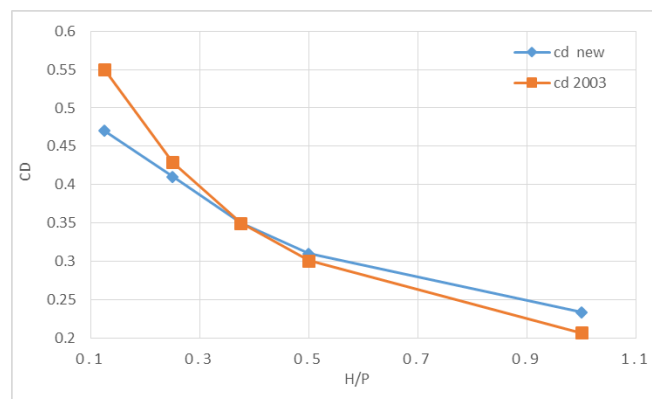
شکل ۲۳-۵ مدل لمپریر ۲۰۰۹ (الف) و شکل تغییر یافته آن (ب)

نمودار شکل ۲۴-۵ تغییرات ضریب دبی نسبت به ارتفاع هد را برای دو حالت لمپریر ۲۰۰۹ و شکل جدید تغییر داده شده آن نشان می دهد. ضریب دبی در این حالت کاهش پیدا کرده است که البته این کاهش قابل پیش بینی بود .



شکل ۲۴-۵ تغییرات ضریب دبی برای مدل لمپریر ۲۰۰۹ و مدل جدید تغییر یافته آن

در نمودار شکل ۲۵-۵ ضریب دبی در حالت لمپریر ۲۰۰۹ تغییر یافته با مدل اولیه یعنی لمپریر ۲۰۰۳ مقایسه شده است. با توجه به نمودار تغییرات ایجاد شده در سرریز با افزایش یافتن ارتفاع هد تا حدودی اثر مثبت می گذارد ولی در هد های پائین ضریب دبی نسبت به مدل لمپریر ۲۰۰۳ مقدار کم تری می باشد. ساخت مدل اخیر صرفاً جهت بررسی اثر دیواره بر روی آن می باشد و نسبت به حالت اصلی مدل لمپریر برتری خاصی ندارد.

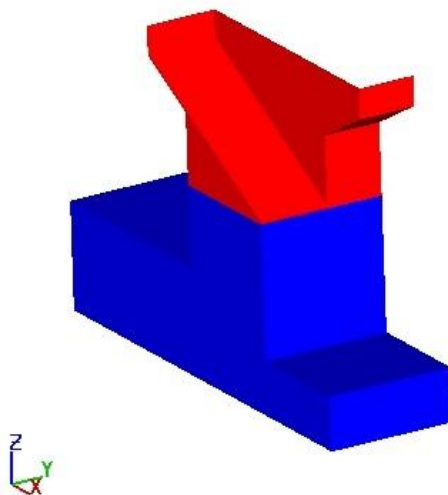


شکل ۲۵-۵ تغییرات ضریب دبی نسبت به ارتفاع هد برای مدل لمپریر ۲۰۰۹ تغییر یافته و لمپریر ۲۰۰۳



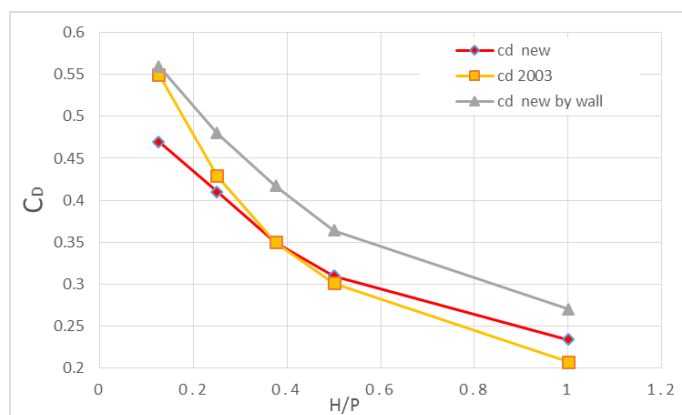
#### ۵-۴-۳-۲ استفاده از دیواره برای مدل لمپریر ۲۰۰۹ تغییر یافته

کاهش پیدا کردن ضریب دبی با توجه به تغییر ایجاد شده در مدل سرریز قابل پیش بینی بود. در ادامه برای افزایش دادن کارایی و قدرت گذردهی سرریز دیواره را بر روی تاج سرریز قرار می دهیم. برای این حالت مشابه حالت های قبلی از یک دیواره به ارتفاع ۱ متر بر روی تاج سرریز استفاده نمودیم. مدل ساخته شده این حالت در شکل ۵-۲۶ نمایش داده شده است. عبور جریان آب بر روی این مدل، مدل سازی شد و نتایج استخراج شده در نمودار شکل ۵-۲۷ نشان داده شده است.



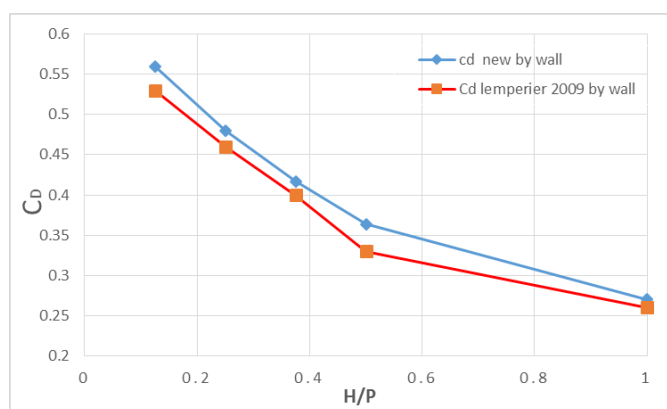
شکل ۵-۲۶ مدل سرریز کلید پیانویی براساس لمپریر ۲۰۰۹ با دیواره یک متری

نتایج ضریب دبی برای مدل لمپریر ۲۰۰۹ تغییر یافته با دیواره نسبت به حالت لمپریر ۲۰۰۳ و حالت اصلی لمپریر ۲۰۰۹ با دیواره مقایسه و در نمودارهای زیر نمایش داده شده است. نمودار شکل ۵-۲۷ تغییرات ضریب دبی را در حالت های لمپریر ۲۰۰۳، لمپریر ۲۰۰۹ تغییر یافته و لمپریر ۲۰۰۹ تغییر یافته با دیواره را نشان می دهد. همان طور که انتظار می رفت استفاده از دیواره برای شکل تغییر یافته لمپریر ۲۰۰۹ ضریب دبی را افزایش داده است. این مقدار نسبت به مدل لمپریر ۲۰۰۳ نیز بالاتر می باشد.



