



دانشگاه صنعتی شاهرود  
دانشکده مهندسی عمران

پایان نامه کارشناسی ارشد

# بررسی عددی برخی پارامترهای موثر بر عملکرد سرریزهای پلکانی بطور همزمان

وحید باقریه

استاد راهنما:

دکتر احمد احمدی

بهمن ۱۳۹۳

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشگاه صنعتی شاهرود  
دانشکده مهندسی عمران  
گروه مهندسی آب و محیط زیست

# بررسی عددی برخی پارامترهای موثر بر عملکرد سرریزهای پلکانی بطور همزمان

دانشجو:

وحید باقریه

استاد راهنما:

دکتر احمد احمدی

استاد مشاور:

دکتر سید علی اکبر صالحی نیشابوری

پایان نامه ارشد جهت اخذ درجه کارشناسی ارشد

بهمن ۱۳۹۳

شماره: ۸۴  
تاریخ: ۸۳، ۷، ۲  
ویرایش: ۱۳۶

باسمه تعالی



دانشگاه گیلان  
مدیریت تحصیلات تکمیلی  
فرم شماره (۶)

فرم صورت جلسه دفاع از پایان نامه تحصیلی دوره کارشناسی ارشد

با تأییدات خداوند متعال و با استعانت از حضرت ولی عصر (عج) نتیجه ارزیابی جلسه دفاع از پایان نامه کارشناسی ارشد خانم آقای وحید دقزیه به شماره دانشجویی ۹۱۰۱۲۰۴ رشته عمران گرایش سازه‌های هیدرولیکی تحت عنوان بررسی عددی برخی پارامترهای موثر بر عملکرد سربزهای پلکانی بطور همزمان که در تاریخ ۱۳۹۳/۱۱/۲۷ با حضور هیأت داوران در دانشگاه صنعتی شاهرود برگزار گردید به شرح ذیل اعلام می‌گردد:

قبول (با درجه: بسیار خوب (۱۴))  دفاع مجدد  مردود

۱- عالی (۲۰ - ۱۹) ۲- بسیار خوب (۱۸ - ۱۸/۹۹)  
۳- خوب (۱۶ - ۱۶/۹۹) ۴- قابل قبول (۱۵ - ۱۵/۹۹)

۵- نمره کمتر از ۱۴ غیر قابل قبول

عضو هیأت داوران	نام و نام خانوادگی	مرتبه علمی	امضاء
۱- استاد ارشد	احمد احمدی	دانشیار	
۲- استاد مشاور	سیدعلی اکبر صالحی نیشابوری	استاد	
۳- نماینده شورای تحصیلات تکمیلی	مهدی علی	استادیار	
۴- استاد ممتحن	امیرعباس غلامی	استادیار	
۵- استاد ممتحن	مهدی عجمی	استادیار	

رئیس دانشکده: احمد احمدی

تقدیم به مادر مهربانم

پدر فداکارم

و خواهر عزیزم

که در تمام شرایط زندگی

مشوق و یار من بودند

## تشکر و قدردانی

سپاس خدایی را که انسان را آفرید و به او آنچه را که نمی‌دانست آموخت.

اکنون که این تحقیق به سرانجام رسیده است بر خود واجب می‌دانم که از زحمات فراوان و راهنمایی‌های ارزشمند استاد مهربان و عزیزم، جناب آقای دکتر احمد احمدی و همچنین مشاور ارجمند این تحقیق، استاد فرزانه، جناب آقای دکتر سید علی اکبر صالحی نیشابوری کمال تشکر را داشته باشم.

از استاد گرانقدر جناب آقای دکتر امیررضا زرانی به‌خاطر راهنمایی‌های سخاوتمندانه و تاثیرگذار ایشان و همچنین دوستانم هانی پیرنجم‌الدین، یاسر گرایلی، مهدی قدیانی، منصور شریف، مهرداد ایروانی، وحید شمس و امیربهبزاد سعیدی‌فرد که در انجام این تحقیق مرا یاری کردند، سپاسگزارم

وحید باقریه

بهمن ۱۳۹۳

# تعهد نامه

اینجانب وحید باقریه دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته مهندسی عمران - سازه های هیدرولیکی دانشکده مهندسی عمران دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان نامه بررسی عددی برخی پارامترهای موثر بر عملکرد

سرریزهای پلکانی بطور همزمان تحت راهنمایی دکتر احمد احمدی متعهد می شوم.

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

## تاریخ

## امضای دانشجو

### مالکیت نتایج و حق نشر

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

\* متن این صفحه نیز باید در ابتدای نسخه های تکثیر شده پایان نامه وجود داشته باشد

## چکیده

حفاظت از تجهیزات پایین دست سدها در برابر سیلاب‌های خروجی و کاهش انرژی جریان و هدایت آن به پایین دست از مهم‌ترین مسائل در روند مطالعات و طراحی می‌باشد. برای مقابله با این مشکل راه‌حل‌های گوناگونی از جمله استفاده از حوضچه‌های آرامش اندیشیده شده است. راه‌حل مناسب‌تر، پراکنده نمودن انرژی جریان در حین عبور از روی سرریز می‌باشد. از این رو سرریزهای پلکانی به‌عنوان یک راهکار موثر و مناسب مورد توجه قرار گرفته‌اند.

رفتار این سرریزها دارای پیچیدگی‌های زیادی می‌باشد، ولی تاکنون در اکثر تحقیقات پیرامون این سرریزها، صرفاً به بررسی تاثیر عوامل مختلف بر روند تغییرات استهلاک انرژی پرداخته شده است، لذا بررسی سایر عوامل (به‌ویژه میدان فشار) در کنار این موضوع ضروری به نظر می‌رسد. صرف هزینه‌های بالا و نیز مشکلات موجود در مطالعات آزمایشگاهی از طرفی، و نیز تجربیات موفق در زمینه دینامیک سیالات محاسباتی، محققین را به استفاده از روش‌های عددی در انجام تحقیقات سوق می‌دهد.

در این تحقیق نرم‌افزار FLOW 3D پس از صحت سنجی و کسب اطمینان از عملکرد مناسب آن در شبیه‌سازی جریان بر روی این سرریزها، بعنوان ابزار مدل‌سازی انتخاب گردید و با تغییر یکسری پارامترهای موثر هیدرولیکی مانند شیب سرریز، نسبت ابعاد پله‌ها، رفتار جریان در این سرریزها مورد مطالعه و بررسی قرار گرفت. مشاهده گردید که اعمال این تغییرات در راستای رسیدن به بیشترین نرخ استهلاک انرژی نمی‌تواند بعنوان اصلی‌ترین ملاک طراحی مدنظر قرار گیرد و ممکن است باعث بروز مشکلاتی در عملکرد صحیح سرریز شده و نیز خطراتی (از قبیل افت شدید فشار و احتمال بروز خطر کاویتاسیون در برخی از نقاط) را بوجود آورد. از این رو در انجام مطالعات اولیه می‌بایست اثر تغییرات اعمالی بصورت هم‌زمان بر کلیه موارد موثر مورد بررسی قرار گیرد.

**کلمات کلیدی:** سرریز پلکانی، استهلاک انرژی، کاویتاسیون، فشار



## لیست مقالات

باقریه، وز احمدی، ا، " بررسی برخی پارامترهای موثر بر عملکرد سرریزهای پلکانی بطور همزمان "،  
چهاردهمین کنفرانس ملی هیدرولیک ایران، دانشکده مهندسی عمران، زاهدان ۲۰ تا ۲۲ آبان ماه

۱۳۹۴

## فهرست مطالب

۱	فصل اول: طرح مسئله (چشم‌انداز تحقیق)
۲	۱-۱ مقدمه
۳	۲-۱ کاربرد سرریزهای پلکانی
۶	۳-۱ نکات مهم در طراحی یک سرریز پلکانی
۸	۴-۱ لزوم انجام تحقیق حاضر
۸	۵-۱ ساختار پایان‌نامه
۱۱	فصل دوم: سرریزها و تاریخچه مختصری از سرریزهای پلکانی
۱۲	۱-۲ مقدمه
۱۲	۲-۲ هدف از ساخت سرریزها
۱۲	۳-۲ اجزاء تشکیل‌دهنده سرریزها
۱۲	۱-۳-۲ سازه کنترل‌کننده یا تاج
۱۴	۲-۳-۲ کانال تخلیه یا بخش انتقال آب
۱۴	۳-۳-۲ سازه پایانه یا بخش تخلیه
۱۶	۴-۲ انواع سرریزها
۱۷	۱-۴-۲ سرریزهای پلکانی
۱۷	۵-۲ تاریخچه به‌کارگیری سرریزهای پلکانی
۲۳	فصل سوم: مفاهیم اساسی در هیدرولیک جریان بر روی سرریزهای پلکانی
۲۴	۱-۳ مقدمه
۲۴	۲-۳ انواع رژیم‌های جریان در سرریزهای پلکانی
۲۵	۱-۲-۳ جریان تیغه‌ای (ریزشی آزاد)
۳۱	۲-۲-۳ رژیم جریان انتقالی
۳۳	۳-۲-۳ رژیم جریان رویه‌ای
۳۸	۳-۳ تعیین رژیم‌های جریان
۴۰	۴-۳ تعیین مکان شروع جریان یکنواخت

۴۲	۵-۳ تقسیم‌بندی نواحی جریان بر روی سرریز پلکانی
۴۴	۶-۳ استهلاک انرژی در سرریزهای پلکانی
۴۵	۷-۳ میدان فشار در سرریزهای پلکانی
۴۹	فصل چهارم: معادلات حاکم و روش‌های حل میدان جریان
۵۰	۱-۴ مقدمه
۵۰	۲-۴ انواع روش‌های حل معادلات
۵۲	۱-۲-۴ روش احجام محدود
۵۳	۳-۴ مراحل حل یک مسئله CFD
۵۴	۴-۴ ابزار و روش‌های بکارگیری شده در تحقیق حاضر
۵۴	۱-۴-۴ آشنایی با نرم افزار Auto CAD
۵۴	۲-۴-۴ آشنایی با نرم‌افزار FLOW 3D
۵۵	۱-۲-۴-۴ معادلات حاکم
۵۶	۱-۱-۲-۴-۴ سیستم‌های مختصات
۵۶	۲-۱-۲-۴-۴ معادله پیوستگی جرمی
۵۷	۳-۱-۲-۴-۴ معادلات ممنتوم
۵۹	۴-۱-۲-۴-۴ تنش برشی دیوار
۵۹	۵-۱-۲-۴-۴ ارزیابی گرانیوی
۶۱	۶-۱-۲-۴-۴ سطح مشترک و سطح آزاد سیال
۶۲	۷-۱-۲-۴-۴ روابط ورود هوا
۶۲	۲-۲-۴-۴ مدل‌های آشفستگی
۶۳	۱-۲-۲-۴-۴ فرضیه بوزینسک
۶۳	۲-۲-۲-۴-۴ مدل‌های صفر معادله‌ای
۶۴	۳-۲-۲-۴-۴ مدل‌های یک معادله‌ای
۶۴	۴-۲-۲-۴-۴ مدل‌های دو معادله‌ای
۶۵	۵-۲-۲-۴-۴ مدل‌گروه‌های نرمال شده
۶۷	فصل پنجم: مدلسازی و تجزیه و تحلیل نتایج

۶۸	۱-۵ مقدمه
۶۸	۲-۵ مشخصات مدل آزمایشگاهی
۷۰	۳-۵ بررسی قابلیت نرم افزار در شبیه سازی سرریز پلکانی
۷۰	۱-۳-۵ ایجاد هندسه مرزهای جامد و شبکه بندی
۷۴	۲-۳-۵ کالیبراسیون
۷۴	۱-۲-۳-۵ شرایط مرزی
۷۵	۲-۲-۳-۵ زمان شبیه سازی
۷۷	۳-۳-۵ تحلیل حساسیت
۷۸	۴-۳-۵ واسنجی نرم افزار
۷۹	۵-۳-۵ صحت سنجی مدل عددی
۷۹	۱-۵-۳-۵ مقادیر سرعت متوسط
۸۱	۲-۵-۳-۵ مقادیر عمق جریان
۸۳	۳-۵-۳-۵ مقادیر فشار بیشینه
۸۶	۴-۵-۳-۵ مقادیر فشار کمینه
۸۸	۴-۵ بررسی اثر تغییرات پارامترهای موثر بر رفتار سرریزهای پلکانی
۸۸	۱-۴-۵ اثر دبی بر رفتار سرریزهای پلکانی
۹۰	۲-۴-۵ اثر ابعاد پله ها بر رفتار سرریزهای پلکانی
۹۲	۳-۴-۵ اثر تعداد پله ها بر رفتار سرریزهای پلکانی
۹۴	۴-۴-۵ اثر شیب بر رفتار سرریزهای پلکانی
۹۶	۵-۴-۵ مقادیر غیر طبیعی فشار در نقاط ابتدایی و انتهایی
۹۷	۶-۴-۵ مقادیر فشار حداقل در وجوه افقی پله ها
۹۸	۵-۵ جمع بندی و خلاصه فصل
۹۹	فصل ششم: نتیجه گیری و پیشنهادات
۱۰۰	۱-۶ مقدمه
۱۰۰	۲-۶ نتایج
۱۰۲	۳-۶ پیشنهادها



## فهرست اشکال

- شکل (۱-۱): نمایی از سرریز پلکانی سد هینز در استرالیا [۱] ۳
- شکل (۲-۱): نمایی از سرریز پلکانی گابیونی سد رابینا در استرالیا [۲] ۴
- شکل (۳-۱): نمایی از یک آبشار پلکانی در فرانسه [۵] ۵
- شکل (۱-۲): نمایی از سرریز پلکانی قدیمی در آکارنایا [۳] ۱۸
- شکل (۲-۲): نمایی از سرریز پلکانی پل خواجو، اصفهان، ایران ۲۰
- شکل (۳-۲): نمایی از یک سد پلکانی الواری در استرالیا [۸] ۲۱
- شکل (۴-۲): نمایی از سد پدروگاو در پرتغال [۹] ۲۲
- شکل (۱-۳): نمایش شماتیک جریان ریزشی آزاد [۷] ۲۵
- شکل (۲-۳): جریان تیغه‌ای با پرش هیدرولیکی کامل (رژیم فرعی NA1) [۷] ۲۷
- شکل (۳-۳): جریان تیغه‌ای با پرش هیدرولیکی ناقص (رژیم فرعی NA2) [۷] ۲۷
- شکل (۴-۳): جریان تیغه‌ای بدون پرش هیدرولیکی (رژیم فرعی NA3) [۷] ۲۸
- شکل (۵-۳): رژیم جریان انتقالی، الگوی جریان در ناحیه متغیر تدریجی در شوت ملایم، ۳/۴ درجه [۳] ۳۲
- شکل (۶-۳): رژیم جریان انتقالی، الگوی جریان در ناحیه متغیر تدریجی در شوت تند، ۲۱/۸ درجه [۳] ۳۲
- شکل (۷-۳): طرح شماتیک لایه‌مرزی و جریان گردابه‌ای درون پله‌ای در جریان رویه‌ای [۷] ۳۴
- شکل (۸-۳): نواحی جریان رویه‌ای بر روی شوت پله‌ای [۷] ۳۵
- شکل (۹-۳): جریان رویه‌ای، رژیم جریان فرعی SK1 (تداخل پله - گردابه) [۷] ۳۶
- شکل (۱۰-۳): جریان رویه‌ای، رژیم جریان فرعی SK2 (تداخل گردابه - گردابه) [۷] ۳۷
- شکل (۱۱-۳): جریان رویه‌ای، رژیم جریان فرعی SK3 (چرخش پایدار) [۷] ۳۷
- شکل (۱۲-۳): نمودار مقایسه‌ای میان برخی از روابط ارائه شده جهت تعیین نوع جریان [۱۹] ۴۰
- شکل (۱۳-۳): مقاطع دارای درصد متفاوت از غلظت هوا بر روی سرریزهای پلکانی [۲۲] ۴۲
- شکل (۱۴-۳): نواحی مختلف جریان آب و هوا بر روی سرریزهای پلکانی [۱۸] ۴۳
- شکل (۱۵-۳): نمودار پروفیل فشار در وجه افقی پله [۲۷] ۴۶
- شکل (۱۶-۳): نمودار پروفیل فشار در وجه قائم پله [۲۷] ۴۶
- شکل (۱-۴): نمونه‌ای از فایل هندسی تهیه شده در فرمت stl ۵۴

- شکل (۵-۱): نمایی از مدل آزمایشگاهی [۳۰] ۶۹
- شکل (۵-۲): مشخصات هندسی مدل آزمایشگاهی [۳۰] ۶۹
- شکل (۵-۳): نمایی از هندسه تهیه شده توسط نرم افزار AutoCAD ۷۰
- شکل (۵-۴): تغییر شکل موانع در شبکه بندی FLOW 3D بدلیل رویداد محل تقاطع چندگانه ۷۲
- شکل (۵-۵) نحوه عملکرد روش FAVOR با مرزهای جامد الف) تعداد شبکه  $100 \times 230$  ۷۲
- ب) تعداد شبکه  $400 \times 530$  ۷۲
- شکل (۵-۶): الگوی شبکه بندی بلوکی در تحقیق حاضر ۷۳
- شکل (۵-۷): نمایی از شرایط مرزی به کار برده شده در مدلسازی سرریز پلکانی ۷۵
- شکل (۵-۸): نحوه عبور جریان از روی سرریز در بازه های زمانی مختلف ۷۶
- شکل (۵-۹): دبی عبوری از مرز خروجی مدل تا زمان رسیدن به حالت پایدار ۷۷
- شکل (۵-۱۰): تاثیر ابعاد مختلف مش بندی در مقادیر سرعت متوسط به ازای دبی  $0.075$  مترمکعب بر ثانیه ۷۸
- شکل (۵-۱۱): پروفیل سرعت متوسط برای دبی  $0.075$  مترمکعب بر ثانیه با مدل های مختلف آشفتگی ۷۹
- شکل (۵-۱۲): مقایسه پروفیل طولی سرعت متوسط بین داده های آزمایشگاهی و نتایج عددی در لبه پله ها الف) دبی  $0.075$  مترمکعب بر ثانیه - ب) دبی  $0.09$  مترمکعب بر ثانیه - ج) دبی  $0.113$  مترمکعب بر ثانیه ۸۰
- شکل (۵-۱۳): مقایسه عمق جریان بین داده های آزمایشگاهی و نتایج عددی در لبه پله ها الف) دبی  $0.075$  مترمکعب بر ثانیه - ب) دبی  $0.09$  مترمکعب بر ثانیه - ج) دبی  $0.113$  مترمکعب بر ثانیه ۸۲
- شکل (۵-۱۴): نمایی از محل ایجاد نقاط توقف در وجوه افقی پله ها در سرریز پلکانی ۸۴
- شکل (۵-۱۵): مقایسه فشار حداکثر بین داده های آزمایشگاهی و نتایج عددی در وجوه افقی پله ها الف) دبی  $0.075$  مترمکعب بر ثانیه - ب) دبی  $0.09$  مترمکعب بر ثانیه ۸۵
- شکل (۵-۱۶): نمایی از نواحی مختلف میدان فشار بر سرریز پلکانی ۸۷
- شکل (۵-۱۷): فشار در وجوه قائم دو پله از یک سرریز برای دبی های مختلف ۸۷
- شکل (۵-۱۸): مقایسه اثر تغییرات دبی بر میزان استهلاک انرژی و مقادیر فشارهای حداقل ۸۹
- شکل (۵-۱۹): مقایسه اثرات تغییر دبی بر مقادیر سرعت و عمق جریان در محل وقوع مقادیر حداقل فشار ۹۰
- شکل (۵-۲۰): مقایسه اثر تغییر ابعاد پله ها بر میزان استهلاک انرژی و مقادیر فشارهای حداقل ۹۱
- شکل (۵-۲۱): مقایسه اثر تغییر تعداد پله ها بر میزان استهلاک انرژی و مقادیر فشارهای حداقل ۹۳
- شکل (۵-۲۲): مقایسه اثر تغییر شیب سرریز بر میزان استهلاک انرژی و مقادیر فشارهای حداقل ۹۵