شکل ۵-۲۷ نمودار تغییرات ضریب دبی نسبت به هد را در حالت های لمپریر ۲۰۰۳، لمپریر ۲۰۰۹ تغییر یافته و لمپریر ۲۰۰۹ تغییر یافته با دیوار

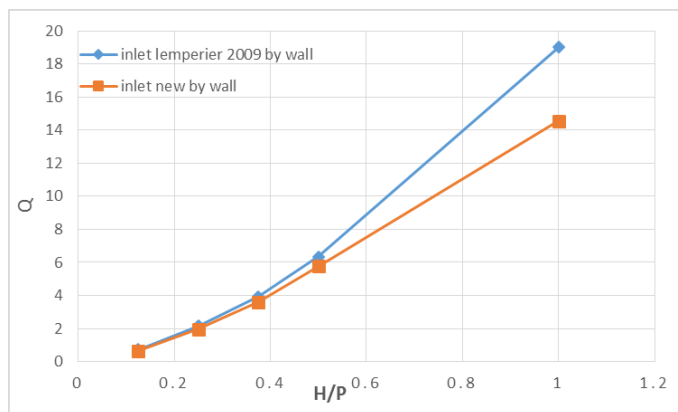
در نمودار شکل ۵-۲۸ تغییرات ضریب دبی به هد را برای مدل لمپریر ۲۰۰۹ با دیواره و مدل لمپریر ۲۰۰۹ تغییر یافته با دیواره نمایش داده شده است. با توجه به شکل، مدل جدید تغییر یافته لمپریر ۲۰۰۹ با دیواره از مدل لمپریر ۲۰۰۹ با دیواره که عملکرد مطلوبی نداشت، قدرت گذردهی بیشتری دارد. با توجه به افزایش عرض دهانه خروجی در شکل تغییر یافته می بینیم که در این حالت ضریب دبی از حالت اصلی لمپریر ۲۰۰۹ بهتر عمل کرده است این در صورتی است که این مدل در شرایط بدون دیواره از مدل اصلی لمپریر ۲۰۰۹ ضعیف تر بود. این افزایش ضریب دبی در تمامی هدهای آب بوده است و اینگونه نیست که این تغییر را فقط در هدهای پائین و یا هدهای بالای آب ببینیم بلکه در کلیه هدها ضریب دبی افزایش دارد.



شکل ۵-۲۸ نمودار تغییرات ضریب دبی نسبت به هد در حالت های لمپریر ۲۰۰۹ با دیواره و لمپریر ۲۰۰۹ تغییر یافته با دیواره

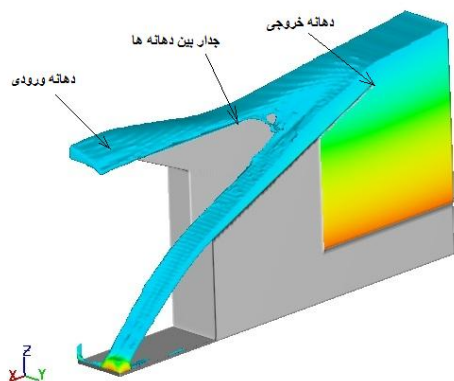
در نمودارهای زیر نیز اثر دیواره در دو حالت اخیر به صورت مجزا در هر بخش نشان داده شده که به بررسی آن می پردازیم.

در شکل ۵-۲۹ تغییرات دبی در قسمت دهانه ورودی نمایش داده شده است. در این بخش از سرریز اثر دیواره برای مدل لمپریر ۲۰۰۹ نسبت به حالت اولیه جدید بیشتر بوده که با توجه به بیشتر بودن عرض دهانه ورودی این برتری منطقی بوده است. در حالت اصلی لمپریر ۲۰۰۹ عرض دهانه ورودی  $1/25$  برابر بزرگتر از دهانه خروجی است و در مدل تغییر یافته عرض دهانه خروجی  $1/25$  برابر بزرگتر از عرض ورودی است. با توجه به این کاهش عرض کم شدن دبی گذرنده در این قسمت قابل توجیه است.

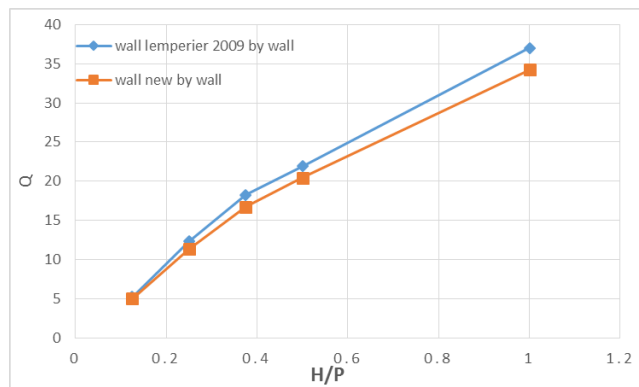


شکل ۵-۲۹ نمودار تغییرات ضریب دبی نسبت به هد در قسمت دهانه ورودی در حالت های لمپریر ۲۰۰۹ با دیواره و لمپریر ۲۰۰۹ تغییر یافته با دیواره

در نمودار ۵-۳۰ (الف) تغییرات دبی در قسمت جدار بین دهانه نشان داده شده است. در این قسمت هم دبی گذرنده برای حالت اولیه لمپریر ۲۰۰۹ نسبت به مدل جدید تغییر یافته اندکی بیشتر است. با توجه به افزایش دبی در این قسمت در حالت اولیه و اینکه در حالت اولیه عرض دهانه ورودی بیشتر است می توان گفت تاثیر دهانه ورودی بر جدار بین دهانه ها بیشتر از دهانه خروجی است. این امر با توجه به مشاهده شکل سرریز کاملاً محسوس است. برای تخلیه دهانه خروجی در همان ابتدا آب بالادست را از خود عبور می دهد ولی برای دهانه ورودی آب در انتهای سرریز تخلیه می شود که این امر باعث می شود میزان تخلیه آب در جدار میانی سرریز به قسمت دهانه ورودی سرریز وابسته شود.



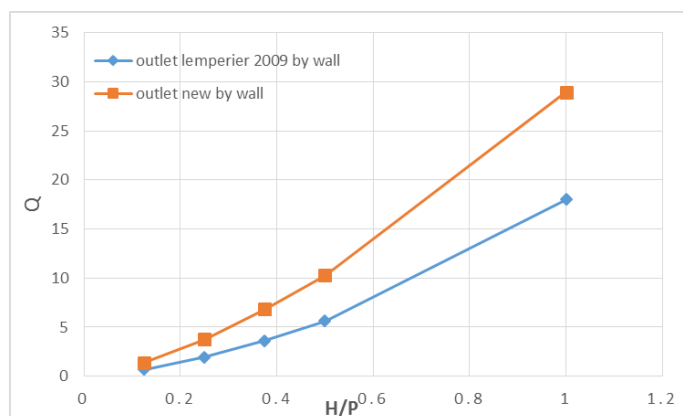
(ب)



(الف)

شکل ۵-۳۰ الف) تغییرات دبی در قسمت جدار میانی (ب) نمودار شکل مدل سرریز با معرفی سه جز آن

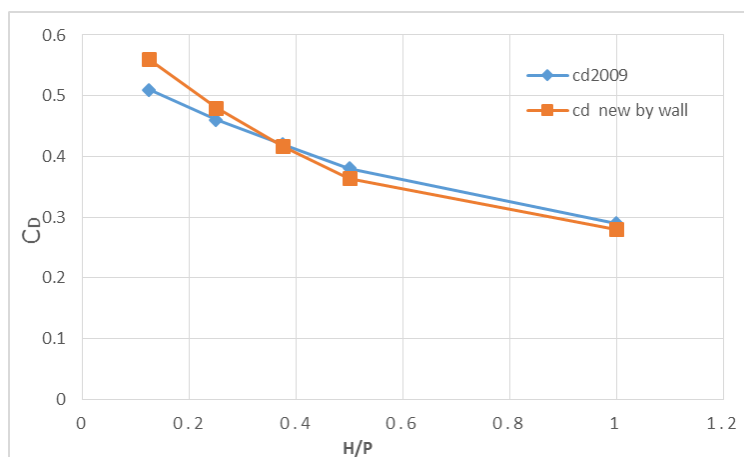
در شکل ۵-۳۱ تغییرات دبی در قسمت خروجی نشان داده شده است. پیش تر اشاره شد که اثر دیواره در این قسمت بسیار قابل توجه است همان طور که ملاحظه می شود این بخش دبی بسیار بالاتری نسبت به حالت اولیه را عبور می دهد و این افزایش از مجموع دو کاهش دبی در دو بخش بالا بیشتر بوده و در مجموع اثر دیواره در حالت جدید نسبت به حالت اولیه بهتر می شود.



شکل ۵-۳۱ نمودار تغییرات ضریب دبی نسبت به هد در قسمت دهانه خروجی در حالت های لمپریر ۲۰۰۹ با دیواره و لمپریر ۲۰۰۹ تغییر یافته با دیواره

با توجه به نتایج بالا می توان گفت ایجاد تغییر در ابعاد مدل لمپریر ۲۰۰۹ توانست نتایج بهتری برای قرار دادن دیواره روی تاج حاصل کند. در نمودار زیر ضریب دبی در دو حالت لمپریر ۲۰۰۹ تغییر یافته با دیواره و لمپریر ۲۰۰۹ با هم مقایسه شده است. یک حالت از دیواره استفاده شده و در حالت دیگر همان مدل لمپریر ۲۰۰۹ بدون استفاده

از دیواره می باشد. نتایج نمودار نشان می دهد که ضریب دبی برای این دو حالت نسبتاً برابر هم می باشد. ابتدا ضریب دبی در حالت تغییر یافته با دیواره بالاتر بوده و سپس اندکی کاهش می یابد و میتوان گفت در یک محدوده می باشند. با توجه به نمودار و تغییرات هندسی انجام داده شده می توان گفت اثر قرار دادن دیواره به همراه افزایش عرض خروجی با اثر افزایش ورودی برابری می کند و این دو حالت ضریب دبی را تقریباً به یک اندازه افزایش می دهند. همان طور که مشاهده شد در هر دو حالت قرار دادن دیواره، برای مدل لمپریر ۲۰۰۹ و افزایش عرض خروجی در مدل تغییر یافته اش هر دو اثر قابل قبولی بر گذردهی نداشته اند.

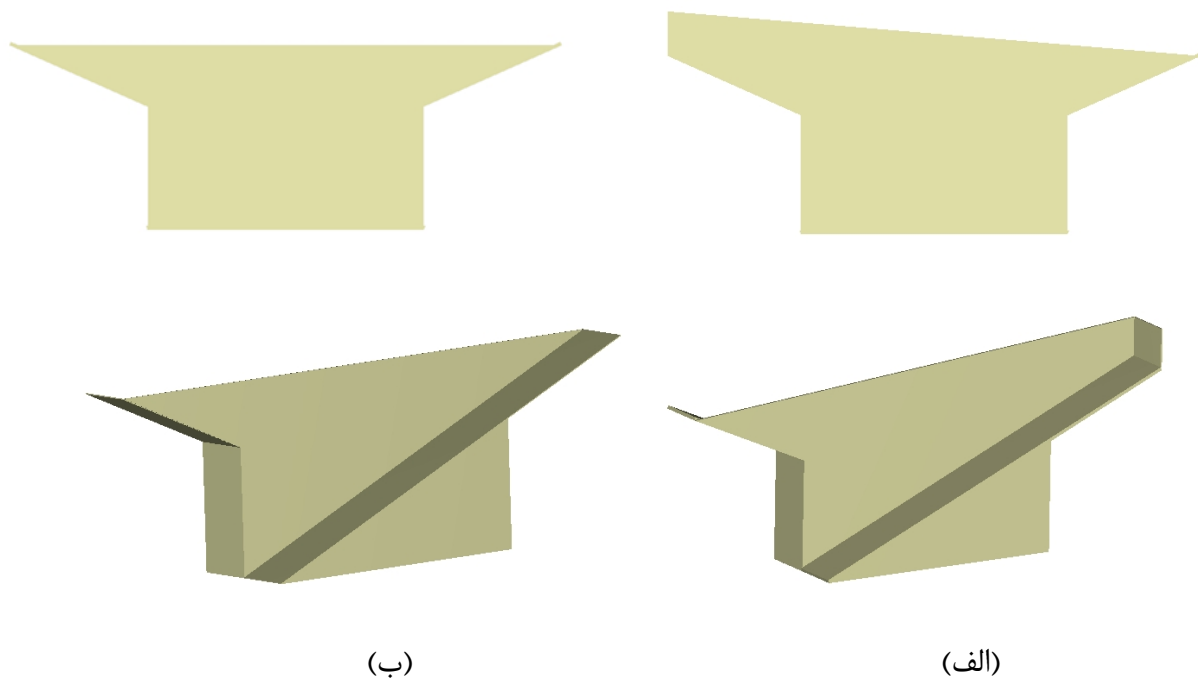


شکل ۵-۳۲ نمودار تغییرات ضریب دبی نسبت به هد در حالت های لمپریر ۲۰۰۹ و لمپریر ۲۰۰۹ تغییر یافته با دیواره