شکل (۵-۲۳): مقایسه فشار در پله اول، در سرریز پلکانی با تاج لبه تیز و منحنی

شکل (۵-۲۴): مقادیر حداقل فشار در وجوه افقی پله‌ها با تغییر دبی و ابعاد پله‌ها



## فهرست جداول

- جدول (۱-۵): مقادیر عددی و آزمایشگاهی سرعت متوسط در راستای طولی در لبه پله‌ها ۸۱
- جدول (۲-۵): مقادیر عددی و آزمایشگاهی عمق جریان در لبه پله‌ها ۸۳
- جدول (۳-۵): مقادیر عددی و آزمایشگاهی فشار بیشینه در وجوه افقی پله‌ها ۸۶
- جدول (۴-۵): نرخ استهلاک انرژی و کمترین مقدار فشار در دبی‌های مختلف ۸۹
- جدول (۵-۵): نرخ استهلاک انرژی و کمترین مقدار فشار در نسبت‌های متفاوت ابعاد پله ۹۲
- جدول (۶-۵): نرخ استهلاک انرژی و کمترین مقدار فشار در نسبت‌های متفاوت تعداد پله ۹۳
- جدول (۷-۵): نرخ استهلاک انرژی و کمترین مقدار فشار در شیب‌های مختلف سرریز ۹۵

## علائم و نشانه‌ها

فاصله از لبه وجه افقی پله	$y$
فاصله از لبه وجه قائم پله	$z$
زمان	$t$
تابع پتانسیل سرعت	$\phi$
سرعت‌های افقی	$u, v$
سرعت قائم	$w$
سطح آزاد آب	$\eta$
فشار	$P$
چگالی آب	$\rho$
شتاب گرانش	$g$
ویسکوزیته سینماتیک	$\nu$
تابع کروئکر	$\delta_{ij}$
لزجت گردابه‌ای	$\nu_t$
انرژی جنبشی آشفتگی	$K$
عمق آب	$H$
فاصله از کف	$Z_b$
تنش‌های آشفتگی افقی	$\tau_{ij}$
تنش برشی در بستر	$\tau_b$
تنش برشی در سطح آب	$\tau_s$
تنش‌های موثر متوسط افقی	$\tau_{ij}$

لزجت دینامیکی	$\mu$
ضریب اصطکاک	$C_f$
ضریب دیفیوژن آشفتگی	$\Gamma$
عدد پرانتل	$\sigma_t$
مدول نرخ کرنش متوسط	$S$
نرخ استهلاک انرژی آشفتگی	$\varepsilon$
عمق جریان در پنجه	$D$
عمق هیدرولیکی جریان	$D_H$
عمق آب تمیز	$D$
عمق جریان فوق بحرانی در پایین دست محل برخورد تیغه	$d_b$
عمق بحرانی	$d_c$
ضخامت تیغه در محل برخورد	$d_i$
ارتفاع آب در استخر پشت جت	$d_p$
عمق اولیه	$d_1$
عمق ثانویه	$d_2$
ارتفاع افشانندگی آب	$d_3$
انرژی	$E$
افت انرژی جریان	$E_L$
هد کل جریان	$E_0$
انرژی بالادست	$E_1$
انرژی پایین دست	$E_2$
عدد فروود در نقطه‌ای که دقیقاً در بالای حاشیه سقوط قرار دارد	$Fr_b$

عدد فرود اولیه	$Fr_1$
فاصله کف پله از تراز آستانه	$H_i$
ارتفاع پله	$H$
دبی جریان	$Q$
دبی واحد عرض	$q$

## اختصارات

جریان تیغه‌ای	$NA$
جریان تیغه‌ای با پرش هیدرولیکی کامل	$NA1$
جریان تیغه‌ای با پرش هیدرولیکی ناقص	$NA2$
جریان تیغه‌ای بدون پرش هیدرولیکی	$NA3$
جریان رویه‌ای	$Sk$
جریان رویه‌ای نوع ۱	$Sk1$
جریان رویه‌ای نوع ۲	$Sk2$
جریان رویه‌ای نوع ۳	$Sk3$
بتن متراکم غلتکی	$RCC$
جریان انتقالی	$TR$

## فصل اول

طرح مسئله (چشم انداز تحقیق)

## ۱-۱ مقدمه

حفاظت از تجهیزات پایین دست سدها در برابر سیلاب‌های خروجی و کاهش انرژی جریان و هدایت آن به پایین‌دست از مهم‌ترین مسائل در روند مطالعات و طراحی می‌باشد. برای مقابله با این مشکل راه‌حل‌های گوناگونی از جمله استفاده از حوضچه‌های آرامش اندیشیده شده است. راه حل مناسب‌تر پراکنده نمودن انرژی جریان در حین عبور از روی شیب سرریز است. بدین منظور سرریزهای پلکانی به‌عنوان یک راهکار موثر و مناسب شناخته شده‌اند. بوسیله ایجاد پله بر روی سرریز و تنداب که همانند یک بستر زبر مصنوعی عمل می‌کند، می‌توان بخش زیادی از انرژی را قبل از رسیدن جریان به پنجه سد مستهلک نمود.

اگرچه سرریزهای پلکانی دارای سابقه طولانی در حدود ۳۵۰۰ سال یا بیشتر هستند، با این وجود استفاده از آن‌ها با توجه به روش‌های جدید ساخت نظیر بتن غلتکی در دهه‌های اخیر توسعه پیدا کرده است. کاهش هزینه اجرای سرریز، کوتاه شدن زمان اجرا، بهره‌برداری و نگهداری آسان، افزایش میزان افت انرژی، در نتیجه کاهش هزینه اجرای حوضچه آرامش، سبب کاربرد روزافزون این سرریزها شده است. همچنین افزایش هوادهی و در نتیجه کاهش احتمال وقوع پدیده خلاءزایی و فشارهای برگشت که یکی از مشکلات طراحی سازه‌های هیدرولیکی نظیر سرریزها است، از دیگر مزایای این سرریزها محسوب می‌گردد. این سازه‌ها برای محافظت از رویه و شیب پایین‌دست سدهای خاکی در برابر پدیده سرریز شدن به‌هنگام وقوع سیلاب‌های طغیانی، بسیار مناسب می‌باشند. همچنین می‌توان از این سازه‌ها بمنظور فراهم کردن یک منظره زیبا و جذاب برای جلب گردشگران و بالا بردن سطح اکسیژن مخلوط در آب کمک گرفت. با انتخاب پله مناسب در سرریزهای پلکانی، شدت استهلاک انرژی حاصل از جریان در شوت به‌نحو قابل توجهی افزایش یافته و نیاز به سیستم استهلاک انرژی در انتهای پایین‌دست تا حد زیادی کاهش می‌یابد. مقاومت شکلی پله‌ها در برابر جریان آب، همانند یک بستر زبر مصنوعی باعث افت زیاد انرژی می‌شود.

## ۲-۱ کاربرد سرریزهای پلکانی

استفاده از سرریزهای پلکانی با توجه به روش‌های جدید ساخت نظیر بتن غلتکی در دهه‌های اخیر گسترش روزافزونی پیدا کرده است. کاهش هزینه سرریزها، کوتاه شدن زمان اجراء، بهره‌برداری و نگهداری آسان، افزایش میزان افت انرژی و در نتیجه کاهش هزینه اجرای حوضچه آرامش سبب جلب توجه ویژه به این سرریزها شده است (شکل ۱-۱).



شکل (۱-۱): نمایی از سرریز پلکانی سد هینز<sup>۱</sup> در استرالیا [۱]

همچنین افزایش هوادهی و به تبع آن، کاهش احتمال وقوع پدیده خلاءزایی و فشارهای برگشت که یکی از مشکلات طراحی سازه‌های هیدرولیکی نظیر سرریزها است، از دیگر مزایای آن‌ها به‌شمار می‌رود. این سازه‌ها برای محافظت از رویه و شیب پایین دست سدهای خاکی در برابر پدیده سرریز شدن به‌هنگام وقوع سیلاب‌های طغیانی بسیار مناسب‌اند. سرریزهای پله‌ای گابیونی متداول‌ترین نوع سرریزهای مورد استفاده در بندهای گابیونی هستند (شکل ۱-۲). از پله‌ها برای استهلاک انرژی در

<sup>1</sup> Hinze

کانال‌هایی که سیلاب حاصل از رگبارهای شدید را از خود عبور می‌دهند و دیوارهای حائل رودخانه‌ای استفاده می‌شود. یک سرریز پله‌ای در پایین دست پل برای حفاظت از پی پایه‌های پل بسیار مناسب است [۲].



شکل (۱-۲): نمایی از سرریز پلکانی گابیونی سد رابینا<sup>۲</sup> در استرالیا [۲]

مهندسين شوروی سابق دیدگاه سدخاکی سرریز شونده را گسترش داده‌اند. در آمریکا و استرالیا نیز کانال‌هایی با خاکریزهای سرریز شونده با استفاده از بتن غلتکی ساخته شده است. در انگلستان یک آبگیر پله‌ای برای سرریز نیلوفری و در شمال شرقی استرالیا نیز تعدادی لبریز انحرافی با طرح پله‌ای ساخته شده است. همچنین می‌توان از این سازه‌ها برای اکسیژن‌دهی جریان‌هایی که اکسیژن محلول در آن‌ها کم است یا در امتداد رودخانه‌ها و آبراهه‌ها کمک گرفت. به این طریق می‌توان تهویه جریان‌های آلوده را نیز بالا برد. در آبشارها می‌توان این روش را برای فراهم کردن یک منظره زیبا و جذاب

<sup>2</sup> Robina



به منظور جلب گردشگران به کار بست [۲] (شکل ۱-۳). از کاربردهای دیگر آبشارهای پلکانی استفاده به عنوان سدتنظیمی<sup>۳</sup> برای سیلاب‌های حاوی قلوه‌سنگ می‌باشد. این سیلاب‌ها در مناطق کوهستانی ممکن است بسیار مخرب و فاجعه‌آمیز باشد. احداث این سدها به شکل یکسری سازه‌های آبشاری متوالی در سر آب جویبارها می‌تواند از تشکیل این سیلاب‌ها جلوگیری کند [۳]. در سال‌های اخیر تحقیقات گسترده‌ای بر روی این پدیده صورت گرفته است، چراکه اگر عملکرد هیدرولیکی سرریز به درستی دانسته شود، کاهش انرژی توسط آن می‌تواند افزایش یابد. اما از آنجاکه در شرایط طراحی، وقتی که دبی، شیب نرمال زمین و ارتفاع سرریز معلوم و در دسترس هستند، ترکیب‌های گوناگونی از عرض و تعداد پله‌ها وجود دارند و به علاوه عوامل و شرایط گوناگونی در افت انرژی بر روی این سرریز-ها دخیل می‌باشند، نمی‌توان به راحتی رابطه نظری مشخصی که به طور قطع یا با خطای قابل قبول بتواند رفتار مطمئن هیدرولیکی سازه‌ها را توجیه کند، ارائه کرد. به هر حال در حال حاضر، به جز استفاده از چند فرمول ساده برای محاسبه افت انرژی، مطالعه جریان بر روی سرریزهای پلکانی تاکنون به طور عمده فقط بر مبنای آزمایش با مدل‌های فیزیکی می‌باشد [۴].



شکل (۱-۳): نمایی از یک آبشارپلکانی در فرانسه [۵]

<sup>3</sup> Check Dam

علاوه بر این، بیشتر محققین بر روی پارامترهای مربوط به افت انرژی تمرکز کرده‌اند. بسیاری از محققین با ساخت مدل آزمایشگاهی این سرریز، به بررسی اثر الگوی جریان، هندسه پله و شیب سرریز بر افت انرژی پرداخته‌اند. از طرفی، اگرچه در سال‌های اخیر آزمایش‌های بسیاری با استفاده از مدل‌های فیزیکی بر روی این پدیده صورت گرفته، اما به‌رحال این واقعیت روشن باید مدنظر قرار گیرد که استفاده از روش‌های آزمایشگاهی بسیار پرهزینه بوده و در برخی موارد با محدودیت‌هایی مانند فضا و زمان مورد نیاز و حجم بالای آزمایش‌ها روبرو می‌باشد. البته، مطالعات عددی انجام شده بر روی این سرریزها در سال‌های اخیر بسیار محدود بوده است و تعداد اندکی از پژوهشگران برای شبیه‌سازی رفتار جریان بر روی این سازه‌ها تلاش کرده‌اند، که شاید یکی از دلایل آن پیچیدگی‌های مربوط به شبیه‌سازی رفتار جریان بر روی این سازه‌ها می‌باشد. به‌رحال با در نظر گرفتن مزایای فراوانی که مدل‌های عددی دارند، پژوهش‌های بیشتر و جدیدتر در این زمینه بسیار ضروری می‌نماید.

### ۳-۱ نکات مهم در طراحی یک سرریز پلکانی

قبل از شروع به تحقیق در خصوص سرریزهای پلکانی پاسخگویی به تعدادی از سوالات ضروری به‌نظر می‌رسد که به شرح ذیل ارائه می‌گردد.

- آیا دستیابی به حداکثر میزان اتلاف انرژی می‌تواند به‌عنوان تنها ملاک طراحی یک سرریز-

پلکانی بهینه مدنظر قرار گیرد؟

تاکنون عمده تحقیقات پیرامون سرریزهای پلکانی بر موضوع دستیابی به بیشترین نرخ استهلاک انرژی و عوامل موثر بر آن استوار بوده و بر اساس روابط تحلیلی و مدلسازی عددی و فیزیکی، مطالعات اندکی برای بررسی سایر عوامل از جمله توزیع فشار در سطح پله‌ها در طول سرریزهای پلکانی انجام شده است که این می‌تواند موجب نادیده گرفتن یکسری عوامل شود که نقش تعیین کننده در وضعیت سازه دارند و در مواردی موجب نقص در عملکرد و یا بروز خسارات گردد.

- در مطالعات هیدرولیکی سرریزهای پلکانی کدام پارامترها را می‌بایست هم‌زمان با بررسی نرخ

استهلاک انرژی کنترل نمود؟

شاید بتوان توزیع فشار در سازه های هیدرولیکی را از مهم‌ترین پارامترها در عملکرد هیدرولیکی و سازه‌ای این تاسیسات دانست که عدم توجه به آن می‌تواند بعضاً خسارات جبران ناپذیری از قبیل تخریب در اثر وقوع پدیده کاویتاسیون را باعث گردد.

- با توجه به اهمیت ویژه سرریزها در عملکرد صحیح و امن سدها، آیا مطالعات کافی در

خصوص میدان فشار در سرریزهای پلکانی صورت گرفته است؟

بدلیل ساختار سرریزهای پلکانی و امکان هوادهی جریان به‌صورت طبیعی و با وجود پیچیدگی‌های زیاد در رفتار جریان در این سرریزها، مطالعات اندکی در خصوص میدان فشار صورت پذیرفته که از ماحصل آن‌ها بعضاً روابطی نیز در این مورد ارائه شده است. این روابط عمدتاً بر مبنای فرض‌هایی از قبیل غیر چرخشی بودن جریان استوار هستند که چنین فرض‌هایی در واقعیت صادق نبوده و نتایج حاصل از این روابط در تمام شرایط قابل استناد نمی‌باشند. همچنین تاکید اکثر این مطالعات بر یافتن حداکثر میزان فشار بر سطح پله‌ها بوده و بررسی میزان حداقل فشار محتمل در طول سرریز کمتر مورد توجه قرار گرفته است.

- کدام عوامل را می‌توان در بررسی هم‌زمان میزان استهلاک انرژی و مقادیر فشار در سرریزهای

پلکانی موثر دانست؟

با مراجعه به روابط هیدرولیکی موجود و نیز آزمایشات هیدرولیکی انجام شده پیرامون این سرریزها می‌توان از بین پارامترهای موجود شیب کلی سرریز، ابعاد و تعداد پله‌ها و شدت جریان ورودی به این سرریزها را از مهم‌ترین پارامترهای موثر دانست که تغییرات آن‌ها علاوه بر تغییر ماهیت جریان تاثیرات قابل توجهی بر میزان استهلاک انرژی و مقادیر فشار اعمال می‌نماید.

## ۴-۱ لزوم انجام تحقیق حاضر

با توجه به مطالب فوق‌الذکر می‌توان لزوم و اهمیت انجام این تحقیق را در طراحی سازه‌های ایمن و بهینه از لحاظ بیشترین میزان استهلاک انرژی و در عین حال کاهش هرچه بیشتر اثرات تخریبی جریان بر سازه سرریز به جهت وقوع فشارهای منفی (احتمال رخداد پدیده کاویتاسیون) بر سطح پله‌ها در سرریزهای پلکانی عنوان نمود.

به کمک مدل‌های فیزیکی می‌توان شرایط هندسی مختلف را شبیه‌سازی و با اندازه‌گیری پارامترهای موثر، استنباطی جامع و قابل قبول از شرایط حاکم بر این سرریزها بدست آورد. با این وجود، صرف هزینه‌های بالا و نیز مشکلات موجود در مطالعات آزمایشگاهی از طرفی، و نیز تجربیات موفق در زمینه دینامیک سیالات محاسباتی ما را به استفاده از روش‌های عددی در انجام تحقیقات سوق می‌دهد.

این تحقیق به بررسی عددی میزان استهلاک انرژی و مقادیر فشار منفی (به‌عنوان عاملی جهت وقوع پدیده کاویتاسیون) بر سطح پله‌ها در سرریزهای پلکانی و برخی از پارامترهای موثر بر این موارد می‌پردازد. در ابتدا یکی از مدل‌های آزمایشگاهی به صورت عددی توسط نرم افزار FLOW 3D مدل‌سازی و پس از صحت‌سنجی با داده‌های موجود، اثرات ایجاد تغییرات در برخی پارامترهای هیدرولیکی موثر بر میزان کل استهلاک انرژی و نیز توزیع فشار منفی در طول تنداب پلکانی در حالت‌های مختلف مورد بررسی قرار خواهد گرفت.