#### ۵-۴-۴ استفاده از دیواره مایل

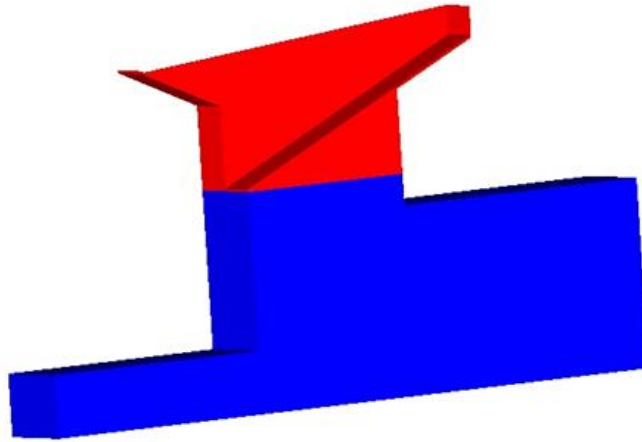
در بخش های قبلی گفته شد که استفاده از دیواره بر روی تاج سرریز کلید پیاپویی می تواند قدرت گذردهی سرریز را افزایش دهد. این تاثیرگذاری در بخش های مختلف متفاوت بوده و در بعضی قسمت ها دبی عبور کننده از روی سرریز بیشتر شده و در بعضی دیگر استفاده از دیواره بی تاثیر و یا حتی با تاثیر منفی بوده است. بر اساس نتایج قبلی می توان از یک طرح پیشنهادی برای قرار دادن دیواره استفاده نمود. این طرح به صورتی است که از یک دیواره کامل در قسمت خروجی استفاده می شود ولی در قسمت ورودی دیواره ای قرار نمی گیرد جداره بین دهانه

ها نیز با یک دیواره مایل از سمت کلید خروجی به سمت کلید ورودی می باشد. ارتفاع دیواره خروجی مشابه دیواره های قبلی برابر یک متر بوده و شیب دیواره روی جداره ها با توجه به طول جداره سرریز که ۱۲ متر می باشد به صورت ۱:۱۲ می شود. در شکل زیر طرح این دیواره جدید نمایش داده شده است. همان طور که در شکل ۵-۳۳ می بینیم دیواره در سمت کلید خروجی دارد و در کلید ورودی دیواره وجود ندارد و جداره بین دهانه ها به صورت مایل تاج کلید خروجی را به کلید ورودی می رساند. طرح این فرم در کنار شکل اولیه سرریز کلید پیاپویی نشان داده شده است.



شکل ۵-۳۳ الف) سرریز کلید پیاپویی با دیواره مایل ب) شکل اولیه سرریز کلید پیاپویی

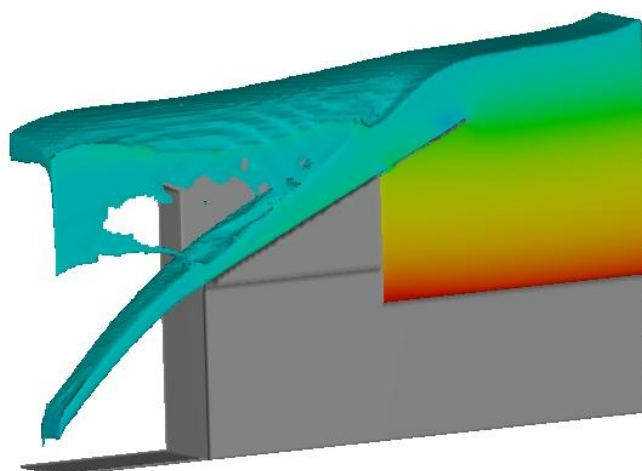
طرح جدید این سرریز ساخته شد و در نرم افزار FLOW-3D وارد گردید. شبکه حل برای مدل سازی جدید تعریف گردید و حرکت جریان بر روی این شکل سرریز در نرم افزار شبیه سازی گردید و نتایج دبی آن استخراج شد.



شکل ۳۴-۵ مدل سرریز کلید پیانویی با دیواره مایل در FLOW-3D

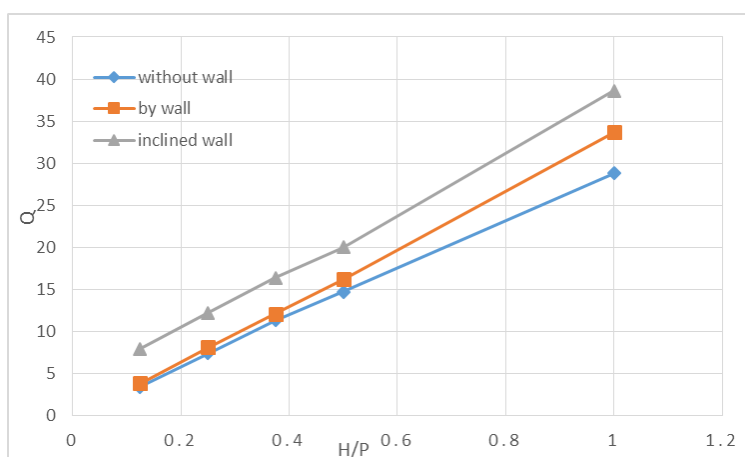
در رابطه با این طرح ذکر چند نکته الزامی می باشد که باید به آن ها توجه کرد. از آن جمله باید به مقایسه نتایج مدل سازی اشاره کرد همان طور که برای حالت های مختلف قبلی گفته شد برای مقایسه نتایج مدل سازی ها، نتایج دبی عبوری از روی تاج در هد های مختلف آب را برای شکل های مختلف مقایسه می کنیم. به طوری که این نتایج به صورت ضریب دبی بوده است. اما در این حالت ارتفاع تاج سرریز در تمام نقاط برابر نیست و این امر ممکن است باعث ایجاد خطا در حساسیت سنجی مدل سازی بشود. به همین دلیل در این قسمت نتایج را به صورت دبی واحد عرض با حالت های قبلی مقایسه می کنیم. معیار ارتفاع هد آبی که برای مقایسه کردن در نظر می گیریم میزان ارتفاع هد آب در بالادست سرریز می باشد.

نکته دیگر این است که با توجه به این که ارتفاع تاج در قسمت ورودی یک متر پائین تر است که به صورت طبیعی این امر باعث بالا رفتن هد آب و متعاقب آن بالا رفتن دبی عبوری از روی سرریز می گردد لذا افزایش دبی عبوری از روی سرریز به دلیل بالاتر بودن هد آب در قسمت دهانه ورودی را باید در نظر گرفت.



شکل ۵-۳۵ جریان بر روی سرریز کلید پینوپی با دیواره مایل

میزان دبی واحد عرض گذرنده از روی تاج سرریز در حالت جدید و حالت لمپریر ۲۰۰۳ و حالت لمپریر ۲۰۰۳ با دیواره در نمودار شکل ۵-۳۶ نشان داده شده است. نمودار ۵-۳۶ نشان می دهد میزان دبی واحد عرض در حالت جدید نسبت به حالت های قبل افزایش یافته است.