## ۵-۱ ساختار پایان‌نامه

تحقیق حاضر پس از طرح مسئله در فصل جاری، به مطالعه مختصری در خصوص سرریزها و بیان تاریخچه مختصری از سرریزهای پلکانی در فصل دوم می‌پردازد. در فصل سوم به بررسی مفاهیم اساسی در هیدرولیک جریان با مروری بر مطالعات گذشته پرداخته می‌شود. در ادامه معادلات حاکم بر میدان جریان و انواع روش‌های حل بیان و به‌طور ویژه روش‌های عددی و نرم افزار به‌کارگیری شده (FLOW 3D) در فصل چهارم تشریح خواهد شد. در فصل پنجم پس از کسب اطمینان از عملکرد

مناسب نرم‌افزار انتخاب شده در شبیه‌سازی میدان جریان حاکم بر این سرریزها، تغییرات هیدرولیکی و هندسی مورد نظر بر مدل اعمال و نتایج حاصل مورد تحلیل و بررسی قرار می‌گیرد. جمع‌بندی تحقیق پیش‌رو و نیز ارائه پیشنهادات برای ادامه مطالعات در فصل ششم گنجانده شده‌است.



## فصل دوم

### سرریزها و تاریخچه مختصری از سرریزهای پلکانی

## ۲-۱ مقدمه

در ابتدای این فصل نخست به شرح سرریزها به طور کلی و نقش آن‌ها در استهلاک انرژی جریان عبوری از سدها و ایمنی این سازه‌ها پرداخته می‌شود، و پس از روشن شدن جایگاه ویژه سرریزهای-پلکانی، شرح مختصری از تاریخچه به‌کارگیری این سرریزها ارائه می‌گردد.

## ۲-۲ هدف از ساخت سرریزها

هنگامی که ارتفاع آب در دریاچه پشت سدی به حداکثر رسیده باشد و در همین زمان سیل دیگری رخ دهد، باید گذرگاهی بدین منظور در نظر گرفته شده باشد تا بتواند سیلاب اضافی را به پایین دست منتقل کند. بنابراین لزوم استفاده از سرریزها در این موارد کاملاً مشهود است. انتخاب نوع و ابعاد سرریز براساس مطالعات و شرایط هیدرولیکی، هیدرولوژیکی، زمین‌شناسی، نوع سد و محل آن انجام می‌گیرد. از لحاظ هیدرولوژیکی اندازه سرریزها بر اساس سیل‌های با دوره‌های بازگشت مختلف و یا گاهی اوقات حداکثر سیلاب محتمل<sup>۴</sup> تعیین می‌گردد. لذا می‌توان گفت که سرریز یکی از مهمترین سازه‌های وابسته به سد است که هر اشتباهی در طراحی و اجرای آن خطرات بالقوه‌ای به همراه خواهد داشت و بعضاً خسارات جبران‌ناپذیری را برجای خواهد گذاشت [۶].

## ۲-۳ اجزاء تشکیل‌دهنده سرریزها

بطور کلی می‌توان گفت که اکثر سرریزها از سه بخش عمده شامل سازه کنترلی، کانال تخلیه و سازه پایانه تشکیل می‌شوند.

## ۲-۳-۱ سازه کنترل‌کننده یا تاج

---

<sup>4</sup> PMF



مهم ترین بخش یک سرریز قسمت سازه کنترلی آن است. تنظیم و کنترل جریان خروجی از مخزن در این بخش صورت می پذیرد. به عبارت دیگر، سازه کنترل در مواقعی که تراز آب پایین تر از یک تراز معین باشد، مانع خروج جریان از مخزن سد شده و در هنگام وقوع سیلاب و افزایش سطح آب به میزان بیش از حد مشخص شده باعث تخلیه جریان می شود. تاسیسات کنترل ممکن است شامل یک آستانه<sup>۵</sup>، لبریز<sup>۶</sup>، روزنه<sup>۷</sup> و یا لوله<sup>۸</sup> و یا اجزای دیگری باشد. رابطه دبی- ارتفاع ممکن است ثابت و یا متغیر باشد. بعنوان مثال در صورت استفاده از یک لبریز با تاج آزاد می توان رابطه دبی- ارتفاع آب را ثابت در نظر گرفت، ولی در صورت استفاده از یک لبریز دریچه دار یا یک لوله مجهز به شیر کنترل، این رابطه متغیر خواهد بود.

تاسیسات کنترل ممکن است دارای اشکال و موقعیت های مختلفی باشند. لبریزهای با تاج آزاد می- توانند مستقیم، منحنی شکل، V شکل، کنگره ای و یا گرد باشند. روزنه ها ممکن است که در وضعیت افقی، شیب دار و یا قائم قرار گرفته باشند. همچنین لوله ها ممکن است قائم، افقی و یا شیب دار بوده و سطح مقطع آنها می تواند به شکل دایره ای، چهارگوش، مستطیلی، نعل اسبی و یا هر شکل دیگری باشد. یک سرریز می تواند لبه تیز، سهموی شکل، اوجی لبه پهن و یا ترکیبی از این حالت ها و در بعضی مواقع نیز دارای مقطع متغیری باشد. همچنین روزنه ها نیز به شکل های لبه تخت، لبه گرد و یا زنگوله ای در نظر گرفته شوند و می توانند طوری قرار گیرند که جریان را بصورت یک جریان فورانی کاملاً فشرده و یا بدون فشرده گی تخلیه نمایند. روزنه ها می توانند جریان را بصورت آزاد یا نیمه مستغرق و یا کاملاً مستغرق از خود عبور دهند. گوشه ورودی لوله های کوتاه ممکن است بصورت لبه تیز، لبه گرد و یا زنگوله ای ساخته شود و اندازه داخلی آنها در طول می تواند یکنواخت، واگرا و یا

---

<sup>5</sup> Crest

<sup>6</sup> Weir

<sup>7</sup> Orifice

<sup>8</sup> Pipe

همگرا باشد. جریان در لوله‌های کوتاه ممکن است بصورت آزاد بوده و یا اینکه در تمام درازای لوله و یا بخشی از آن بصورت پر عمل کند [۶].

### ۲-۳-۲ کانال تخلیه یا بخش انتقال آب

کانال تخلیه وظیفه انتقال جریان عبوری از تاسیسات کنترل به بستر رودخانه در پایین‌دست سد را برعهده دارد. سطح مقطع کانال تخلیه می‌تواند بصورت مستطیل، ذوزنقه، دایره‌ای و یا اشکال دیگر باشد. ابعاد کانال تخلیه تابع الزامات هیدرولیکی است، ولی انتخاب مقطع طولی، شکل، پهنا و درازای آن و دیگر پارامترها، متأثر از شرایط توپوگرافیک و ژئوفیزیک منطقه است. کانال‌های باز معمولاً مطابق با شیب پروفیل طولی زمین حفر می‌گردند. تونل‌ها و مجراهای بسته معمولاً از دو قسمت شامل تنوره استوانه‌ای قائم یا مورب و مجرای بسته‌ای که از زیر یا درون سد می‌گذرد، تشکیل می‌شوند. بعضاً ترکیبی از یک مجرای بسته و یک کانال باز نیز به عنوان کانال تخلیه مورد استفاده قرار می‌گیرد. در سرریز یک سد خاکی که به یک کانال باز منتهی می‌شود، کانال تخلیه باید با مصالحی پوشیده شود که در برابر فرسایش حاصل از سرعت‌های زیاد مقاوم بوده و از لحاظ سازه‌ای نیز در برابر نیروی ناشی از خاکریز پشت سازه و نیروی برخاست و نیروی وارد از طرف آب پایدار باشد [۶].

### ۲-۳-۳ سازه پایانه یا بخش تخلیه

وقتی که آب داخل مخزن از طریق سرریز به سمت رودخانه پایین‌دست ریزش می‌کند، انرژی پتانسیل حاصل از ارتفاع آن به انرژی جنبشی تبدیل می‌شود. این انرژی به شکل سرعت نسبتاً زیاد ظاهر می‌شود و در نتیجه باید تمهیداتی برای بازگرداندن جریان به‌داخل رودخانه بدون ایجاد آبشستگی و فرسایش در پنجه سد و یا تخریب سازه‌های جانبی ایجاد گردد. در بعضی موارد ممکن است جریان تخلیه شده که دارای سرعت زیاد می‌باشد، مستقیماً به یک آبراهه، هدایت و انرژی جریان از طریق ایجاد برخورد، تلاطم و یا اصطکاک پراکنده گردد. چنین ترکیبی در صورت وجود یک لایه سطحی سنگ مقاوم در برابر فرسایش در بستر کانال یا در طول تکیه‌گاه سرریز یا در محل تخلیه جریان

عبوری از روی سرریز که به اندازه کافی از سد و تاسیسات جنبی دور است و خطر آبشستگی وجود ندارد، مناسب می‌باشد.

کانال تخلیه ممکن است تا محلی بالاتر از رقوم بستر رودخانه، تا سطح بستر رودخانه و یا پایین‌تر از آن ادامه یابد. در بعضی از موارد لازم است برای پرتاب جریان فورانی به فاصله‌ای دورتر از انتهای کانال تخلیه از منحرف کننده‌ها، سازه کنسولی کشیده و یا سازه‌های جامی شکل استفاده گردد. در اغلب موارد به منظور کاهش فرسایش حاصل از برخورد جریان فورانی آب بر بستر رودخانه، از منحرف کننده‌های واگرا<sup>۹</sup> استفاده می‌شود و جریان فورانی خروجی را بصورت یک ورقه خیلی نازک در می‌آورند تا از این طریق فرسایش به کمترین مقدار خود برسد. چنانچه بر اثر برخورد جریان فورانی فرسایش ایجاد شود، باید یک حوضچه استغراق در بستر رودخانه ایجاد نمود و احتمالاً در صورت لزوم، حفاظت بستر و دیواره بصورت سنگ‌چین نیز در نظر گرفته می‌شود. برای کم کردن حجم کار لازم است حجم عملیات خاکبرداری را به کمترین مقدار رساند و بهتر است به جریان اجازه داده شود که یک حوضچه طبیعی ایجاد نماید. سپس می‌توان از پوشش حفاظتی سنگ‌چین یا پوشش بتنی برای متوقف نمودن فرسایش استفاده نمود. در این صورت به منظور جلوگیری از شسته شدن تاسیسات سرریز باید یک دیوار آب‌بند یا نوعی حفاظت دیگر در انتهای سازه سرریز ایجاد نمود. در مواردی که بستر کانال در معرض فرسایش جدی قرار دارد، باید انرژی فراوان جریان قبل از بازگشت به کانال پایین‌دست، توسط حوضچه آرامش پرش هیدرولیکی، جام غلتابی و حوضچه مجهز به بلوک بارشکن و مانع دیواره مستهلک گردد [۶].

---

<sup>9</sup> Flaring Deflector

## ۲-۴ انواع سرریزها

معمولاً سرریزها را براساس مهمترین مشخصه آنها تقسیم‌بندی می‌کنند. این مشخصه می‌تواند در رابطه با سازه کنترل، کانال تخلیه و یا هر عضو دیگر آن باشد. برحسب اینکه سرریز مجهز به دریچه و یا فاقد آن باشد، به ترتیب با نام سرریزهای کنترل‌دار و یا سرریزهای بدون کنترل شناخته می‌شوند. روش دیگر تقسیم‌بندی براساس شکل تاج آنهاست که به دو دسته کلی سرریزهای با تاج مستقیم و سرریزهای با تاج غیرمستقیم تقسیم می‌شوند. به‌طور کلی مهمترین سرریزها به‌طور مختصر در ذیل ذکر شده‌اند:

۱. سرریزهای ریزشی آزاد (سقوط) یا لبه آبریز

۲. سرریزهای اوجی یا آبریز

۳. سرریزهای جانبی یا سرریزهای با کانال جانبی

۴. سرریزهای سیفونی

۵. سرریزهای شیب‌دار، شوت یا سرسره‌ای

۶. سرریزهای تونلی

۷. سرریزهای پلکانی

۸. سرریزهای نیلوفری

۹. سرریزهای تنوره‌ای

۱۰. سرریزهای زینی یا تقعری

۱۱. سرریزهای چندوجهی

## ۲-۴-۱ سرریزهای پلکانی

ممکن است در مناطقی، برای احداث سازه سرریز با مشکلاتی نظیر ساختار زمین شناسی (مشکلات در حفاری) و یا محدودیت مکانی به جهت افزایش طول سرریز و یا احداث برخی از سازه‌های مستهلک‌کننده انرژی مواجه شویم. در این مواقع یکی از راه‌حل‌های پیش‌رو استفاده از سرریزهای-پلکانی و مستهلک نمودن انرژی جریان در مسافت کوتاهی بر روی خود سرریز می‌باشد، از این روست که این سازه‌ها در بین سرریزهای موجود در مطالعات هیدرولیکی اخیر مورد توجه قرار گرفته‌اند. استفاده از این سرریزها به‌منظورهای مختلف به سال‌های قبل از میلاد برمی‌گردد که در ادامه به بیان شرح مختصری از تاریخچه به‌کارگیری آن‌ها پرداخته می‌شود.

## ۲-۵ تاریخچه به‌کارگیری سرریزهای پلکانی

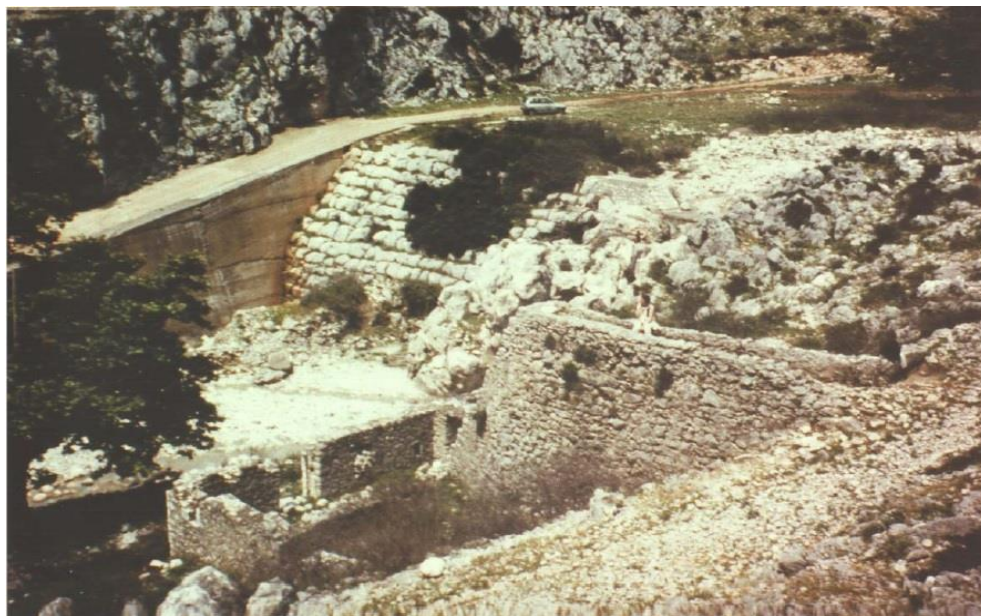
آبشارهای پلکانی از دیرباز در کارهای آبی مورد استفاده قرار گرفته‌اند. طراحی این آبشارها از آن جهت مدنظر قرار گرفته است که به‌خوبی به کاهش انرژی و هوادهی جریان می‌پردازد. اینکه برخی محققین طراحی کانال‌های پله‌ای برای کاهش انرژی جریان را یک تکنیک جدید دانسته که با استفاده از مواد ساختمانی جدید همانند بتن غلتکی و یا گابیون تقویتی توسعه یافته، نادرست است؛ زیرا که طراحی کانال‌های پلکانی از حدود ۳۵۰۰ سال پیش کاربرد داشته است [۷].

قدیمی‌ترین کانال‌های پله‌ای جهان احتمالاً یکسری از کالورت‌ها یا کانال‌های پله‌ای می‌باشند که حدود ۱۵۰۰ سال پیش از میلاد در جزیره کرت<sup>۱۰</sup> در دریای مدیترانه ساخته شده‌اند. تعدادی از آبگذرها در روم باستان نیز شامل طرح‌های آبشارهای پلکانی هستند. چشمه‌ها و آبشارهای بزرگ پلکانی در گذشته در راستای اهداف هنری و زیبایی مناظر ساخته شده‌اند. برخی از آبشارهای پلکانی بزرگ در خلال قرون شانزده تا هجده حتی از سرریزهای مدرن امروزی هم بزرگتر بوده‌اند. دانسته‌ها و مهارت‌ها در زمینه طراحی این نوع سرریزها، در گذشته‌ای بسیار دور، به‌طور فزاینده‌ای در اطراف

<sup>10</sup> Crete

مدیترانه توسط رومی‌ها، مسلمانان و اسپانیایی‌ها گسترش داشته است. اما روشن است که تکنیک‌های طراحی این سازه‌ها به‌طور جداگانه و طی دوره‌های متمادی توسعه یافته است.

قدیمی‌ترین سرریز پلکانی جهان احتمالاً سرریز پلکانی آکارناتیا<sup>۱۱</sup> در یونان است که در حدود ۱۳۰۰ سال پیش از میلاد ساخته شده است (شکل ۱-۲). این سرریز که بر روی یک سد سنگریزه‌ای بنا گردیده دارای ۱۰/۵ متر ارتفاع، با طول تاج ۲۵ متر است. شیب پایین‌دست سد، پلکانی بوده و این پله‌ها که تعداد آن‌ها ۱۴ عدد می‌باشد، با قلوه سنگ‌های تراشیده شده‌ای که در بستر ملات فرورفته‌اند، ایجاد شده است. شیب پایین‌دست آن بین ۳۹ تا ۷۳ درجه تغییر می‌کند و متوسط آن ۴۵ درجه است. ارتفاع پله‌ها نیز در محدوده ۰/۶ تا ۰/۹ متر قرار دارد. این سد لبریز شونده هنوز هم پابرجاست [۳].



شکل (۱-۲): نمایی از سرریز پلکانی قدیمی در آکارناتیا [۳]

<sup>11</sup> Akarnania

دو سرریز در آسیریا<sup>۱۲</sup> و دو سرریز قدیمی دیگر بر روی سدهای رودخانه خوسر (یا سدهای آجیلا) در عراق نیز از سازه‌های پلکانی قدیمی شناخته شده می‌باشند. دو سد آخر تقریباً حدود ۶۹۴ سال پیش از میلاد به وسیله سینا کریپ، پادشاه آشور و به منظور تامین آب شهر نینوا، پایتخت آشور در نزدیکی موصل فعلی در کشور عراق ساخته شده‌اند. دامنه پایین دست هر دو سد یاد شده پله‌ای بوده و طوری طراحی شده‌اند که آب رودخانه از روی تاج آن‌ها سرریز شود. آثار و بقایای این سدها هنوز هم موجود می‌باشد. رومیان نیز تعداد زیادی از این سازه‌ها را در امپراتوری بزرگشان ساخته‌اند که آثار آن در سوریه، لیبی و تونس پیدا شده است. یکی از سازه‌های جالب سد کاسیرین<sup>۱۳</sup> است که طول تاج سرریز شونده آن ۱۵۰ متر است. سازه‌های کوچکتر دیگری نظیر تاریگلات<sup>۱۴</sup> در لیبی، قصر خباز<sup>۱۵</sup> در سوریه و قود گرگور<sup>۱۶</sup> در تونس نیز وجود داشته‌اند [۳]. مهندسين مسلمان نیز پس از فروپاشی امپراتوری روم تجربیات نباتایی‌ها، رومی‌ها و سائبی‌ها را کسب کرده‌اند و سدهایی با سرریزهایی از این نوع را نظیر سد آدهیم در عراق، سرریز پل خواجو در ایران (شکل ۲-۲)، سد درویش<sup>۱۷</sup> در عربستان سعودی و نیز سرریز مستلا<sup>۱۸</sup> در اسپانیا ساخته‌اند. سد آدهیم براساس طراحی‌های جدید با سطح بالادست عمودی و دامنه پایین دست شیبدار شبیه به سدهای وزنی جدید ساخته شده که دارای سه دریچه رسوب شویی بوده و جریان‌های سیلابی از روی سطح شیبدار پایین دست آن لبریز می‌شده‌اند. مهندسان اسپانیایی هم از سازه‌های رومی‌ها و مسلمانان الگو برداشته‌اند، اما اصول طراحی جدیدی را نیز بر آن افزوده‌اند و سدهای جدیدی را با سرریزهای پله‌ای مانند سد آلمانزا، آلکانتی و آباژو احداث کرده‌اند. تخصص اسپانیایی‌ها در زمینه سدسازی بین سال‌های ۱۴۰۰ و ۱۸۵۰ در مقایسه با استانداردهای جهانی بسیار استثنایی و جالب بوده است. این مهارت پس از فتح آمریکا به "هند

---

<sup>12</sup> Assyria

<sup>13</sup> Kasserin

<sup>14</sup> Tareglat

<sup>15</sup> Qasr Khubbaz

<sup>16</sup> Qued Gerguor

<sup>17</sup> Darwaish

<sup>18</sup> Mestella

جدید" صادر شده است. در خلال قرون هجدهم و نوزدهم سدهای سرریزشونده پله‌ای بسیاری در مکزیکوی مرکزی ساخته شده است. برخی از این سدها تا اوایل قرن بیستم نیز در حال بهره‌برداری بوده‌اند [۳].



شکل (۲-۲): نمایی از سرریزپلکانی پل خواجه، اصفهان، ایران

مهندسين فرانسوی در اواسط قرن هفدهم تجربیات بسیاری کسب کرده‌اند. سیستم تغذیه‌کننده کانال دومیدی در جنوب غربی فرانسه به وسیله ریکویت<sup>۱۹</sup> طراحی شده است و با چندین آبشار پلکانی بوسیله وایان توسعه پیدا کرده است. شوت‌های پله‌ای این کانال به منظور جلوگیری از آبشویی طراحی شده‌اند. در انگلستان سدهای متعددی در نزدیک کوره‌ها و آسیاب‌ها ساخته شده که برخی از آن‌ها دارای بندها و سرریزهای پله‌ای هستند. اعتقاد بر این است که مهندسين انگلیسی تجربیات خود را در این زمینه از رومی‌ها بدست آورده‌اند. در دوره‌های بعدی نیز در دیگر مناطق جهان کاربرد این سازه‌ها گسترش یافته‌است. اشاره به این نکته که برخی از سدهای قدیمی الواری دارای سرریزهای پلکانی بوده‌اند، جالب توجه است. احداث سازه‌های متعددی از این نوع در سال‌های قبل از ۱۶۰۰ در اروپای

<sup>19</sup> Riquet

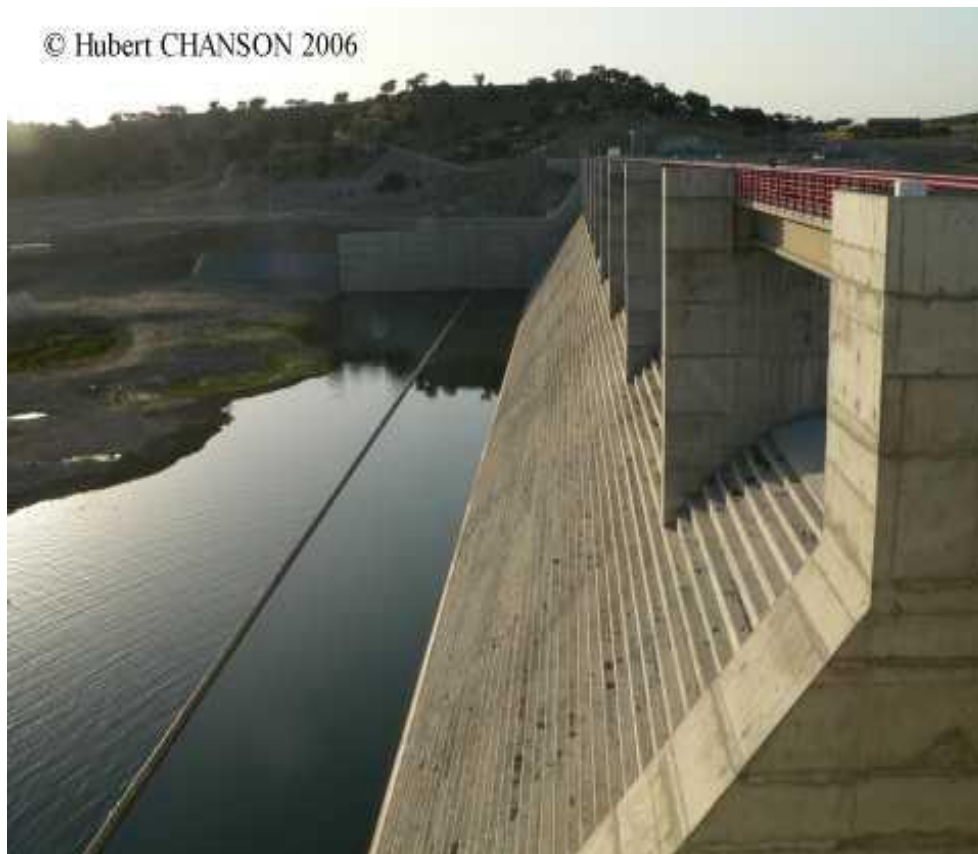


مرکزی گزارش شده‌اند. دو نمونه از این سازه‌ها یعنی سد کوبیلا و یک سد روسی چندین قرن دوام داشته‌اند. در دوره‌های پس از آن ناحیه شمال شرق آمریکا از تجربه ساکنین اروپای شمالی در ساخت سدهای الواری بهره گرفته‌است. سدهای الواری در سال‌های ۱۸۰۰ تا ۱۹۲۰ در آمریکا، استرالیا و نیوزلند معروفیت داشته‌اند (شکل ۲-۳). ارتفاع سدهای الواری بین ۳ تا ۱۰ متر بوده، ولی سدهای بزرگتری تا ارتفاع ۳۰ متر نیز با موفقیت ساخته شده‌اند [۳].



شکل (۲-۳): نمایی از یک سدپلکانی الواری در استرالیا [۸]

اگرچه اخیراً سرریزهای پله‌ای در راستای عبور مطمئن و ایمن سیلاب‌های بزرگ توسط مصالحی نظیر بتن و یا الوار ساخته می‌شوند، اما دامنه گسترده‌ای از مواد ساختمانی در طول قرن نوزدهم به کار می‌رفته‌است. در نیمه اول قرن بیستم طراحی و کاربرد این سرریزها از رونق افتاد، که یکی از دلایل آن هزینه‌های بالای نگهداری این سازه‌ها بود. اما به‌رحال در عصر جدید با توجه به کارایی بالای این سازه‌ها از جهات گوناگون که به آن اشاره شد، با گسترش روزافزون این سازه‌ها روبرو هستیم که از این‌رو ناگزیر از توجه ویژه به آن‌ها می‌باشیم، نمونه‌ای از این سرریزها در شکل ۲-۴ مشاهده می‌گردد.



شکل (۲-۴): نمایی از سد پدروگاو<sup>۲۰</sup> در پرتغال [۹]

---

<sup>20</sup> Pedrogao

## فصل سوم

مفاهیم اساسی در هیدرولیک جریان

بر روی سرریزهای پلکانی

(با مروری بر مطالعات گذشته)

## ۳-۱ مقدمه

پس از آشنایی با سرریزها و اهمیت آن‌ها در عملکرد صحیح و بدون خطر سدها و روشن شدن جایگاه سرریزهای پلکانی در این گستره، بحث در مورد هیدرولیک جریان بر روی این سازه‌ها تحت شرایط گوناگون ضروری به نظر می‌رسد. شرایط لازم برای تشکیل جریان رویه‌ای، خصوصیات هیدرولیکی این رژیم، استهلاك انرژی و میدان فشار از مواردی است که در حد مورد نیاز در این تحقیق، با مروری بر مطالعات گذشته به آن پرداخته خواهد شد.

## ۳-۲ انواع رژیم‌های جریان در سرریزهای پلکانی

با ایجاد پله بر روی سرریز و تنداب که همانند یک بستر زبر و مصنوعی عمل می‌کند، می‌توان بخش زیادی از انرژی را قبل از رسیدن جریان به پنجه سد مستهلک نمود. در سرریزهای پلکانی دو رژیم جریان مجزا به نام جریان تیغه‌ای یا ریزشی آزاد<sup>۲۱</sup> و جریان رویه‌ای یا شبه آرام<sup>۲۲</sup> قابل تشخیص است. در جریان تیغه‌ای، آب به‌طور متناوب و آزاد از پله‌ای به پله دیگر ریزش می‌کند. در رژیم جریان رویه‌ای، جریان آب به‌طور یکپارچه و پیوسته بر روی کف کاذب ناشی از لبه بیرونی پله‌ها جاری می‌شود، بدون آنکه بسته‌های هوا زیر جریان اصلی و پله‌ها محبوس شود. تعاریف فوق توسط بسیاری از پژوهشگران در این رابطه ارائه شده است [۱۰]. به‌طور کلی می‌توان گفت که جریان تیغه‌ای در دبی‌های کم و پله‌های بزرگ و جریان رویه‌ای در دبی‌های زیاد و پله‌های کوچک رخ خواهد داد. لازم به ذکر است که یک حالت بینابینی میان رژیم جریان تیغه‌ای و جریان رویه‌ای وجود دارد که رژیم جریان انتقالی<sup>۲۳</sup> نامیده می‌شود [۱۰]. در ادامه بحث به بررسی هریک از رژیم‌های مذکور پرداخته می‌شود.

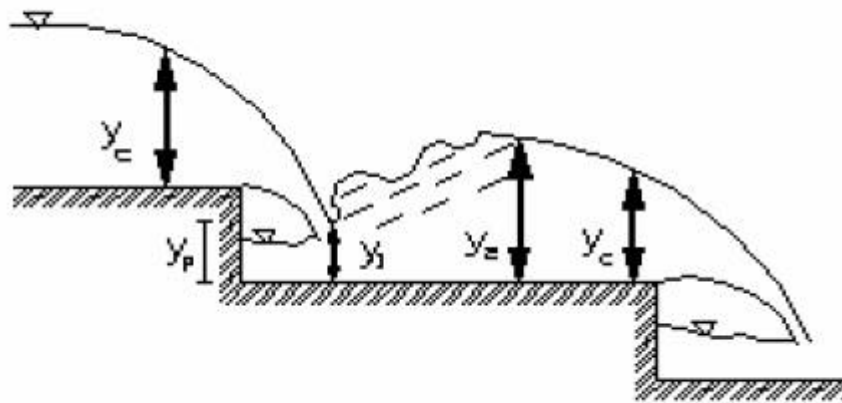
<sup>21</sup> Nappe Flow

<sup>22</sup> Skimming Flow

<sup>23</sup> Transition Flow

### ۳-۲-۱ جریان تیغه‌ای (ریزشی آزاد)

در این نوع جریان آب بصورت شیرجه‌ای از روی یک پله بر روی پله دیگر می‌ریزد. جت آبی که از روی پله بالایی جدا شده و به کف پله پایینی برخورد می‌کند، در ادامه با یک پرش هیدرولیکی کامل یا ناقص روبرو خواهد شد (شکل ۳-۱) [۷].



شکل (۳-۱): نمایش شماتیک جریان ریزشی آزاد [۷]

در این نوع جریان افت کلی انرژی به تعدادی افت جزئی روی هر پله تقسیم می‌شود. استهلاک انرژی به وسیله حرکت جت در هوا، برخورد جت به کف پله و پرش هیدرولیکی صورت می‌گیرد [۷]. در فصل مشترک هریک از جت‌های بالا و پایین حبس هوا رخ داده و مقداری هوای اضافی نیز در محل برخورد تیغه پایین جت با استخر آب حبس خواهد شد. این نوع جریان در تنداب‌هایی که دارای شیب کم و ارتفاع پله نسبتاً زیاد باشند، در حالت دبی کم رخ می‌دهد. جریان در این رژیم دارای سه قسمت عمده تیغه سقوط آزاد، استخر و حفره هوا می‌باشد. تاکنون بیشتر تحقیقات انجام گرفته بر روی سرریزهای پلکانی بر رژیم جریان رویه‌ای متمرکز بوده. اما با این حال رژیم جریان تیغه‌ای توسط محققینی چون

هورنر<sup>۲۴</sup> ۱۹۶۹، پیراس<sup>۲۵</sup> ۱۹۹۱، چانسون<sup>۲۶</sup> ۱۹۹۴، چمنی<sup>۲۷</sup> و راجاراتنام<sup>۲۸</sup> ۱۹۹۴ مورد مطالعه قرار گرفته است [۱۱].

در حالت کلی جریان ریزشی آزاد در سه دسته طبقه‌بندی می‌گردد که دو حالت اول دارای پرش هیدرولیکی و حالت سوم بدون پرش می‌باشند. این سه حالت همانطور که در شکل‌های ۲-۳ تا ۴-۳ مشاهده می‌گردد، شامل جریان ریزشی آزاد با پرش هیدرولیکی کامل که در شرایط دبی پایین رخ می‌دهد (رژیم جریان فرعی NA1)، جریان ریزشی آزاد با پرش هیدرولیکی ناقص (رژیم جریان فرعی NA2)، و جریان ریزشی آزاد بدون پرش هیدرولیکی که در دبی‌های زیاد و قبل از شروع حالت جریان شبه آرام رخ خواهد داد (رژیم جریان فرعی NA3) می‌باشند. حالت‌های اول و دوم بر روی پله‌های افقی یا مایل روبه بالا ایجاد می‌شوند. وجود شرایط بحرانی در لبه پله از مشخصه‌های این نوع جریان بوده و استهلاک انرژی تحت تاثیر سه عامل شکست جت در هوا، برخورد جت روی پله بعد و تشکیل پرش هیدرولیکی رخ می‌دهد. همانگونه که در شکل ۲-۳ مشاهده می‌شود در جریان NA1 روی پله جریان بحرانی و پس از پرش جریان زیر بحرانی می‌باشد. مطابق شکل ۳-۳ در رژیم جریان NA2 جریان روی لبه پله همچنان بحرانی و در هنگام سقوط و پیش از پرش ناقص فوق بحرانی می‌باشد.

---

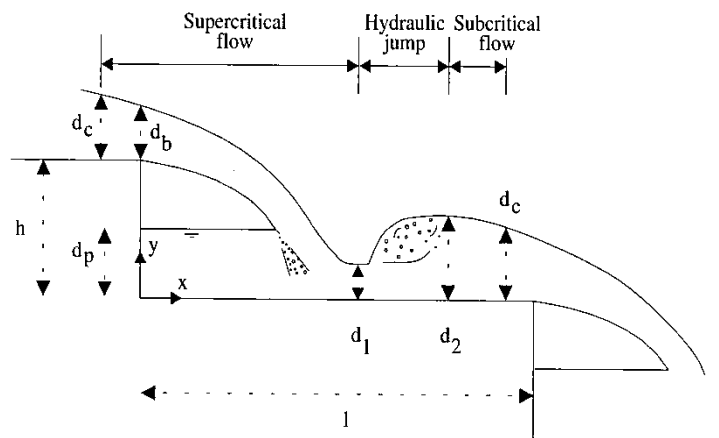
<sup>24</sup> Horner

<sup>25</sup> Peyras

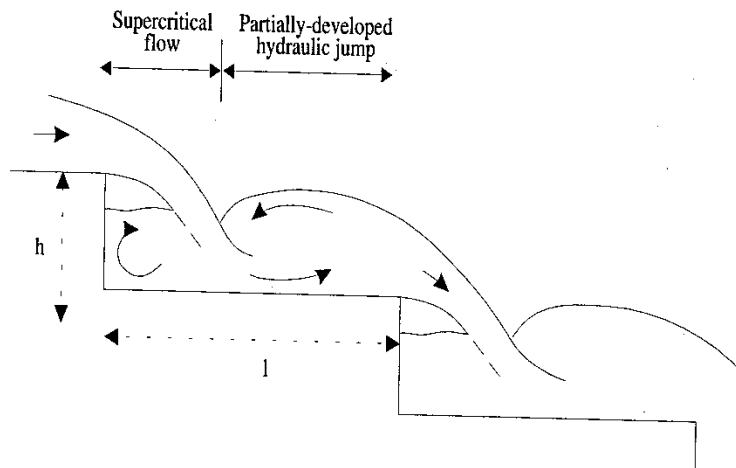
<sup>26</sup> Chanson

<sup>27</sup> Chamani

<sup>28</sup> Rajaratnam

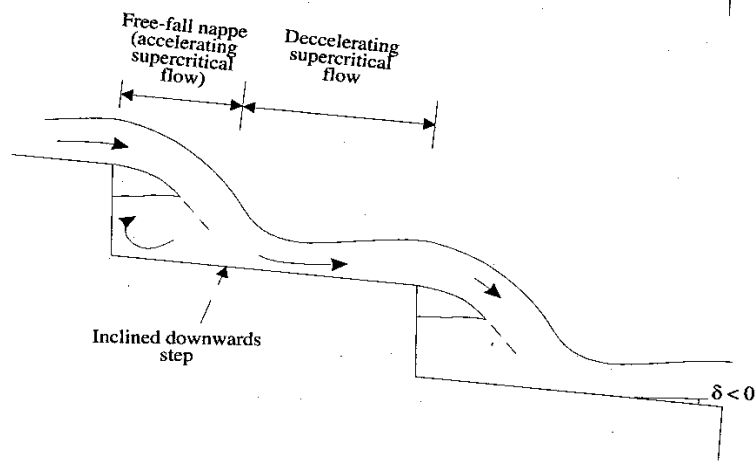


شکل (۳-۲): جریان تیغه‌ای با پرش هیدرولیکی کامل (رژیم فرعی NA1) [V]



شکل (۳-۳): جریان تیغه‌ای با پرش هیدرولیکی ناقص (رژیم فرعی NA2) [V]

در شکل ۳-۴ مشاهده می‌شود که جریان NA3 با افزایش تدریجی شدت جریان و پیش از وقوع جریان انتقالی رخ خواهد داد که معمولاً روی پله‌های پهن افقی یا پله‌های مایل روبه پایین روی می‌دهد. در این رژیم در هر حالت جریان فوق بحرانی بوده و می‌توان اثرات ناشی از ضربه‌ای بودن جریان در مدل ۳ بعدی آن قابل مشاهده می‌باشد.