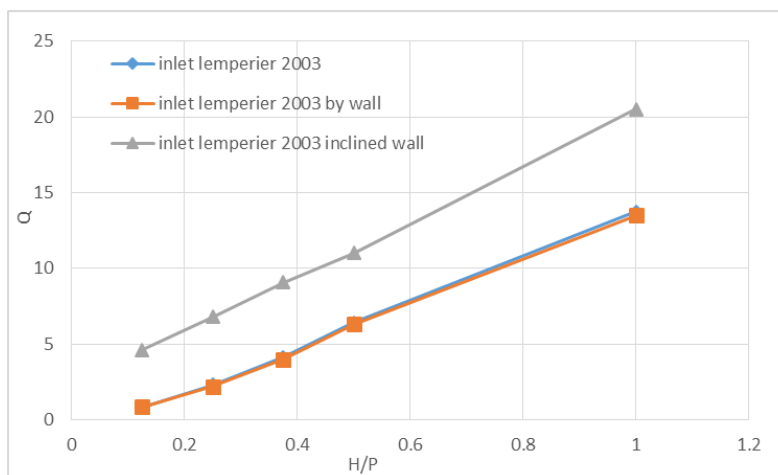


شکل ۵-۳۶ نمودار تغییرات دبی واحد عرض نسبت به هد آب برای مدل لمپریر ۲۰۰۳ بدون دیواره، با دیواره سراسری و دیواره مایل



همان طور که در شکل مشاهده می شود استفاده از دیواره مایل دبی تخلیه را به صورت چشمگیری افزایش داده است. میزان دبی در هد های پائین تر بیش از دو برابر افزایش یافته است. با بالا رفتن هد آب این افزایش دبی کمتر شده و حدود ۲۰٪ افزایش دبی داریم. قرار دادن دیواره مایل در تمام هد های آب اثر مثبت داشته و این اثر مثبت در هد های پائین آب، بیشتر بوده است.

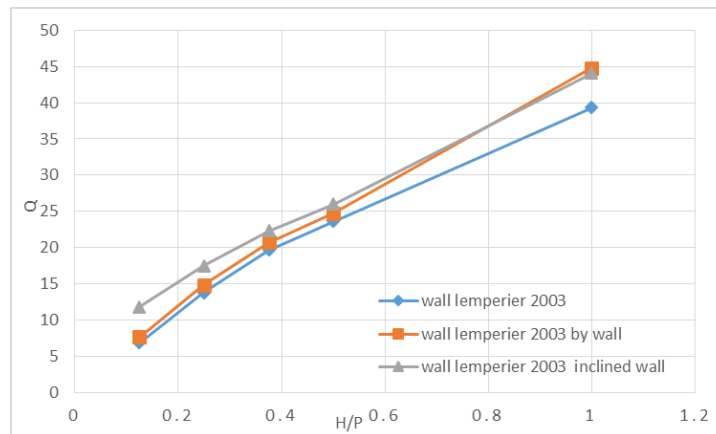
برای شناخت بیشتر در تاثیر دیواره مایل اثر آن را به صورت مجزا در بخش های مختلف را بررسی می کنیم.



شکل ۳۷-۵ تغییرات دبی در دهانه ورودی برای مدل لمپریر ۲۰۰۳ بدون دیواره، با دیواره سراسری و دیواره مایل

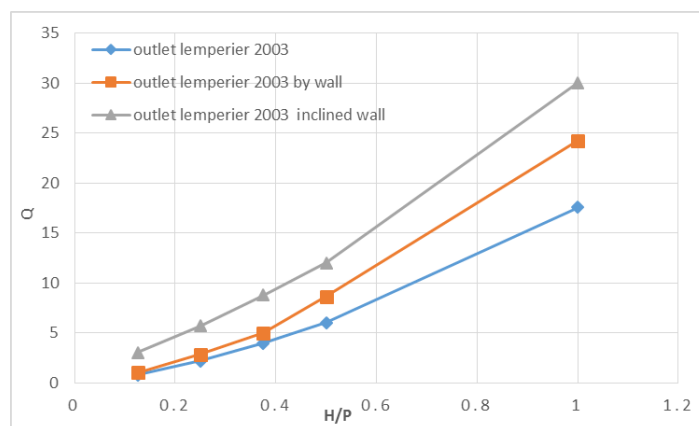
در شکل ۳۷-۵ تغییرات دبی در قسمت دهانه ورودی نشان داده شده است. قرار گیری دیواره به صورت سراسری تاثیر زیادی روی سرریز نداشته است. در نمودار بالا نیز برابری میزان دبی در حالت دیواره سراسری با حالت اولیه قابل تشخیص است. اما با استفاده از دیواره مایل دبی گذرنده از قسمت دهانه ورودی افزایش زیادی یافته است. حجم این افزایش دبی بسیار بالا بوده است و همان طور که در بالا اشاره شد می توان گفت بالا رفتن هد آب تاثیر به سزایی در این افزایش دبی دارد.

در قسمت جداره بین دهانه های ورودی و خروجی، قرار گیری دیواره مایل نسبت به حالت اولیه دبی بالاتری را عبور می دهد. در نمودار شکل ۵-۳۸ میزان دبی در قسمت جداره نشان داده شده است. اما با بالا رفتن ارتفاع هد دبی با میزان دبی در حالت دیواره سراسری برابر می شود. در این بخش طرح جدیدی دیواره تاثیر گذاری چندانی را نداشته است.



شکل ۵-۳۸ تغییرات دبی بر روی جداره بین دهانه ها برای مدل لمپیریر ۲۰۰۳ بدون دیواره، با دیواره سراسری و دیواره مایل

در شکل ۵-۳۹ اثر دبی در قسمت دهانه خروجی نشان داده شده است. در قسمت دهانه خروجی قرار گیری دیواره مایل دبی را افزایش داده است. اثر دیواره مایل در این بخش نیز بسیار مناسب بوده است و در هد های پائین تا سه برابر دبی را افزایش داده اند.



شکل ۵-۳۹ تغییرات دبی در قسمت دهانه خروجی برای مدل لمپیریر ۲۰۰۳ بدون دیواره، با دیواره سراسری و دیواره مایل

با توجه به نمودار های بالا می بینیم که استفاده از این فرم از دیواره نیز می تواند دبی گذرنده از روی تاج را افزایش قابل توجهی بدهد. تاثیر گذاری دیواره مایل بر روی سرریز در هد های پائین تر بسیار قابل توجه است در هد های بالاتر نیز دیواره اثر مثبت دارد ولی این افزایش دبی رشد کمتری دارد می توان گفت استفاده از این دیواره به عنوان یک ایده جدید، عملکرد سرریز را بهبود بخشیده و دبی بیشتر را از خود گذر می دهد.