شکل (۳-۴) جریان تیغه‌ای بدون پرش هیدرولیکی (رژیم فرعی NA3) [۷]

بسیاری از محققین معتقدند که استهلاک انرژی در جریان تیغه‌ای بیشتر از جریان رویه‌ای است. نتایج بررسی چانسون روی داده‌های تجربی بسیاری محققین دیگر نشان می‌دهد که بیشترین استهلاک انرژی در جریان تیغه‌ای و کمترین آن در جریان رویه‌ای حاصل می‌شود. چانسون براساس طول آبشار<sup>۲۹</sup> و همچنین طول پرش هیدرولیکی، رابطه ۳-۱ را برای تعیین ضوابط لازم به‌منظور تشکیل رژیم NA1 ارائه نموده که در آن  $l$  طول پله و  $h$  ارتفاع پله می‌باشد [۱۲].

$$\frac{d_c}{h} = 0.0916 \left( \frac{h}{l} \right)^{-1.276} \quad (۱-۳)$$

معادله فوق در محدوده  $0.2 \leq h/l \leq 0.6$  معتبر می‌باشد. نتایج تحقیقات تجربی در این رابطه نشان می‌دهد که رژیم NA1 تنها در دبی‌های کم و روی پله‌های با شیب مایل  $h/l \leq 0.5$  تشکیل می‌گردد. لازم به ذکر است که در این رژیم جریان، پس از سقوط جریان روی پله، جریان فوق بحرانی بوده و پس از آن پرش هیدرولیکی تشکیل می‌گردد. به‌طور کلی روابط ۳-۲ تا ۳-۷ برای نشان دادن ویژگی‌های این نوع جریان توصیه شده‌اند که تنها در مورد پله‌های پهن افقی معتبر می‌باشند و برای پله‌های مایل اعتباری ندارند [۷].

<sup>29</sup> Drop



$$\frac{d_c}{h} = 0.89 - 0.4 \left( \frac{h}{l} \right) \quad (2-3)$$

$$\frac{d_2}{h} = 1.66 \left( \frac{d_c}{h} \right)^{0.81} \quad (3-3)$$

$$\frac{d_p}{h} = \left( \frac{d_c}{h} \right)^{0.66} \quad (4-3)$$

$$\frac{L_d}{h} = 4.3 \left( \frac{d_c}{h} \right)^{0.81} \quad (5-3)$$

$$\frac{L_d}{h} = 0.687 \left( \frac{d_c}{h} \right)^{1.483} \quad (6-3)$$

$$tg \theta = 0.838 \left( \frac{d_c}{h} \right)^{-0.586} \quad (7-3)$$

در روابط مذکور  $d_1$  عمق جریان فوق بحرانی در پایین دست محل برخورد تیغه،  $d_2$  عمق جریان زیر بحرانی بعد از پرش هیدرولیکی،  $h$  ارتفاع پله،  $d_c$  عمق بحرانی،  $d_p$  ارتفاع آب در استخر پشت جت،  $L_d$  فاصله عمق‌های  $d_1$  و  $d_2$ ،  $d_i$  ضخامت تیغه در محل برخورد و  $\theta$  زاویه تیغه با سطح افق در محل برخورد می‌باشند. برای محاسبه طول پرش هیدرولیکی روی پله می‌توان از رابطه زیر استفاده نمود [7]:

$$\frac{L_r}{d_1} = 8 \left[ \left( \frac{d_c}{d_1} \right)^{\frac{3}{2}} - 1.5 \right] \quad (8-3)$$

پیراس و همکارانش در سال ۱۹۹۲ با انجام آزمایش‌هایی نشان دادند که این معادلات را با دقت قابل قبولی می‌توان برای جریان NA2 نیز به کار برد [۱۳]. با توجه به اینکه رژیم جریان NA3 با استفاده از روش‌های تحلیلی قابل بررسی نمی‌باشد، در این خصوص می‌بایست به نتایج آزمایشگاهی اکتفا نمود. از جمله می‌توان به آزمایشات هورنر در سال ۱۹۶۹ در دانشگاه کوئینزلند اشاره نمود که بر روی سرریزهای باشیب  $3/4$  درجه و طول ۳۴ متر و در محدوده اعداد فرود ۳ تا ۱۰ انجام شده است. برای تعیین مسیر پرتاب تیغه در این رژیم می‌توان از روابط ۳-۹ تا ۳-۱۵ استفاده نمود [۷].

$$x = v_h t \quad (9-3)$$

$$y = h + \frac{d_b}{2} - \frac{1}{2} g t^2 \quad (10-3)$$

$$\frac{L_d}{h} = \left(\frac{d_c}{h}\right)^{\frac{3}{2}} \sqrt{\frac{h}{d_b}} \times \sqrt{1 + 2 \frac{h}{d_b}} \quad (11-3)$$

$$\frac{d_i}{d_c} = \left[ \left(\frac{d_c}{d_b}\right)^2 + 2 \frac{h + \frac{d_b}{2} - d_p}{d_c} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (12-3)$$

$$\frac{v_i}{v_c} = \sqrt{\left[ \left(\frac{d_c}{d_b}\right)^2 + 2 \frac{h + \frac{d_b}{2} - d_p}{d_c} \right]} \quad (13-3)$$

$$tg \alpha = \sqrt{2} \sqrt{\frac{d_b}{d_c}} \sqrt{\frac{h + \frac{d_b}{2} - d_p}{d_c}} \quad (14-3)$$

$$\frac{1}{2} Q_w g d_p^2 - \frac{1}{2} Q_w d g d_1^2 = Q_w q_w (v_1 - v_i \cos \theta) \quad (15-3)$$

بسیاری از پارامترهای به کار رفته در این روابط در قبل ذکر شد. پارامترهای دیگر شامل  $v_h$  سرعت جریان در حاشیه پله،  $t$  زمان و  $v_i$  سرعت جریان در محل برخورد می‌باشند. معادله مدنظر، اندازه حرکت در امتداد سطح پله بوده که با صرف نظر کردن از نیروهای برشی سطح پله و فرض عدم گسیختگی تیغه جت حاصل شده است. چنانچه سرعت ورودی و خروجی به حجم کنترل برابر باشد خواهیم داشت:

$$\frac{d_p}{d} = \sqrt{\left[ 1 + 2 \frac{v_i}{g} (1 - \cos \theta) \right]} \quad (16-3)$$

$$\frac{d}{d_c} = \frac{2Fr_b^{-\frac{2}{3}}}{1 + \frac{2}{Fr_b^2 + \sqrt{1 + \frac{2}{Fr_b^2} \left(1 + \frac{h}{d_c} Fr_b^{\frac{2}{3}}\right)}}$$

که  $Fr_b$  عدد فرود در نقطه‌ای است که دقیقاً در بالای حاشیه سقوط قرار دارد [۷].

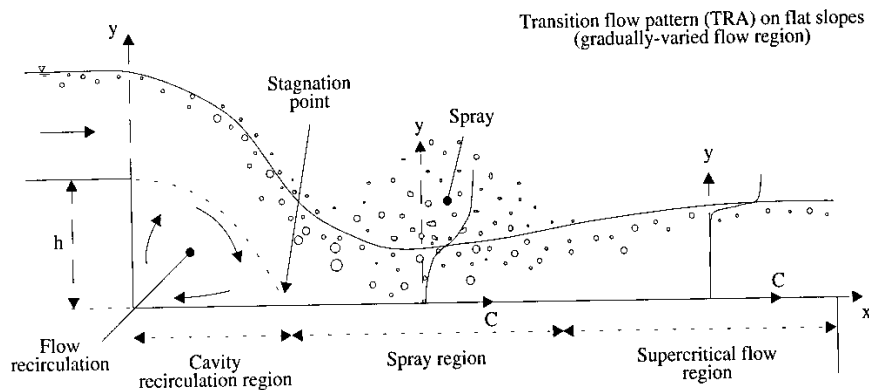
### ۲-۲-۳ رژیم جریان انتقالی

همانطور که قبلاً ذکر شد بین حد بالای جریان تیغه‌ای و حد پایین جریان رویه‌ای محدوده‌ای بینابینی موجود است، که رژیم جریان انتقالی نامیده می‌شود. جریان تبدیلی یا انتقالی با ایجاد یک استخر با حوضچه غوطه‌ور و پاشش زیاد آب و انحراف سریع آن در پایین دست نقطه آرامش همراه است (شکل ۳-۵). خصوصیات الگوی جریان انتقالی بر روی هر پله و نیز از هر پله به پله بعدی تغییرات عمده‌ای از خود نشان می‌دهد. لذا به نظر می‌رسد که جریان دارای نامنظمی بسیار بوده و از لحاظ ظاهری نیز شبیه به جریان‌های منسجم رویه‌ای نمی‌باشد [۷]. اوتسو و یاسودا<sup>۳۰</sup> در ۱۹۹۷ اولین کسانی بودند که این رژیم جریان را شناسایی نمودند. این نوع جریان تحت تاثیر نوسانات شدید هیدرودینامیکی قرار داشته و باید تا حد امکان از آن اجتناب نمود. خصوصیات این نوع جریان تاکنون بر اساس مبانی تئوریک قابل حل نبوده و تنها می‌توان به نتایج تحقیقاتی محدود که بر روی آن انجام شده رجوع نمود، که از آن جمله می‌توان به آزمایشات انجام شده در دانشگاه کوئینزلند اشاره نمود [۳].

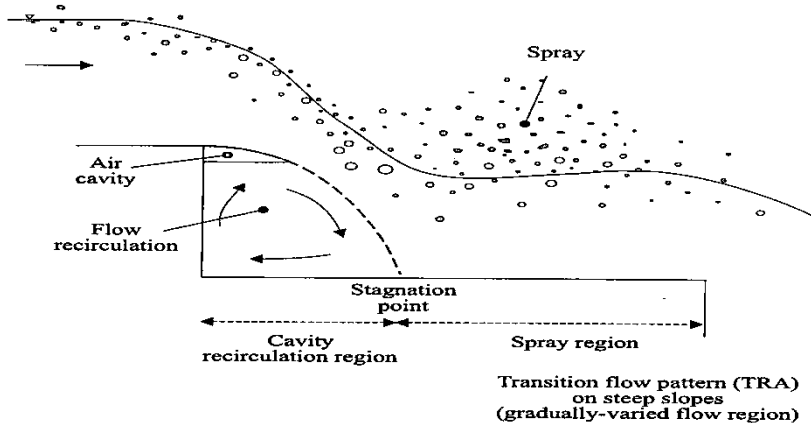
در آزمایش اول از سرریزی با شیب ملایم ۳/۴ درجه، طول ۲۳ متر و عرض ۰/۵ متر استفاده شده بود. دبی واحد عرض ۰/۸ مترمکعب بر ثانیه و ارتفاع پله‌ها ۰/۷۱ متر در نظر گرفته شد (شکل ۳-۵). نتایج حاصل از آزمایش نشان داد که تا پله پنجم جریان بالادست از نوع متغیر سریع بوده و با نامنظمی بسیار و تغییر خصوصیات جریان از پله‌ای به پله دیگر همراه است. از پله پنجم به بعد جریان به صورت متغیر تدریجی گشته و خصوصیات جریان روی پله‌ها تقریباً مشابه می‌گردد، ولی این جریان به هیچ-

<sup>30</sup> Ohtso, Yasuda

یک از رژیم‌های تیغه‌ای و رویه‌ای شباهتی ندارد (شکل ۳-۶). همچنین بررسی جریان پایین‌دست نیز نشان داد که جریان روی هر کدام از پله‌ها شامل استخر آب همراه با جریان چرخشی، افشاندگی زیاد و انحراف آب در پایین‌دست نقطه سکون می‌باشد [۳].



شکل (۳-۵): رژیم جریان انتقالی، الگوی جریان در ناحیه متغیر تدریجی در شوت ملایم، ۳/۴ درجه [۳]



شکل (۳-۶): رژیم جریان انتقالی، الگوی جریان در ناحیه متغیر تدریجی در شوت تند، ۲۱/۸ درجه [۳]

در آزمایش دوم از سرریزی با شیب ۲۱/۸ درجه، طول ۲۷ متر و عرض ۱ متر استفاده گردید. دبی واحد عرض ۰/۱ تا ۰/۴۶ مترمکعب بر ثانیه و ارتفاع پله‌ها ۰/۱ متر در نظر گرفته شده بود (شکل ۳-۶). مشاهده گردید که در گوشه پله‌ها (دقیقاً بالای ناحیه شروع حبس هوا) تا حدودی هوادهی قابل مشاهده است. جریان در آن ناحیه آرام، سطح آزاد مواج بوده و در پایین‌دست افشاندگی زیادی ایجاد

گشته است. بررسی جریان پایین دست نیز نشان داد که جریان در این ناحیه تحت تاثیر برخورد تیغه سقوط و نقطه سکون و همچنین افشانندگی در پایین دست می باشد. با توجه به کوتاهی ارتفاع پله ها در این آزمایش، ناحیه جریان فوق بحرانی مشاهده نشد و در محدوده  $0.6 \leq h/1 \leq 0.8$  تا  $0.65$  بعضاً انحراف دیده می شود.

در هر حال مشاهدات عینی جریان انتقالی نمی تواند شکل ظاهری سطح آزاد شبه آرام جریان رویه ای و توالی ریزش های آزاد مورد مشاهده در جریان تیغه ای را مشخص نماید. از خصوصیات بارز این نوع جریان ایستایی یا توقف روی سطح هر پله افقی همراه با پاشش در پایین دست است که روی هر پله و پایین دست نقطه آغاز هوادهی<sup>۳۱</sup> مشاهده شده اند [۱۴].

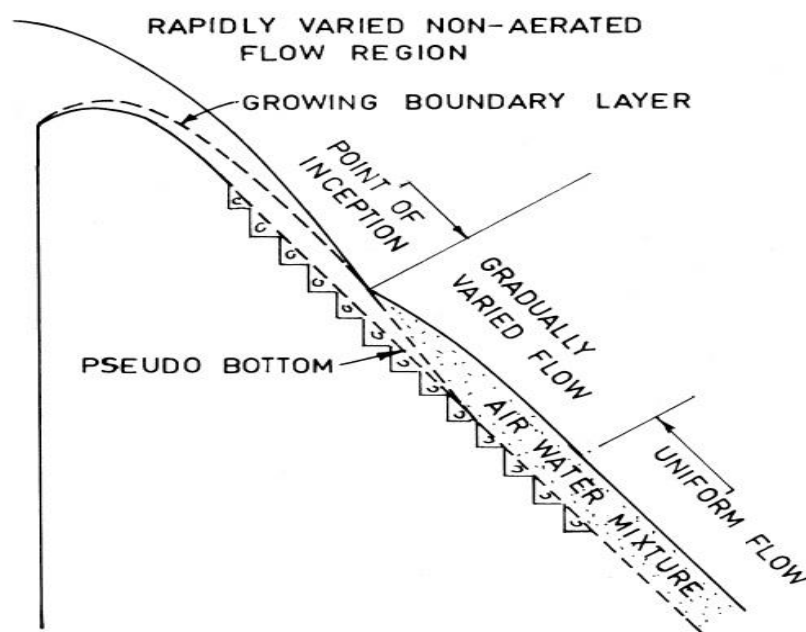
### ۳-۲-۳ رژیم جریان رویه ای

در رژیم جریان رویه ای آب به صورت چسبیده روی سطح پله به سمت پایین جریان یافته، لبه خارجی پله ها نوعی کف کاذب روی خود به وجود آورده که جریان از روی آن عبور می کند. در زیر این کف کاذب گرداب هایی توسعه یافته و جریان چرخشی محبوس شده بین پله و جریان رویه ای همچون بالشتکی برای جریان رویه ای عمل می کند. جریان های گردابی درون پله از انتقال مومنوم و تنش برشی بوجود آمده و عامل اصلی استهلاک انرژی در جریان رویه ای می باشد. در واقع در این حالت، استهلاک انرژی به وسیله انتقال مومنوم از جریان شبه آرام چسبنده به جریان چرخشی درون هر پله صورت می گیرد. برای ناظری که از کنار این واقعه را می بینید، جریان دارای ظاهری شبیه به جریان- های خود هواده در قسمت پایین دست سازه شوت با کف صاف است. سطح آزاد در بالادست صاف و شیشه ای است. بر روی سرریز بعد از جریان متغیر تدریجی، جریان به تعادل رسیده و حداکثر ضخامت

---

<sup>31</sup> Inception Point

لایه مرزی<sup>۳۲</sup> را شاهد خواهیم بود و لایه مرزی جریان تنها با لبه پله‌ها و سطح بالایی جریان‌های گردابی درون پله‌ای در تماس است (شکل ۷-۳) [۷].

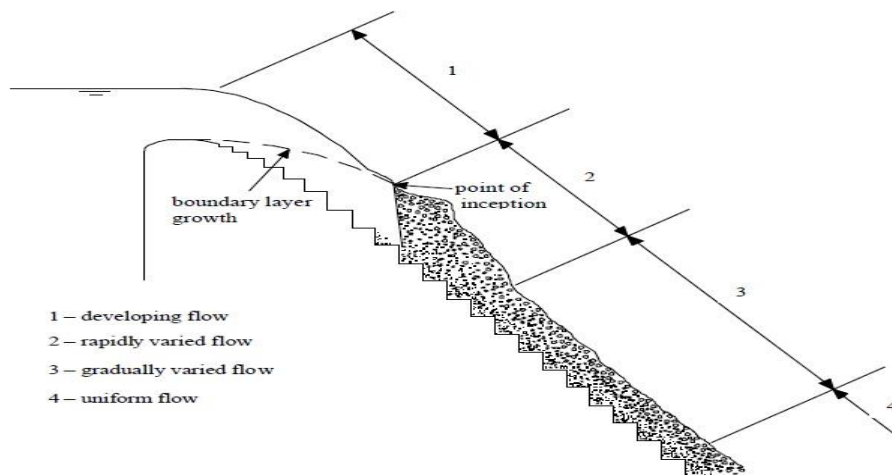


شکل (۷-۳): طرح شماتیک لایه مرزی و جریان گردابه‌ای درون پله‌ای در جریان رویه‌ای [۷]

پس از طی فاصله قابل توجه از تاج به ناحیه جریان یکنواخت می‌رسیم، که جریان در این ناحیه کاملاً توسعه یافته شده و هوادهی جریان به‌طور محسوس صورت می‌گیرد (شکل ۸-۳). تنش برشی در جریان رویه‌ای عمدتاً در لبه‌ها متمرکز می‌شود. بنابراین استفاده از گوشه‌های مدور و پخ می‌تواند به کاهش تنش و آسیب کمتر در لبه پله‌ها کمک کند. بیشینه فشار روی کف پله‌ها و نزدیکی لبه و کمینه فشار روی سطح عمود و نزدیک لبه اتفاق می‌افتد. نتایج بررسی‌های آزمایشگاهی نشان می‌دهد که تشکیل لایه مرزی بلافاصله پس از تاج سرریز بوده و به تدریج و با حرکت به سمت پایین دست بر ضخامت لایه افزوده شده تا جاییکه کل عمق جریان را در برمی‌گیرد. در این مقطع هوادهی جریان به‌طور محسوس شروع شده که محل شروع آن تحت عنوان نقطه شروع هوادهی نامیده می‌شود

<sup>32</sup> Boundray Layer

(شکل ۳-۸). دانستن مکان نقطه شروع هواگیری از این لحاظ مهم است که طول منطقه بدون هوا و در نتیجه در معرض خطر کاویتاسیون که در آن باید هوادهی به صورت مصنوعی انجام شود، مشخص می‌گردد [۱۵]. از این مقطع به بعد جریان کاملاً توسعه یافته شده و در هر عمق ثابت در دبی معین، توزیع غلظت هوا و سرعت در امتداد شوت تغییر نمی‌کند.



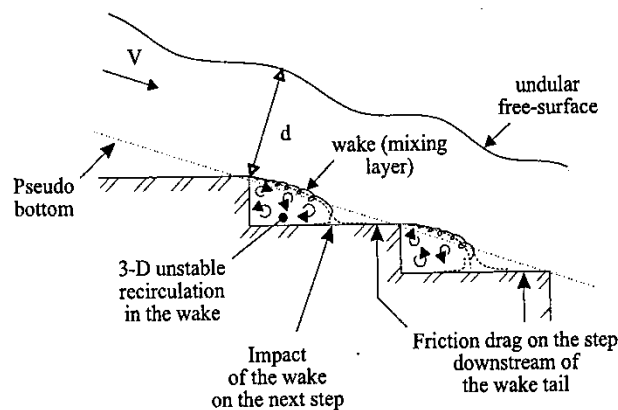
شکل (۳-۸): نواحی جریان رویه‌ای بر روی شوت پله‌ای [۷]

چانسون در آزمایشات خود نتیجه گرفت که نقطه شروع جریان یکنواخت تابعی از ارتفاع پله، دبی ویژه و شیب سرریز می‌باشد [۱۶].

آزمایشات نشان می‌دهد که جریان‌های چرخشی متفاوتی با توجه به شیب کانال در زیر جریان رویه‌ای پدید می‌آید. چنانچه شیب کانال کمتر از ۱۵ تا ۲۵ درجه (شیب ملایم) باشد، حفره چرخشی مستطیل و نازک است. این حالت باعث عدم توسعه یافتن امواج چرخشی بزرگ پایدار در بین لبه پله-ها شده و گرداب‌ها قادر به پرکردن کامل حفره نیستند. سطح آزاد موج بوده و با کف کاذب موازی نمی‌باشد. گرداب‌های تولید شده همراه با هر لایه اختلاطی با پله بعدی از بین رفته و ممکن است با الگوی به وجود آمده در پله بعدی نیز تداخل یابند [۷]. در این حالت پارامترهای موثر جریان را می-

توان فاصله بین لبه دو پله مجاور و نیز عمق جریان دانست. در همین راستا می توان سه تقسیم بندی کلی را در این حالت در نظر گرفت:

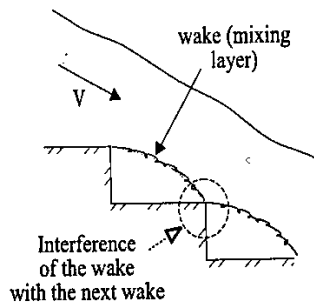
شیب های بسیار ملایم ( $\alpha$  کوچکتر از ۱۲ تا ۱۵ درجه): در این حالت جریان تحت تاثیر برخورد جریان اختلاطی روی پله بعدی، چرخش سه بعدی ناپایدار در جریان ضعیف و مقداری کشش اصطکاکی پوسته ای روی پایین دست محل برخورد قرار می گیرد. این نوع جریان را رژیم فرعی تداخل پله - گردابه (SK1) می نامند (شکل ۳-۹).



شکل (۳-۹): جریان رویه ای، رژیم جریان فرعی SK1 (تداخل پله - گردابه) [۷]

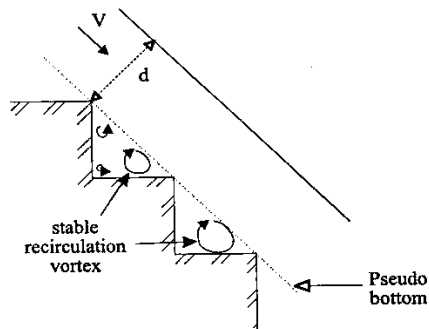
شیب های ملایم ( $\alpha$  بین ۱۵ تا ۲۵ درجه): در این حالت جریان ضعیف با لایه اختلاطی بعدی تداخل پیدا می کند و مولفه کوچکی از کشش اصطکاکی پوسته ای وارد عمل می شود. این نوع جریان را رژیم فرعی تداخل گردابه - گردابه (SK2) می نامند (شکل ۳-۱۰).





شکل (۳-۱۰): جریان رویه‌ای، رژیم جریان فرعی SK2 (تداخل گردابه - گردابه) [۷]

شیب‌های تند ( $\alpha$  بزرگتر از ۲۵ تا ۳۰ درجه): در این حالت چرخش پایدار در حفره‌های بین لبه پله‌های مجاور مشاهده می‌شود. این نوع جریان را رژیم فرعی چرخش پایدار (SK3) می‌نامند (شکل ۳-۱۱).



شکل (۳-۱۱): جریان رویه‌ای، رژیم جریان فرعی SK3 (چرخش پایدار) [۷]

### ۳-۳ تعیین رژیم‌های جریان

تاکنون پژوهشگران زیادی برای تعیین رابطه‌ای به منظور تعیین رژیم جریان به مطالعه پرداخته‌اند. اکثر قریب به اتفاق آن‌ها در این ایده هم نظر هستند که دبی و شکل هندسی پله (ابعاد و شیب سرریز) از عوامل اساسی در تعیین نوع رژیم جریان می‌باشند. بر همین اساس تاکنون روابط مختلفی برای بررسی شرایط ایجاد انواع جریان ارائه شده است. از جمله در خصوص شروع جریان رویه‌ای می‌توان به روابط زیر اشاره نمود:

چمنی و راجاراتنام [۱۷]:

$$\frac{d_c}{h} = 0.405 \left( \frac{h}{l} \right)^{-0.62} \quad (۱۸-۳)$$

اوتسو و یاسودا [۱۸]:

$$\frac{d_c}{l} = \frac{\left[ 1.4 - \frac{h}{l} \right]^{0.26}}{1.4} \quad (۱۹-۳)$$

چانسون [۱۳]:

$$\frac{d_c}{h} = 1.057 - 0.465 \frac{h}{l} \quad (۲۰-۳)$$

چمنی و راجاراتنام [۱۷]:

$$\frac{d_c}{l} = \sqrt{0.89 \left[ \left( \frac{d_c}{h} \right)^{-1} - \left( \frac{d_c}{h} \right)^{-0.34} \right]} - 1 \quad (۲۱-۳)$$

اوتسو و یاسودا [۱۷]:

$$\frac{d_c}{h} = 0.862 \left( \frac{h}{l} \right)^{-0.165} \quad (۲۲-۳)$$

بوس و هگر<sup>۳۳</sup> [۱۷]:

$$\frac{d_c}{h} = 0.91 - 0.14 \frac{h}{l} \quad (23-3)$$

براساس بررسی‌های به‌عمل آمده اختلاف قابل توجهی بین معادلات پیشنهادی محققان وجود دارد که مبین وابستگی آن‌ها به نتایج آزمایشگاهی بوده که بر مبنای محدوده متغیرهای مورد مطالعه حاصل گردیده است.

همچنین چیناراسری در سال ۲۰۰۲ روابط زیر را برای تشخیص جریان رویه‌ای پیشنهاد نمود [۱۹]:

حد پایین جریان رویه‌ای:

$$\frac{d_c}{h} = 0.8 \left( \frac{h}{l} \right)^{-0.22} \quad (24-3)$$

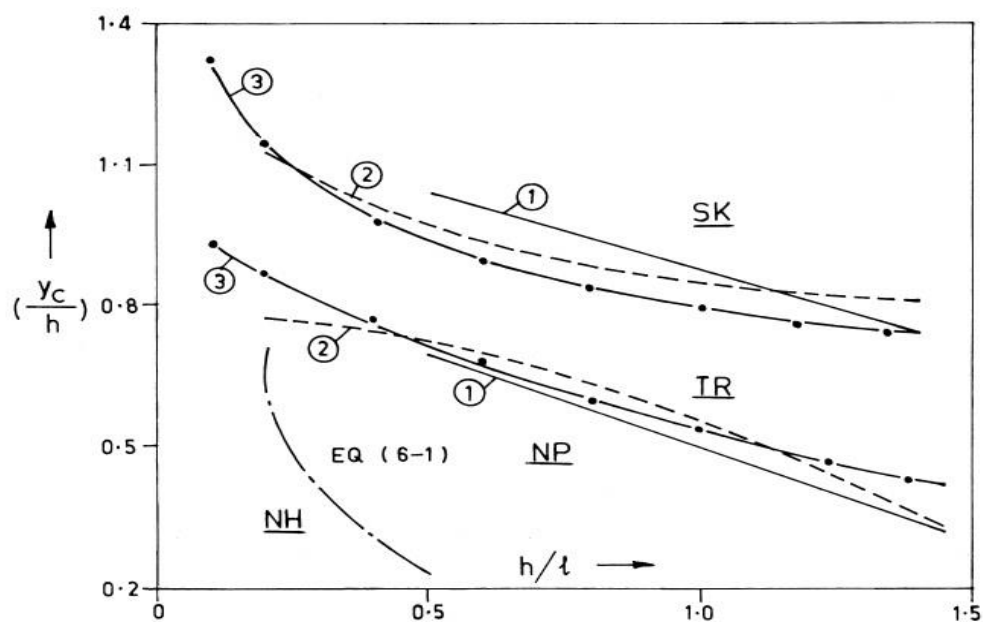
حد بالای جریان تیغه‌ای:

$$\frac{d_c}{h} = 0.98 \left( \frac{h}{l} \right)^{0.55} \quad (25-3)$$

نتایج برخی از محققان مقایسه و در شکل ۳-۱۲ ارائه شده است.

---

<sup>33</sup> Boes, Hager



شکل (۳-۱۲): نمودار مقایسه‌ای میان برخی از روابط ارائه شده برای تعیین نوع جریان [۱۹]

در شکل فوق نمودار (۱) مربوط به رابطه ارائه شده توسط چانسون، نمودار (۲) مربوط به رابطه یاسودا و نمودار (۳) مربوط به روابط چیناراسری می‌باشد.

### ۳-۴ تعیین مکان شروع جریان یکنواخت

جریان روی سرریزپلکانی پس از طی مسافتی به شرایط جریان یکنواخت رسیده و بعد از این نقطه کلیه خواص جریان شامل عمق، سرعت و غلظت هوا ثابت می‌ماند. پس از یکنواخت شدن جریان، میزان افت انرژی برابر با میزان تغییر ارتفاع بوده و لذا تعیین این نقطه برای تعیین استهلاک انرژی روی سرریز حائز اهمیت می‌باشد. در تعیین نقطه شروع جریان یکنواخت تحقیقات زیادی به عمل آمده است. که به قسمتی از آن‌ها اشاره می‌گردد.

رابطه کریستودولو، در سرریزهای پلکانی با زاویه شیب  $25 \leq \alpha \leq 55$  که در آن  $L_u$  فاصله از آستانه سرریز تا نقطه شروع جریان یکنواخت می‌باشد [۲۰].

$$L_u = \frac{8.6q_w^{0.713}}{K_s^{0.685}(\sin \alpha)^{0.277}} \quad (26-3)$$

رابطه بوس و مینور [۲۱]:

- برای سرریز با شیب ۳۰ درجه

$$\frac{L_u}{h_c} = \frac{15}{\sin \alpha} \quad (27-3)$$

- برای سرریز با شیب ۵۰ درجه

$$\frac{L_u}{h_c} = \frac{35}{\sin \alpha} \quad (28-3)$$

که در این روابط  $q_w$  دبی در واحد عرض جریان و  $K_s$  ارتفاع زبری پله و برابر  $\cos \alpha$  .  $s$  بوده که  $s$  ارتفاع پله و  $\alpha$  شیب سرریز می باشد.

رابطه بوس و هگر [۱۰]:

$$\frac{L_u}{h_c} = 25.52 \left[ 1 - 0.055(\sin \alpha)^{-1/3} \right] \times (\sin \alpha)^{-1/3} \frac{15}{\sin \alpha} \quad (29-3)$$

برای تعیین فاصله قائم لازم نسبت به تاج برای رسیدن به جریان یکنواخت،  $H_{dam,u}$  می توان از روابط

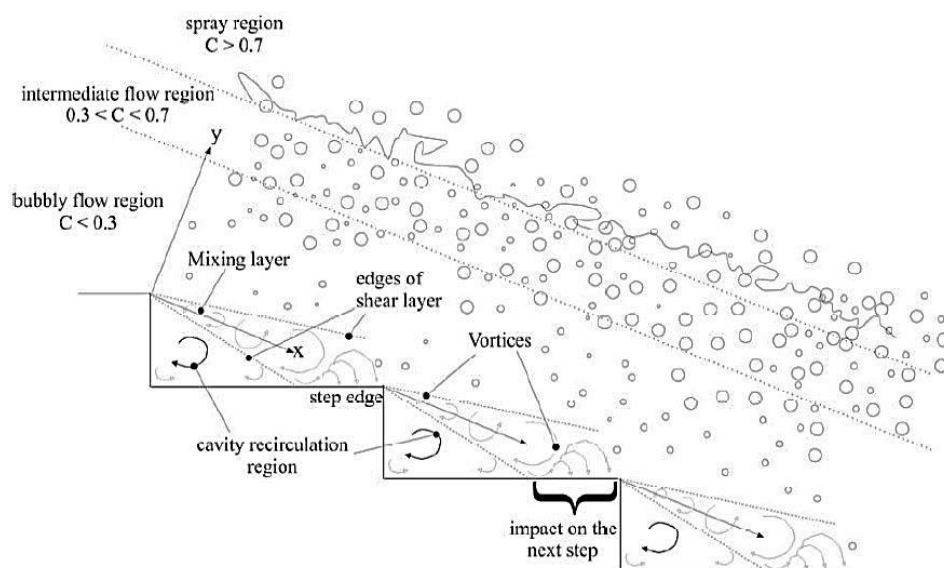
زیر استفاده نمود [۱۰].

$$\frac{H_{dam,u}}{h_c} = \left[ 1.18 - 0.3 \left( \frac{h_{w,u}}{h_c} \right) \right] \left( \frac{h_c}{h_{w,u}} \right)^2 \quad (30-3)$$

$$\frac{H_{dam,u}}{h_c} = 25.52 \left[ 1 - 0.055(\sin \alpha)^{-1/3} \right] (\sin \alpha)^{2/3} \quad (31-3)$$

### ۳-۵ تقسیم‌بندی نواحی جریان بر روی سرریز پلکانی

طبق گزارش چانسون (۲۰۰۱) هر مقطع جریان روی سرریز شامل سه قسمت می‌باشد که در شکل (۳-۱۳) نشان داده شده است [۲۲]. این نواحی شامل ناحیه جریان حبابی<sup>۳۴</sup> با غلظت هوای  $C < 30\%$  (ناحیه‌ای که با حباب‌های هوا احاطه شده)، ناحیه جریان پاششی<sup>۳۵</sup> با  $C > 70\%$  (ناحیه‌ای که در آن حباب‌های هوا با قطرات آب احاطه شده) و ناحیه بین این دو قسمت با مشخصه  $30\% \leq C \leq 70\%$  می‌باشند.



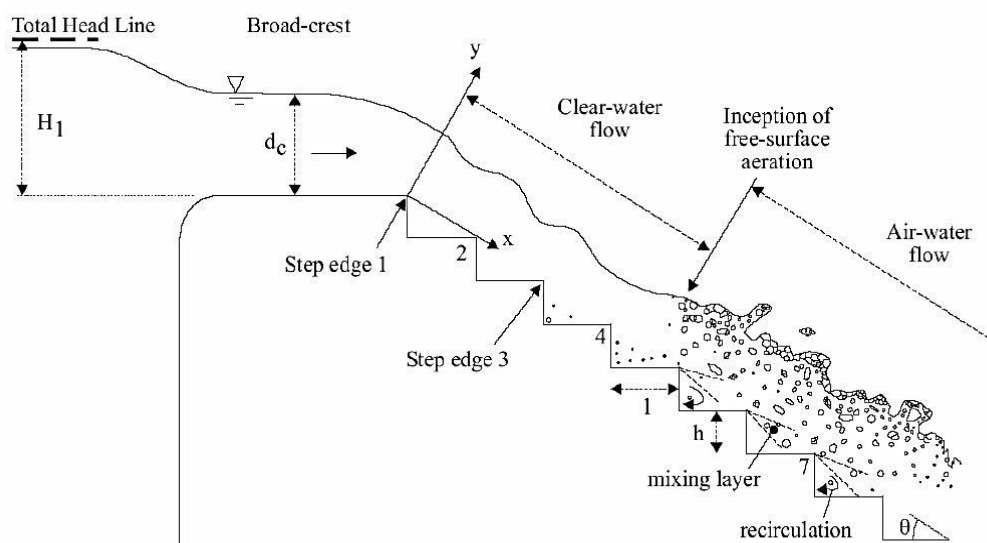
شکل (۳-۱۳): مقاطع دارای درصد متفاوت از غلظت هوا بر روی سرریزهای پلکانی [۲۲]

اگر طول شیب پلکانی به اندازه کافی زیاد باشد، تعادل بین میزان پراکنش انرژی و جاذبه بوجود خواهد آمد. در این ناحیه جریان هوادار کاملاً توسعه یافته و میزان هوای منتقل شده توسط جریان تقریباً بیشینه است. در واقع در این ناحیه جریان به صورت شبه‌یکنواخت می‌باشد، زیرا غلظت هوا، سرعت و عمق جریان، از یک پله تا پله بعد که به فاصله ثابت  $x_s$  برابر با  $h/\sin\alpha$  (ارتفاع پله و  $\alpha$  شیب سرریز

<sup>34</sup> bubbly flow

<sup>35</sup> spray flow

می‌باشند) از آن قرار دارد، ثابت می‌ماند. در جریان ریزشی ورود هوا در نزدیکی محل برخورد جت ریزشی در پله افقی و پرش هیدرولیکی رخ می‌دهد. هوادهی قابل توجهی نیز در پایین دست محل برخورد جت ریزشی و پایین دست محل پرش رخ داده، ولی در کل هوادهی خالص جریان کم و این اعتقاد وجود دارد که تاثیر ورود هوا بر روی جریان ریزشی قابل صرف نظر می‌باشد [۱۸]. شکل ۳-۱۴ نواحی مختلف جریان در طول سرریز پلکانی را نشان می‌دهد.



شکل (۳-۱۴): نواحی مختلف جریان آب و هوا بر روی سرریزهای پلکانی [۱۸]

در پایین دست نقطه شروع هواگیری، هوا از طریق سطح آزاد وارد جریان متلاطم شده و سپس به تدریج به همراه جریان آب منتقل شده و به تدریج هوای بیشتری وارد جریان می‌شود که متوسط آن از حدود ۳۰٪ تا ۶۰٪ بسته به زاویه شوت و دبی متغیر خواهد بود. اگر از تاثیر تراکم پذیری جریان صرف نظر شود، جریان می‌تواند به عنوان یک سیال با چگالی متوسط  $\rho_m$  بررسی شود، لذا خواهیم داشت [۲۳ و ۲۴]:

$$\rho_m(x,t) = \rho_w(1-C) + \rho_a C \cong \rho_w(1-C) \quad (۳-۳۲)$$

که در آن  $\rho_a$  و  $\rho_w$  به ترتیب معرف چگالی آب و هوا است و  $C$  نیز غلظت متوسط هوا می باشد که از رابطه زیر قابل محاسبه است [۲۳ و ۲۴]:

$$C = \frac{Q_a}{(Q_a + Q_w)} \quad (33-3)$$

در رابطه فوق  $Q_a$  و  $Q_w$ ، به ترتیب دبی هوا و دبی آب می باشند.