البته شایان ذکر است این ایده جدید می بایستی از جنبه های متفاوتی مورد بررسی قرار بگیرد که مستلزم تحقیقات دیگری است. در این تحقیق استفاده از آن بر روی مدل سرریز دبی گذرنده را افزایش داده است و نتایج حاصله مثبت بوده است.

## ۵-۵ جمع بندی و خلاصه فصل

در فصل قبلی نتایج مدل سازی با نتایج مدل آزمایشگاهی تطبیق داده شد که تطابق مناسبی با هم داشتند. در این فصل چند حالت مختلف را بر روی مدل سرریز بررسی کردیم. ابتدا تاثیر گذاری انتخاب مدل آشفتگی برای حل شبکه جریان در نرم افزار بررسی شد که دیدیم استفاده از حالت جریان بدون آشفتگی حجم محاسبه را کاهش می دهد و مدل های دو معادله ای دارای جواب های دقیق تری بوده اند.

در ادامه چند حالت مختلف تغییر در هندسه سرریز را مورد بررسی قرار دادیم ابتدا الگوی طراحی ارائه شده توسط لمپریر در سال ۲۰۰۹ و سپس بررسی قرار گیری دیواره بر روی سرریز مدل و حالت اصلاح شده با الگوی لمپریر ۲۰۰۹ و در انتها نیز ایده استفاده از یک دیواره با شکل جدید و به صورت مایل بررسی گردید.



## فصل ۶

جمع بندی، نتیجه گیری و پیشنهادات

## ۱-۶ مقدمه

سرریز کلیدپیانویی به عنوان یک شکل جدید از سرریز های غیر خطی و در ادامه توسعه تحقیقات روی سرریز های کنگره ای یا لابرنت معرفی شده است. این سرریز با توجه به داشتن شکل خاص هندسی و پارامترهای مختلف نیاز به بررسی های مختلف بر روی پارامترها دارد تا بتوان به شکلی با عملکرد بهتری و قدرت گذردهی بیشتر دست یابیم. لذا در این پایان نامه با استفاده از مدل سازی های عددی و نرم افزار دینامیک سیالات محاسباتی FLOW-3D یک مدل از این سرریز ساخته شد و با شبیه سازی جریان بر روی این سرریز، حالت های مختلف برای هندسه سرریز مورد ارزیابی قرار گرفت تا به شکلی با عملکرد بهتر و گذردهی بیشتر برسیم. در این فصل نتایج حاصل از ارزیابی ها را جمع بندی می کنیم و در انتها پیشنهاداتی نیز ارائه می شود.

## ۲-۶ نتایج

### ۱-۲-۶ شبیه سازی عددی سرریز کلید پیانویی

برای مدل سازی از نرم افزار FLOW-3D استفاده شد. هندسه مدل بر اساس مدل سرریز کلید پیانویی که توسط لمپریر و آمین در سال ۲۰۰۳ مورد آزمایش قرار گرفت، انتخاب شد. این مدل با استفاده از نرم افزار AutoCad ساخته شده و به نرم افزار وارد می گردد. برای شکل دادن به حالت جریان در بالادست و پائین دست سرریز از قابلیت نرم افزار در تعریف احجام حامد استفاده شده و قسمت هایی به عنوان پایه برای بالادست، پائین دست و قسمت زیر مدل سرریز تعریف می کنیم.

شبکه حل با سلول هایی با ابعاد ۱۰ تا ۱۲ سانتی متر تشکیل شد و در نقاط با شکل پیچیده و یا دارای ضخامت کم از MESH PLANE ها برای افزایش تعداد سلول ها یا کوچک کردن ابعاد آن استفاده می کنیم. در دو طرف شبکه حل شرایط مرزی متقارن و همین طور در ابتدا و سطح بالایی از شرط مرزی فشار ثابت استفاده شده است.

در قسمت کف شبکه حل از شرط مرزی دیواره و همین طور برای پایان شبکه حل از شرط مرزی خروجی استفاده شده است. فیزیک مساله از جمله جنس سیال، اثر شتاب ثقل، واحد های اندازه گیری و دما و حجم اولیه آب پشت سرریز تعریف گردید. جریان روی سرریز به صورت آشفته و با مدل آشفتگی RNG معرفی شد. صفحات baffle به صورت مجزا در سه بخش ورودی، خروجی و جدار میانی دهانه ها برای اندازه گیری دبی گذرنده تعبیه شدند. مدل برای مدت ۳۰ ثانیه روی سرریز شبیه سازی شد و نتایج برد حسب دبی واحد عرض استخراج شده و با نتایج آزمایشگاهی مقایسه شد.

#### ۶-۲-۲ مقایسه نتایج مدل عددی با نتایج آزمایشگاهی

مدل حرکت جریان روی سرریز در ارتفاع هد آب مختلف اجرا گردید و نتایج همگرایی مناسبی داشته و پس از حدود ۱۵ ثانیه در محدوده مشخص همگرا می شده است. پس از استخراج نتایج و تطبیق آن با نتایج آزمایشگاهی دیدیم که تطبیق مناسبی با نتایج آزمایشگاه داریم. این نتایج در جدول ۴-۱ موجود می باشد و حداکثر ۰.۶٪ خطا بین مدل عددی و نتایج آزمایشگاه موجود می باشد. با توجه به تایید نتایج با مقادیر آزمایشگاه می توان گفت نتایج اعتبار لازم برای حساسیت سنجی در حالت های مختلف را دارا می باشد.

#### ۶-۲-۳ بررسی الگوی لمپریر ۲۰۰۹

الگوی ارائه شده توسط لمپریر در سال ۲۰۰۹ با معرفی یک طرح که نسبت های خاص بین پارامتر های هندسی بر قرار کرده است به عنوان یک الگو با بهبود عملکرد سرریز معرفی شده است. این الگوی پارامتر های مختلف سرریز را با یک معیار  $P_m$  نسبت گذاری نموده است. این معیار در واقع ارتفاع از محل تقاطع دهانه ها تا سطح بالای سرریز می باشد. با توجه به نسبت های ارائه شده در الگوی لمپریر ۲۰۰۹ مختصات اولیه سرریز را با نسبت

های الگوی لمپریر اصلاح کردیم و مدل جدید را در نرم افزار شبیه سازی نمودیم. نتایج نشان داد اصلاح مدل اولیه با مدل لمپریر ۲۰۰۹ ضریب دبی را در سرریز افزایش داده است و می توان گفت این الگو به بهبود عملکرد سرریز کمک کرده است.