### ۳-۶ استهلاک انرژی در سرریزهای پلکانی

مقدار انرژی باقیمانده در پنجه سرریز برای طراحی مستهلک کننده انرژی در پایین دست حائز اهمیت است. بار پسمانده  $H_{res}$  در انتهای پایین دست شوت می تواند توسط رابطه زیر بیان شود [۷]:

$$H_{res} = h_w \cos \phi + \alpha \frac{q_w^2}{2gh_w^2} \quad (34-3)$$

که در آن  $\alpha$  ضریب اصلاح انرژی،  $\phi$  شیب سرریز و  $h_w$  عمق آب خالص می باشد. افت بارکل ( $\Delta H = H_{max} - H_{res}$ ) برای سرریزی که جریان در انتهای آن به صورت یکنواخت است، به صورت زیر بیان می گردد [۷]:

▪ شوت بدون دریچه

$$\frac{\Delta H}{H_{max}} = 1 - \frac{\left(\frac{f_b}{8\sin \phi}\right)^{1/3} \cos \phi + \frac{1}{2} \left(\frac{f_b}{8\sin \phi}\right)^{-2/3}}{\frac{3}{2} + \frac{H_d}{d_c}} \quad (35-3)$$

▪ شوت دریچه دار

$$\frac{\Delta H}{H_{max}} = 1 - \frac{\left(\frac{f_b}{8\sin \phi}\right)^{1/3} \cos \phi + \frac{1}{2} \left(\frac{f_b}{8\sin \phi}\right)^{-2/3}}{\frac{H_d + H_0}{d_c}} \quad (36-3)$$



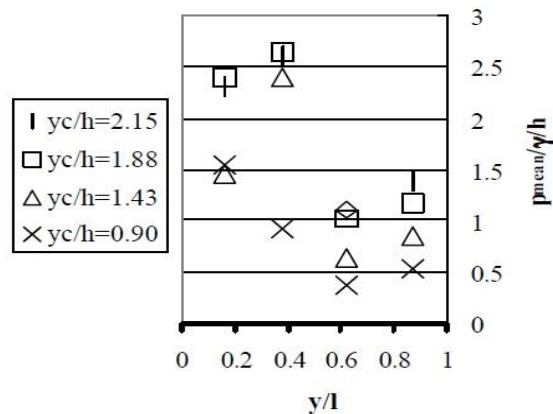
در روابط بالا  $H_{max}$  حداکثر بار موجود،  $f_b$  فاکتور اصطکاک جریان هوا - آب،  $H_d$  بار تاج سد بالای پنجه پایین دست و  $H_0$  ارتفاع سطح آزاد مخزن در بالای تاج شوت می‌باشند. هدکل  $H_{max}$  یا هد موجود در ابتدای سرریز برای کانال بدون دریچه از رابطه  $H_{max} = H_d + 1.5 h_c$  و برای شوت دریچه‌دار از رابطه  $H_{max} = H_d + H_0$  محاسبه می‌گردد. در نتیجه میزان افت انرژی معادل اختلاف هدکل و هد-باقیمانده در پنجه سرریز از رابطه  $\Delta E = H_{max} - H_{res}$  محاسبه می‌گردد. چانسون استهلاک انرژی شوت بدون دریچه برای یک شیب ۵۲ درجه را با دو مقدار فاکتور اصطکاک ۰/۳ و ۰/۲ محاسبه نموده و مقاومت متوسط جریان را به ترتیب روی سرریزهای صاف و پله‌ای بدست آورده است. نتایج بدست آمده با داده‌های تجربی مقایسه و معلوم شد استهلاک انرژی برای دبی و ارتفاع یکسان در شوت‌های پله‌ای بیشتر است [۱۳].

### ۳-۷ میدان فشار در سرریزهای پلکانی

اکثر تحقیقات انجام شده روی سرریزهای پلکانی بر پراکنش انرژی و تعیین رژیم جریان معطوف بوده است. در زمینه بررسی میدان فشار در سرریزهای پلکانی، مطالعات اندکی صورت گرفته که می‌توان به مواردی اشاره نمود. فراتینو و آمادر<sup>۳۶</sup> مطالعاتی در خصوص بررسی میدان فشار پس از نقطه شروع هوادهی و تکمیل لایه مرزی و تاثیر روند هوادهی جریان بر میدان فشار در سرریزهای پلکانی انجام دادند [۲۵]. اوتسو و یاسودا نیز در ۱۹۹۷ تحقیقاتی در همین خصوص انجام داده‌اند [۲۶]. اکثر قریب باتفاق این محققان بر این عقیده بودند که در بالادست ناحیه جریان یکنواخت مقادیر فشار به صورت قابل توجهی بیشتر از مقادیر فشار در قسمت‌های پایین دست نقطه شروع جریان یکنواخت بوده و همچنین بیشینه و کمینه مقادیر فشار در این محدوده اتفاق می‌افتد. این مطلب از آنجا حائز اهمیت بود که در واقع پتانسیل ایجاد خرابی در سیستم سازه‌ای به دلیل وقوع نوسانات زیاد در مقادیر نیروی هیدرودینامیکی وارده در ناحیه بالادست بیش از ناحیه پایین دست بوده و می‌بایست به دقت کنترل

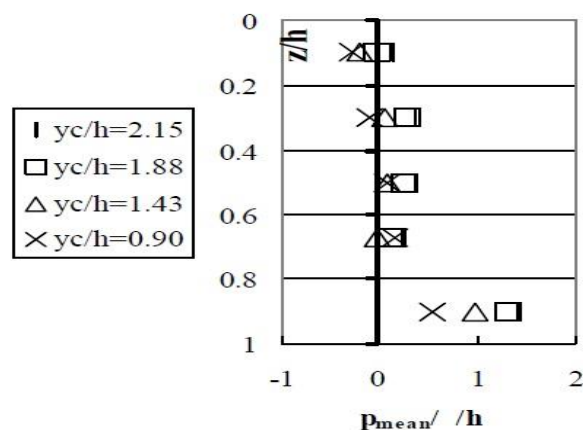
<sup>36</sup> Fratino, Amador

گردد. آماد و همکاران در ۲۰۰۹ تحقیقی بر روی سرریزهای پلکانی با شیب تند (۵۱/۳ درجه) انجام داده و توزیع فشار در وجوه قائم و افقی پله‌ها را بررسی کردند. نتایج نشان داد که کمینه فشار در وجه افقی پله در  $0.6 \leq y/l \leq 0.8$  و بیشینه آن نیز در نزدیکی لبه خارجی پله رخ می‌دهد (شکل ۳-۱۵).



شکل (۳-۱۵): نمودار پروفیل فشار در وجه افقی پله [۲۷]

در وجه قائم نیز مشاهده شد که در نیمه بالایی این وجه  $z/h \leq 0.5$  مقادیر فشار به صفر و یا حتی مقادیر منفی میل خواهد نمود. در نواحی نزدیک به وجه افقی  $z/h \geq 0.8$  مقادیر فشار افزایش یافته و در تمامی دبی‌های مورد آزمایش دارای مقادیری مثبت است (شکل ۳-۱۶) [۲۷].



شکل (۳-۱۶): نمودار پروفیل فشار در وجه قائم پله [۲۷]

چیناراسری در سال ۲۰۰۲ تحقیقی بر روی سرریزهای پلکانی برای تعیین میزان فشار وارد بر کف پله‌ها در این نوع سرریز انجام داد. وی در این تحقیق از دو سری شوت پلکانی استفاده نمود. در سری اول از سرریزهای با ۲۰ پله و زوایای ۱۵، ۲۰، ۳۰ و ۴۵ درجه و ارتفاع ۱/۱۸ و ۲/۵ متر برای بررسی سرریزهای پلکانی بزرگ و در سری دوم از سرریزهایی با زوایای ۱۵، ۳۰ و ۴۵ درجه و ارتفاع ۰/۴۷ و ۱ متر برای بررسی سرریزهای کوچک استفاده گردید. با صرفنظر از تاثیر هوادهی جریان و اثرات لزجت و با آنالیز ابعادی می‌توان گفت که [۱۹]:

$$\frac{P}{\gamma H_i} = f\left(\frac{q^2}{gH_i^3}, \frac{h}{l}, \frac{x}{l}\right) \quad (37-3)$$

که در آن  $q$  دبی واحد عرض،  $H_i$  فاصله عمودی پله تا تاج سرریز،  $h$  ارتفاع پله،  $l$  طول کف پله و  $x$  فاصله لبه خارجی پله تا نقطه‌ای که باید بررسی گردد، می‌باشند [۱۹]. چیناراسری برای تخمین بیشینه فشار متوسط در طول کف پله رابطه زیر را پیشنهاد نمود [۱۹]:

$$\frac{P_{max}}{\gamma H_i} = 1.28 \left(\frac{q^2}{gH_i^3}\right)^{0.31} \quad (38-3)$$

وی نشان داد که برای شیب ۴۵ درجه بیشینه فشار در نزدیکی لبه پله، برای شیب ۳۰ درجه حداکثر فشار در محدوده  $0.7 \leq x/l \leq 1$  و برای شیب ۱۵ و ۲۰ درجه حداکثر فشار در حدود  $x/l = 0.7$  اتفاق می‌افتد [۱۹].

همانطور گفته شد اکثر تحقیقات در خصوص رفتار این سرریزها بر موضوع استهلاک انرژی تکیه داشته و تعداد کمی هم به بررسی توزیع فشار، بطور جداگانه پرداخته اند. لذا بررسی همزمان این دو پارامتر که از مسائل اصلی در طراحی این سرریزها می‌باشند، ضروری به نظر می‌رسد. از همین رو در این تحقیق سعی شده تا با تغییر برخی از پارامترهای هیدرولیکی موثر از قبیل شیب سرریز، ابعاد پله‌ها، تعداد پله‌ها و شدت جریان ورودی، اثرات ایجاد شده بر روی میدان فشار (با تاکید بر کمینه فشار وارده بمنظور بررسی احتمال وقوع پدیده کاویتاسیون) و میزان استهلاک انرژی به صورت همزمان، مورد

بررسی قرار گیرد. این تحقیق بر پایه روش‌های عددی قرار داشته که بدین منظور پس از انجام مطالعاتی در خصوص نرم افزارهای هیدرولیک محاسباتی موجود، نرم افزار FLOW3D به جهت برتری‌های نسبی برای انجام شبیه‌سازی و تحلیل انتخاب، و مورد استفاده قرار گرفت که شرح روش حل، مدل‌ها و نتایج به دست آمده از این نرم‌افزار در فصل‌های آتی ارائه می‌گردد.

## فصل چهارم

### معادلات حاکم و روش‌های حل میدان جریان

## ۴-۱ مقدمه

به منظور طراحی سازه‌های هیدرولیکی با استفاده از روش‌های عددی می‌بایست معادلات حاکم بر میدان جریان را حل و پارامترهای موثر از قبیل بردارهای سرعت و میدان فشار را محاسبه، و با شناخت دقیق از مسئله مورد نظر مناسب‌ترین راهکار ارائه شود. روش‌های متفاوتی برای مطالعه و حل مسائل هیدرولیکی موجود می‌باشد، لذا می‌بایست شناخت کافی نسبت به انواع روش‌های موجود حاصل شده، بنحوی که در هر مسئله به فراخور شرایط موجود بتوان بهترین روش را از لحاظ اقتصادی، فنی و توجیه‌پذیری انتخاب نمود. از این رو در این فصل پس ارائه معادلات حاکم بر میدان جریان، شرح مختصری از روش‌های موجود ارائه و در انتها نیز ابزار بکارگیری شده برای مطالعه میدان جریان در این تحقیق معرفی می‌گردد.

## ۴-۲ انواع روش‌های عددی حل معادلات

با توجه به مطالب فوق‌الذکر و نیز محدودیت‌های موجود در بکارگیری روش‌های فیزیکی و همچنین تجربه‌های موفق گذشته در زمینه دینامیک سیالات محاسباتی، استفاده از روش‌های عددی بعنوان روش حل معادلات میدان جریان در این تحقیق انتخاب گردید.

شناخت یک پدیده فیزیکی و کشف زوایای تاریک موجود در آن در حالت کلی از سه طریق زیر صورت می‌گیرد:

- بررسی پدیده مزبور در شرایط واقعی (اندازه گیری متغیرهای مشهود بصورت درجا (آزمایش صحرایی)).
- ساخت مدل فیزیکی از روی مدل واقعی با مقیاس کوچکتر و انجام تحقیقات مربوطه
- بیان پدیده مزبور بصورت روابط تئوری و حل این روابط از طریق اعمال شرایط موجود در طبیعت بر مدل

دو حالت اول به روشهای تجربی و حالت سوم به روش تئوریک مشهور می‌باشند.

در روشهای تئوری، ابتدا با مشاهده پدیده فیزیکی، به بیان معادلات دیفرانسیل مربوطه پرداخته می‌شود. مشکلی که وجود دارد این است که برخلاف پدیده‌هایی که حل تحلیلی برای آنها وجود دارد، پدیده‌هایی نیز وجود دارند که هنوز مدل تحلیلی مناسبی برای آنها یافت نشده است. در اینجاست که استفاده از روش‌های عددی به عنوان یک راه برای حل مسائل جریان سیال جای خود را باز می‌کند. بنابراین بصورت کلی می‌توان بررسی دینامیک سیالات را به سه بخش زیر تقسیم‌بندی نمود:

- دینامیک سیالات تجربی
- دینامیک سیالات تئوری
- دینامیک سیالات محاسباتی

دینامیک سیالات محاسباتی یا CFD عبارت است از تحلیل سیستم‌های شامل جریان سیال، انتقال حرارت و پدیده‌های همراه که براساس شبیه سازی کامپیوتری صورت می‌گیرد.

روند کلی تحلیل عددی یک سیستم بدین صورت است که اطلاعات ممتد که در حل دقیق این معادلات حاکم می‌باشد، با مقادیر جدا از هم تعویض می‌گردد، که بدین ترتیب توزیع پارامتر دخیل در معادله دیفرانسیل در میدان بصورت ناپیوسته صورت می‌گیرد.

دو روش عمده بعنوان روش‌های انفصال میدان جریان مطرح می‌باشند:

▪ روش اجزاء محدود<sup>۳۷</sup>

▪ روش تفاضل محدود<sup>۳۸</sup>

روند کلی در روش‌های بالا بصورت زیر می‌باشد:

➤ تقریب ترم‌های مشتق با استفاده از توابع ساده

<sup>37</sup> Finite Element Method

<sup>38</sup> Finite Difference Method

➤ گسسته سازی با استفاده از جایگذاری تقریب‌ها در معادلات حاکم بر جریان و سپس انجام

تغییرات ریاضی

➤ حل معادلات جبری

معمولاً در تعیین پروفیل انتخابی برای متغیر مورد نظر، منطقه کوچکی از میدان پوشش داده می‌شود که بدین ترتیب میدان محاسباتی به تعدادی میدان کوچکتر تقسیم می‌شود، که هر یک از این میدان‌های کوچک دارای یک پروفیل فرضی می‌باشند. معادله انفصال رابطه‌ای جبری است که مقادیر متغیر در یک میدان کوچک را به هم مرتبط می‌سازد. تفاوت میان روش‌های تفاضل محدود و اجزاء محدود از نحوه انتخاب پروفیل میدان‌های منفصل شده و نحوه بدست آوردن معادلات انفصال حاصل می‌شود. روش دیگری که این تحقیق بر آن متکی می‌باشد، دارای ظاهر روش تفاضل محدود است، ولی بسیاری از ایده‌های اجزاء محدود را به کار می‌گیرد. این روش به روش احجام محدود<sup>۳۹</sup> مشهور است. روش احجام محدود به علت مستتر بودن خاصیت بقاء جرم در آن، در حل میدان جریان سیال نسبت به سایر روش‌های انفصال ارجح می‌باشد.

#### ۴-۲-۱ روش احجام محدود

در روش احجام محدود که یکی از حالات ویژه روش مانده‌های وزن دار<sup>۴۰</sup> می‌باشد، درک مستقیم حالت فیزیکی مساله آسان می‌باشد. در این روش ابتدا دامنه مورد نظر به تعدادی حجم کنترل غیر هم‌پوشان تقسیم شده، بطوریکه هر حجم حول یک نقطه از میدان قرار می‌گیرد و آنگاه از معادله دیفرانسیل روی حجم کنترل انتگرال‌گیری شده و معادلات به شکل عددی منفصل می‌گردند. ایده اصلی در این روش انفصال تقریب معادلات دیفرانسیل جزئی در نقاط مجزا نمی‌باشد، بلکه شرط برقراری اصل بقاء جرم بصورت ماکروسکوپی دارای اهمیت است. پس از انتگرال‌گیری روی حجم کنترل مد نظر مربوط

<sup>39</sup> Finite Volume Method

<sup>40</sup> Weighted Residual



به هر گره، عبارات جابجایی<sup>۴۱</sup> و پخش<sup>۴۲</sup> باید به گونه‌ای منفصل شوند که فرمول حاصل پایدار و دقیق باشد.

## ۳-۴ مراحل حل یک مسئله CFD

معمولاً برای حل یک مساله دینامیک سیالات محاسباتی باید مراحل زیر رعایت شود [۲۸]:

۱. تولید شکل (هندسه مسئله)
۲. شبکه بندی در نرم افزارهای پیش پردازنده
۳. انتقال شبکه از پیش پردازنده به نرم افزار محاسبه گر
۴. بررسی شبکه تولید شده
۵. انتخاب شیوه محاسباتی و فرمول بندی حل
۶. انتخاب معادلات اساسی که باید حل شوند، مثل حالت جریان لایه‌ای یا آشفته
۷. تعیین خواص (ویژگی‌های سیال و ...)
۸. تعیین شرایط مرزی
۹. تنظیم کردن پارامترهای کنترل کننده حل
۱۰. مقدار دهی اولیه به میدان جریان
۱۱. شروع محاسبات
۱۲. امتحان کردن نتایج محاسبات
۱۳. ذخیره نتایج
۱۴. بهینه سازی شبکه حل

---

<sup>41</sup> Convection

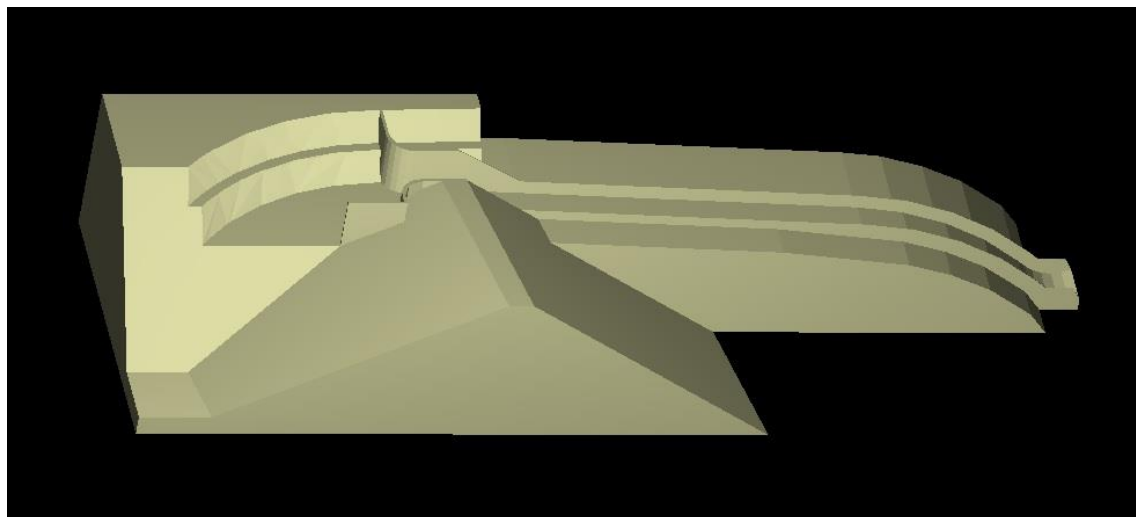
<sup>42</sup> Diffusion

## ۴-۴ ابزار و روش‌های بکارگیری شده در تحقیق حاضر

تهیه ابزاری برای تولید هندسه و نیز پردازش و تحلیل داده‌های موجود ضروری به نظر می‌رسید. از- این رو پس از بررسی‌های بعمل آمده نرم‌افزار Auto CAD برای ساخت هندسه مسئله و نرم‌افزار FLOW 3D برای حل معادلات حاکم و پردازش و تحلیل داده‌ها مورد استفاده قرار گرفت.