#### ۶-۲-۴ بررسی قرار دادن دیواره بر روی تاج

تاثیر گذاری دیواره بر روی تاج سرریز در چندین حالت مورد ارزیابی قرار گرفت. ابتدا اثر قرار دادن دیواره را بر روی سرریز اولیه طراحی که مورد صحت سنجی قرار گرفته بود، بررسی کردیم نتایج مدل سازی نشان استفاده از دیواره نیز می تواند ضریب دبی سرریز را نسبت به حالت اولیه بالا تر ببرد. در ادامه نتایج دبی را در سه بخش مختلف دهانه ورودی، دهانه خروجی و جدار میانی دهانه ها به طور مجزا مورد مطالعه قرار دادیم. با بررسی در بخش های مختلف مشاهده شد که تاثیر قرار گیری دیواره در بخش دهانه خروجی بسیار مثبت بوده است و دبی گذرنده را افزایش می دهد. بر روی جداره بین دهانه ها نیز شاهد تاثیر مثبتی هستیم اما این اثر نسبت به دهانه خروجی کمتر بوده است. در بخش دهانه ورودی قرارگیری دیواره تاثیر خاصی نداشته است.

پس از بهبود یافتن نتایج در دو حالت قبل یعنی اصلاح با الگوی لمپریر ۲۰۰۹ و قرار دادن دیواره، ایده بعدی استفاده از دیواره بر روی مدل اصلاح شده لمپریر بود نتایج مدل سازی برای این حالت نشان داد علی رغم حالت قبل استفاده از دیواره روی مدل اصلاح شده ضریب دبی را کاهش می دهد. در این مدل به غیر از بخش جداره میانی دهانه ها که یک رشد خفیف در میزان دبی داشت در قسمت دهانه های ورودی و خروجی ضریب دبی کاهش یافته است. کاهش ضریب دبی در دهانه ورودی بسیار زیاد بود در قسمت خروجی نیز ضریب دبی نسبت به حالت بدون دیواره کاهش مختصری داشته است.

نتایج استفاده از دیواره نشان داد تاثیرگذاری دیواره در قسمت دهانه خروجی بسیار بالا می باشد و در دهانه ورودی تاثیر زیادی ندارد. با توجه به اینکه در الگوی لمپریر ۲۰۰۹ عرض دهانه ورودی ۱/۲۵ برابر عرض دهانه خروجی شده است این امر تاثیر بسزایی در کاهش یافتن ضریب دبی در این حالت دارد.



در ادامه نتایج قبل یک تغییر در الگوی لمپریر به وجود آوردیم و نسبت عرض دهانه ها را معکوس کردیم. در این حالت عرض دهانه های خروجی ۱/۲۵ برابر دهانه ورودی شد. این تغییر در شکل مدل لمپریر ۲۰۰۹ تاثیر مثبتی بر گذردهی جریان نسبت به حالت اصلی ندارد. ضریب دبی در این حالت نسبت به حالت اصلی مدل لمپریر ۲۰۰۹ کاهش یافته است.

اما هدف از این تغییر شکل بررسی اثر دیواره بر روی آن بود. نتایج مدل سازی بر روی این شکل از سرریز با قرار گیری دیواره نشان داد، در این حالت ضریب دبی نسبت به حالت اصلی مدل لمپریر ۲۰۰۹ افزایش یافته است. در بررسی های جزئی مشاهده می شود که در دهانه خروجی ضریب دبی افزایش چشمگیری پیدا کرده است ولی در دهانه ورودی و جداره میانی این مقدار کاهش یافته است. همچنین باید اشاره کرد در مقایسه بین حالت تغییر یافته با دیواره با حالت لمپریر ۲۰۰۹ بدون دیواره مشاهده شد این دو حالت تفاوت چندانی ندارد.

پس از بررسی های مختلف روی دیواره و شناخت اثرگذاری بخش های مختلف سرریز در حالت استفاده از دیواره یک ایده جدید در این پایان نامه ارائه و مورد آزمایش قرار گرفت. این ایده که استفاده از دیواره مایل بود به این صورت است که در دهانه خروجی یک دیواره قرار می گیرد و قسمت ورودی دیواره ای ندارد بر روی جداره میانی نیز یک دیواره به صورت مایل از قسمت خروجی به سمت دهانه ورودی ادامه می یابد. شبیه سازی این مدل با دیواره مایل نیز انجام گرفت و نتایج دبی استخراج شد نتایج نشان داد دبی بر روی سرریز با دیواره مایل از دو حالت سرریز بدون دیواره و سرریز با دیواره سراسری افزایش بیشتری داشته است. در دهانه خروجی و هم دهانه ورودی دبی نسبت به دو حالت قبل افزایش داشته است و در روی جداره میانی نیز افزایش دبی البته به مقدار کمتری مشاهده شده است.

تحقیقات انجام شده بر روی اثر دیواره با توجه به تاثیر دیواره در بخش های مختلف سرریز انجام گرفته و بر اساس آن ایده های مختلفی ارزیابی شد. در نهایت طرح سرریز با دیواره مایل معرفی شد که نتایج بسیار مناسب و قابل توجهی داشت. این نوع دیواره می تواند به افزایش یافتن کارایی سرریز کمک بنماید و شکل و مختصات آن در

تحقیقات آینده توسعه یابد در ادامه چند پیشنهاد برای محققانی که علاقه مند بر مطالعه بر این ایده هستند ارائه شده است.

### ۳-۶ پیشنهادات

برای توسعه تحقیقات بر روی این سرریز، حالت های متعددی از شکل های هندسی قابل بررسی و پیشنهاد می باشد. با توجه به تمرکز بیشتر این پایان نامه بر روی دیواره روی تاج و ارائه دیواره مایل برای این سرریز، در انتها پیشنهاداتی برای این نوع دیواره سرریز مطرح می شود.

از جمله موارد قابل بررسی محاسبه شیب بهینه برای دیواره قرار گرفته روی جدار میانی دهانه ها می باشد. همچنین می توان به بررسی پدیده استغراق موضعی که در صورت وجود دیواره اتفاق می افتد اشاره کرد. آیا این پدیده در صورت استفاده از دیواره مایل افزایش می یابد یا با کاهش مواجه می شود؟

شکل دیواره مایل بین دهانه ها می تواند تغییر یابد. آیا در صورتی که طول آن کوچکتر گردد تاثیر بهتری میگذارد یا نه؟ تهیه و ساخت چنین دیواره ای در چه حالتی از لحاظ اقتصادی به صرفه است؟

همچنین توانایی عبور مواد جامد درون سیال (مثل شاخ و برگ درختان و یا سنگ ها که در اثر سیلاب حرکت می کنند) از روی سرریز نسبت به حالت های دیگر قابل بررسی می باشد.

1. Ouamane, A. and Lemperier, F.(2006). Design of a new economic shape of weir. Proc., *international symposium on dams in the societies of the 21<sup>st</sup> century, Barcelona, spain.*463-470.
- 2 . A.J. Schleiss. (2007).from Labyrinth to Piano key Weirs – A historical review . *Hydropower &Dams*,14 (5);94-101.
- ۳.عباس افشار .غلامرضا نیک صفت (۱۳۶۷) "طراحی سازه های هیدرولیکی سدهای کوچک " دانشگاه علم و صنعت ایران
4. Anderson R.M.(2011). Piano key weir head discharge relationships. M.S. thesis, Utah State Univ, Logan,U.
5. Machiles. O. (2012). Experimental Study of the Hydraulic Behaviour of piano Key Weirs .Phd thesis Faculty of Applied Science- University of Liege :18-19.
6. lemperiere, F. and Ouamane, A. (2003). The piano keys weir: a new cost-effective solution for spillways. *Hydropower &dams*, 7(5):144-149.
7. Laugier. F . (2007). Design and construction of the first piano key Weir (PKW) spillway at the Goulours dam. *Hydropower & Dams*, 14(5): 94-101.
8. Chi Hien T., Thanh Son H. and Ho Ta Khanh, M (2006). Result of some Piano Keys Weir hydraulic model test in Vietnam. Proc., 22<sup>nd</sup> congress of Large Dams, Question87, Response 39. Barcelona, Spain. Volume IV, 581-595.
9. Pralong. J., Blancher, B., Laugier, F., Machiels, O., Erpicum, S., Piroton, M., Leite Ribeiro, M., Boillat. J-L., and Schleiss, A.J. 2011. Proposal of a naming convention for the Piano Key Weir geometrical parameters. *International Workshop on Labyrinth and Piano key weirs*, Liege, Belgium
10. Erpicum s., Machiels O., Archambeau P., Dewals B.J. and Piroton M. (2010), 1D numerical approach to model the flow over a piano key weir(PKW), in proceeding of SimHydro, nice, France

11. Pralong J., Montarros F., Blancher B. & Laugier. F. (2011) . A sensitivity analysis of Piano Key Weirs geometrical parameters based on 3D numerical modeling. *International Workshop on labyrinth and piano key Weir*, Liege, Belgium
12. Lefebvre V., Vermeulen J., Blancher B . (2013) . Influence of geometrical parameters on PK-Weirs discharge with 3D numerical analysis , *Labyrinth and Piano Key Weirs II –PKW 2013*, CRC Press, London, 49-56
13. Barcouda M., Cazaillet O., Cochet P ., Jones B.A., Lacroix S., Laugier F., Odeyer C. and Vigny J.P. (2006), Cost effective increase in storage and safety of most dams using fusegates or P.K. Weirs, in proceeding of 22eme congress des grands barrages, CIGB/ICOLD, Barcelona.
14. Machiels O., Erpicum S., Piroton M., Dewals B. and Archambeau P. (2012), Experimental analysis of PKW hydraulic performance and geometric parameters optimum, in proceedings of Piano key Weir for in-stream storage and dam safety (PKWISD-2012), New Delhi, India, 97-114.
15. Lemperiere F. (2009) New Labyrinth Weirs triple the spillways discharge – data and an easy design of P.K. Weir.
16. Lemperiere, F., Jun, G. (2005). Low Cost Increase of Dams Storage and Flood Mitigation: The Piano Key Weir. Proc. Of 19<sup>th</sup> Congress of ICID., Beijing, China.
17. Machiels O., Erpicum S., Archambeau P., Dewals B. and Piroton M. (2011), *Influence of the alveoli slope on the discharge capacity of Piano key Weirs*, in proceedings of 34<sup>th</sup> IAHR congress, Brisbane, Australia.
18. Hien, T.C., Son, H.T., & Khahn, M.H.T. (2006). “Results of some piano Key weir hydraulic model test in Vietnam.” Proc. of the 22<sup>nd</sup> Congress of ICOLD., Barcelona, Spain.
19. Ribeiro, M.L., Boillat, J.L., Schleiss, A., Laugier, F., Albalat, C. (2007). “Rehabilitation of St-Marc dam-Experimental Optimization of a Piano Key Weir.” Proc. of 32<sup>nd</sup> Congress of IAHR., Venice, Italy.
20. Ribeiro, M.L., Bieri, M., Boillat, J.L., Schleiss, A.J., Delorme, F., Laugier, F. (2009). “Hydraulic capacity improvement of existing spillways – Design of Piano Key weirs.” Proc. of 23<sup>rd</sup> congress of ICOLD., Brasilia, Brazil.
21. FLOW-3D User Manual Version 9.3 (2008). Flow Science, inc.

22. Hirt, C.W., Nichols, B.D. (1981). "Volume of FLuide (VOF) Method for the Dynamics of Free Boundaries" Journal of Computational Physics 39, 201-225

23. 9.Le Doucen, O., Ribeiro, M.L., Boillat, J-L., Schleiss, A.J. and Laugier, F. (2009). Eude Parametrique de la capacite des PK-Weirs. Modeles physiques hydrauliques – outils indispensables du XXIe siècle, SHF,Lyon.

۲۴. فیروز قاسم زاده، صلاح کوچک زاده، (۱۳۹۲) "شبیه سازی مسائل هیدرولیکی در FLOW-3D" چاپ دوم، انتشارات نوآور، تهران

## Abstract

Spillways are the most important part of dams that have fundamental role on dam safety and flood passing capacity. The ability of spillways on passing reservoirs surplus water has a great effect on increasing the reservoir capacity. Due to growing water demand, design of new spillways with high performance is critical. The piano key weir is one of the spillways that have good performance on passing water. Different physical models and experimental studies is done for weir. Due to shape complexity of this weir, there is no accurate relationship to design this weir. The numerical models of this weir was implemented by computational fluid dynamic software “FLOW-3D” and the performance of different geometrical parameters were examined by discharge coefficients. In this study, design pattern, presented by Lemperier in 2009, was applied to improve the performance of the weir. Also installing the parapet wall on top of weir were examined to increase the efficiency of the weir. Both of using new pattern and installing of parapet wall had positive effect on the efficiency of the weir. The modeling result showed that using Lemperier pattern can increase the discharge coefficient. This increase was over 40% in high heads. Also studying the parapet wall in different specific case showed the different effect on different parts of weir. Using parapet wall in the outlet keys had good performance, although using it in inlet key had negative effect. With regards to this result a new idea, named inclined wall, was examined for parapet wall on the weir. We found positive result and it can be developed in future.

**Key words:** piano key weir, numerical model, geometrical parameter, turbulence model



**Shahrood University of Technology**

**Faculty of Civil Engineering**

**Numerical Modeling of the Pianokey Weir and Study on geometrical  
Parameters Function**

**Mohsen Shiryan**

**Supervisor(s): Dr. Ramin Amini**

**january 2015**