### ۴-۴-۱ آشنایی با نرم افزار Auto CAD

بسته نرم افزاری Auto CAD برای کمک به مهندسان در تولید هندسه‌های پیچیده طراحی شده است، و به صورت اختصاصی می‌تواند برای تولید فایل سازه مورد تحلیل در کاربردهای دینامیک سیالات محاسباتی بکارگرفته شود. در واقع خروجی بسته نرم‌افزاری مزبور نیاز اولیه نرم افزارهای دینامیک سیالات محاسباتی برای تعریف هندسه مورد نظر در مسئله است که خروجی‌های آن را در فرمت stl ، مانند شکل ۴-۱، می‌توان به نرم افزارهای عددی وارد نمود. نرم افزار Auto CAD 2013 در این تحقیق بعنوان ابزار تولید هندسه مورد استفاده قرار گرفته است.



شکل (۴-۱): نمونه‌ای از فایل هندسی تهیه شده در فرمت stl

### ۴-۴-۲ آشنایی با نرم‌افزار FLOW 3D

FLOW 3D نرم‌افزاری قوی در زمینه دینامیک سیالات محاسباتی می‌باشد که تولید، توسعه و پشتیبانی آن توسط Flow Science, Inc صورت گرفته‌است. این نرم‌افزار برای تحقیق در مورد رفتار یک، دو و سه بعدی دینامیکی سیالات در محدوده کاربردی وسیعی، طراحی شده است. یکی از قابلیت‌های عمده این برنامه برای آنالیزهای هیدرولیکی، توانایی مدل کردن جریان‌های با سطح آزاد با روش VOF<sup>۴۳</sup> (این مدل توسط هرت و نیکولز<sup>۴۴</sup> در سال ۱۹۸۱ گزارش شده است [۲۹]) می‌باشد.

FLOW 3D، از یک شبکه متشکل از سلول‌های مستطیلی استفاده می‌کند و دارای مزایایی از قبیل تولید آسان شبکه می‌باشد که برای ذخیره سازی نیز، به فضای بسیار کمی از حافظه نیاز دارد.

FLOW 3D قادر به در نظرگیری پدیده‌های فیزیکی مختلفی می‌باشد که عبارتند از: آب‌های کم عمق، کاویتاسیون، آشفستگی، کشش سطحی و محیط‌های متخلخل. این نرم‌افزار در زمینه‌هایی چون ریخته‌گری مواد، مهندسی فرایند، طراحی تزریق‌های مرکب، هیدرولیک، مهندسی محیط زیست، هوافضا، اندود، علوم دریایی، نفت، گاز و ... کاربرد دارد. برای استفاده از این نرم‌افزار حداقل یک پردازنده Pentium III با ویندوز ۲۰۰۰ لازم است. حداقل حافظه کارت گرافیک مورد نیاز باید ۳۲ MB باشد [۲۹]. در ادامه معادلات حرکت و مدل‌های به کار رفته در نرم‌افزار ارائه خواهد شد.

#### ۴-۲-۱-۴ معادلات حاکم

FLOW 3D یک برنامه کامپیوتری با کاربردهای کلی و با توانایی‌های بسیار است. کاربر می‌تواند با وارد کردن اطلاعات، مدل‌های مختلفی را به منظور ارائه محدوده وسیعی از پدیده‌های جریان، انتخاب کند. در این بخش به یکسری معادلات حرکت سیال که در نرم‌افزار استفاده شده است، اشاره می‌شود. در این نرم‌افزار از تقریب تفاضل و احجام محدود برای محاسبه زمانی و مکانی متغیرها در معادلات حرکت استفاده شده است.

---

<sup>43</sup> Volume Of Fluid

<sup>44</sup> Hirt and Nickoles

#### ۴-۲-۱-۱ سیستم‌های مختصات

معادلات دیفرانسیلی که باید حل شوند در قالب مختصات کارتزین  $(x, y, z)$  بیان می‌شود. برای مختصات استوانه‌ای  $(z, r, \theta)$ ، مختصات  $x$  بصورت شعاعی تغییر می‌کند و مختصات  $y$  به مختصات زاویه‌ای انتقال داده می‌شود و  $z$  مختصات محوری است. برای هندسه‌های استوانه‌ای، ترم‌های اضافی باید به معادلات حرکت کارتزین اضافه شوند. این ترم‌ها دارای یک ضریب  $\xi$  است که اگر  $\xi = 0$  باشد مختصات مربوط به هندسه کارتزین می‌شود و وقتی  $\xi = 1$  است، هندسه استوانه‌ای حاصل می‌شود.

#### ۴-۲-۱-۲ معادله پیوستگی جرمی<sup>۴۵</sup>

معادله پیوستگی جرم بطور کلی بصورت زیر می‌باشد [۲۹]:

$$V_F \frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(\rho u A_x) + R \frac{\partial}{\partial y}(\rho v A_y) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho w A_z) + \xi \frac{\rho u A_x}{x} = R_{DIF} + R_{SOR} \quad (۱-۴)$$

که  $V_F$  نسبت کسر حجمی فضای باز به جریان،  $\rho$  جرم مخصوص سیال،  $R_{DIF}$  ترم نفوذپذیری آشفتگی و  $R_{SOR}$  برابر منبع جرم است.  $u, v, w$  اجزای سرعت به ترتیب در جهت‌های  $x, y, z$  یا  $r, z, \theta$  هستند.  $A_x, A_y, A_z$  برابر مساحت کسری محیط بر جریان به ترتیب در جهت‌های  $x, y, z$  هستند. ضریب  $R$  وابسته به انتخاب سیستم مختصات بصورت زیر می‌باشد:

زمانیکه از مختصات کارتزین استفاده شود  $R = 1$  و  $\xi = 0$  است.

زمانیکه از مختصات استوانه‌ای استفاده شود، مشتقات  $y$  باید به مختصات استوانه‌ای تبدیل شوند.

$$R = r_m / r \quad (۲-۴)$$

به‌طوریکه  $\theta = r_m / y$  و  $r_m$  برابر با شعاع از مبدا ثابت است.

اولین ترم در سمت راست معادله پیوستگی برابر ترم نفوذ آشفتگی به شرح زیر می‌باشد:

<sup>45</sup> Mass Continuity Equation

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

که در آن:

$$v_{\rho} = \frac{C_p \mu}{\rho} \quad (4-4)$$

و  $\mu$  برابر ضریب پخش ممنتوم (لزجت) و  $C_p$  یک عدد ثابت است که معکوس آن مربوط به عدد آشفتگی اشمیت است. اینگونه از انتقال جرمها در زمینه فرایندهای آشفتگی اختلاط که گرادیانی غیریکنواخت دارند، کاربرد دارد.

$R_{SOR}$  ترم مربوط به دانسیته می باشد که بعنوان مثال در مدلسازی تزریق جرم از خلل و فرج یک دیوار استفاده می شود [۲۹].

$$\frac{\partial}{\partial x} (uA_x) + R \frac{\partial}{\partial y} (vA_y) + \frac{\partial}{\partial z} (wA_z) + \xi \frac{uA_x}{x} = \frac{R_{SOR}}{\rho} \quad (5-4)$$

#### ۴-۴-۲-۱-۳ معادلات ممنتوم<sup>۴۶</sup>

معادلات ممنتوم برای اجزای سرعت سیال در سه جهت مختصات، با یکسری ترمهای اضافی به شرح زیر می باشند [۲۹]:

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left\{ uA_x \frac{\partial u}{\partial x} + vA_y R \frac{\partial u}{\partial y} + wA_z \frac{\partial u}{\partial z} \right\} - \xi \frac{A_y v^2}{xV_F} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x} + G_x + f_x - b_x - \frac{R_{SOR}}{\rho V_F} u$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left\{ uA_x \frac{\partial v}{\partial x} + vA_y R \frac{\partial v}{\partial y} + wA_z \frac{\partial v}{\partial z} \right\} - \xi \frac{A_y v u}{xV_F} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial y} + G_y + f_y - b_y - \frac{R_{SOR}}{\rho V_F} v \quad (6-4)$$

$$\frac{\partial w}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left\{ uA_x \frac{\partial w}{\partial x} + vA_y R \frac{\partial w}{\partial y} + wA_z \frac{\partial w}{\partial z} \right\} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial z} + G_z + f_z - b_z - \frac{R_{SOR}}{\rho V_F} w$$

<sup>46</sup> Momentum Equation

در این معادلات  $G_z$  و  $G_y$ ,  $G_x$  شتاب‌های بدنه و  $f_z$  و  $f_y$ ,  $f_x$  و  $b_z$  و  $b_y$ ,  $b_x$  از لزجت در این معادلات  $G_z$  و  $G_y$ ,  $G_x$  شتاب‌های بدنه و  $f_z$  و  $f_y$ ,  $f_x$  و  $b_z$  و  $b_y$ ,  $b_x$  از لزجت و فرج و ترم آخر در سمت راست مربوط به تزریق جرم در سرعت صفر به ترتیب در جهت‌های  $X$ ,  $Y$ ,  $Z$  می‌باشد.

برای تغییرات لزجت دینامیکی، شتاب ناشی از لزجت در جهات سه‌گانه عبارتند از:

$$\begin{aligned} \rho v_F f_x &= w s x - \left\{ \frac{\partial}{\partial x} (A_x \tau_{xx}) + R \frac{\partial}{\partial y} (A_y \tau_{xy}) + \frac{\partial}{\partial z} (A_z \tau_{xz}) + \frac{\xi}{x} (A_x \tau_{xx} - A_y \tau_{yy}) \right\} \\ \rho v_F f_y &= w s y - \left\{ \frac{\partial}{\partial x} (A_x \tau_{xy}) + R \frac{\partial}{\partial y} (A_y \tau_{yy}) + \frac{\partial}{\partial z} (A_z \tau_{yz}) + \frac{\xi}{x} (A_x - A_y \tau_{xy}) \right\} \\ \rho v_F f_z &= w s z - \left\{ \frac{\partial}{\partial x} (A_x \tau_{xz}) + R \frac{\partial}{\partial y} (A_y \tau_{yz}) + \frac{\partial}{\partial z} (A_z \tau_{zz}) + \frac{\xi}{x} (A_x \tau_{xz}) \right\} \end{aligned} \quad (7-4)$$

به طوری که در روابط داریم:

$$\begin{aligned} \tau_{xx} &= -2\mu \left\{ \frac{\partial u}{\partial x} - \frac{1}{3} \left( \frac{\partial u}{\partial x} + R \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} + \frac{\xi u}{x} \right) \right\} \\ \tau_{yy} &= -2\mu \left\{ R \frac{\partial v}{\partial y} + \xi \frac{u}{x} - \frac{1}{3} \left( \frac{\partial u}{\partial x} + R \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} + \frac{\xi u}{x} \right) \right\} \\ \tau_{xz} &= -2\mu \left\{ \frac{\partial w}{\partial z} - \frac{1}{3} \left( \frac{\partial u}{\partial x} + R \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} + \frac{\xi u}{x} \right) \right\} \\ \tau_{xy} &= -\mu \left\{ \frac{\partial v}{\partial x} + R \frac{\partial u}{\partial y} - \frac{\xi v}{x} \right\} \\ \tau_{xz} &= -\mu \left\{ \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right\} \\ \tau_{yz} &= -\mu \left\{ \frac{\partial v}{\partial z} + R \frac{\partial w}{\partial y} \right\} \end{aligned} \quad (8-4)$$

#### ۴-۴-۲-۱-۴ تنش برشی دیوار<sup>۴۷</sup>

در عبارات بالا ترم‌های  $WSX$ ,  $WSY$ , و  $WSZ$  تنش‌های روی دیواره هستند. اگر از این ترم‌ها صرف‌نظر شود، هیچ تنش برشی روی دیواره‌ها وجود ندارد، زیرا ترم‌های باقیمانده که شامل کسرهای جزئی مساحت‌های جریان ( $A_x$ ,  $A_y$ ,  $A_z$ ) روی دیوار هستند، حذف می‌شوند. تنش‌های روی دیواره به‌وسیله فرض یک سرعت مماسی صفر روی قسمتی از مساحت سطح محدود به جریان، مدل می‌شوند. شبکه-ها و مرزهای موانع متحرک استثناء هستند، زیرا آن‌ها می‌توانند به‌وسیله سرعت‌های مماسی غیر صفر ذکر شوند [۲۹].

#### ۴-۴-۲-۱-۵ ارزیابی گرانروی<sup>۴۸</sup>

گرانروی دینامیکی ( $\mu$ )، به‌وسیله مقادیر ثابت مولکولی برای هر یک از حالت‌های یک یا دو سیاله می‌تواند مورد استفاده قرار گیرد.

در مدل‌های تک سیاله، سیال می‌تواند شامل دو مولفه با چگالی و گرانروی خاص خود باشد. در جریان‌هایی که شاهد اختلاط هستیم، گرانروی مخلوط سیال به‌وسیله یک میانگین کسرحجمی وزن-دار از دو مقدار ثابت برآورد می‌شود.

زمانیکه گزینه آشفتگی در مدلسازی استفاده می‌گردد، گرانروی شامل دو حالت آشفته و مولکولی می‌شود. برای سیال‌های غیرنیوتنی، گرانروی سیال می‌تواند تابعی از نرخ کرنش و (یا) دما باشد. یک عبارت عمومی برمبنای مدل کریو<sup>۴۹</sup> در نرم‌افزار FLOW 3D استفاده می‌شود که نرخ کرنش وابسته به گرانروی را به‌صورت زیر بیان می‌کند:

<sup>47</sup> Wall Shear Stress

<sup>48</sup> Viscosity Evalation

<sup>49</sup> Carreau

$$\mu = \mu_{\infty} + \frac{\mu_0 E_T - \mu_{\infty}}{\lambda_{\infty} + [\lambda_0 + (\lambda_1 E_T)^2 e_{ij} e_{ij}]^{\frac{1-n}{2}}} + \frac{\lambda_2}{\sqrt{e_{ij} e_{ij}}} \quad (9-4)$$

که در فرمول ۹-۴ داریم:

$$e_{ij} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad (10-4)$$

در نرخ کرنش سیال برای نمایش تانسور کارتیزین مقادیر  $\mu_0, \mu_{\infty}, \lambda_0, \lambda_1, \lambda_2$  و مقدار  $n$  ثابت بوده و:

$$E_T = \exp \left[ a \left( \frac{T^*}{T-b} - C \right) \right] \quad (11-4)$$

و همچنین مقادیر  $T^*, a, b, C$  ثابت بوده و  $T$  دمای سیال می‌باشد.

عبارت بدست آمده از معادلات ۱۰-۴ و ۱۱-۴ می‌تواند به‌وسیله مقادیر ورودی متغیر مطابق مقادیر زیر انتخاب شوند.

$\mu_0 = MUC1$	$a = MUTMP1$	$T^* = TSTAR$
$\lambda_0 = MUC0$	$b = MUTMP2$	$\mu_{\infty} = MUC3$
$\lambda_1 = MUC1$	$C = MUTMP3$	$\lambda_{\infty} = MUC00$
$\lambda_2 = MUC4$	$n = MUC2$	

مقدار  $T^*$  به‌وسیله دمای مرجع جایگزین می‌گردد. توجه شود که مقدار  $T^*$  و ثابت  $b$  دارای بعد دما هستند. گرانیوی وابسته به دما حتی وقتی که هیچ نوع وابستگی برشی نداشته‌باشیم، نیز قابل محاسبه می‌باشد، زیرا مقدار گرانیوی به‌وسیله یک زیربرنامه<sup>۵۰</sup> جداگانه (MUCAL) محاسبه می‌شود، که باید کاربر رابطه ساده‌ای بین مدل گرانیوی وابسته به دما و سیال غیرنیوتنی در نرم‌افزار داشته باشد. اگر گرانیوی سیال صفر باشد، هیچ تنش گرانیوی محاسبه نمی‌شود. علاوه‌براین تنش برشی دیوار می‌تواند به‌وسیله کاربر غیر فعال شود [۲۹].

<sup>50</sup> Subroutine



#### ۴-۲-۱-۶ سطح مشترک و سطح آزاد سیال<sup>۵۱</sup>

ترکیب سیال بصورت ترم‌های یک تابع حجم سیال ( $F(x, y, z, t)$ ) تعریف می‌شود. این تابع معرف حجم واحد سیال بر واحد حجم بوده و بصورت معادله زیر بیان می‌شود:

$$\frac{\partial F}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left[ \frac{\partial}{\partial x} (FuA_x) + R \frac{\partial}{\partial y} (FvA_y) + \frac{\partial}{\partial z} (FwA_z) + \xi \frac{FuA_x}{x} \right] = F_{DIF} + F_{SOR} \quad (12-4)$$

که در آن:

$$F_{DIF} = \frac{1}{V_F} \left[ \frac{\partial}{\partial x} \left( v_F A_x \frac{\partial F}{\partial x} \right) + R \frac{\partial}{\partial y} \left( v_F A_y \frac{\partial F}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( v_F A_z \frac{\partial F}{\partial z} \right) + \xi \frac{F v_F A_x}{x} \right] \quad (13-4)$$

که در آن ضرایب پخش بصورت زیر بیان می‌شود:

$$v_F = \frac{C_F \mu}{\rho} \quad (14-4)$$

در رابطه فوق  $C_F$  یک مقدار ثابت می‌باشد. ترم نفوذ تنها یک دید برای اختلاط آشفته‌گی دو سیال که توزیع آن با تابع  $F$  بیان می‌شود، ایجاد می‌کند.

تعریف  $F$  وابسته به مسئله‌ای است که مدل می‌شود. مسائل غیرقابل تراکم شامل یک سیال با سطح آزاد و یا دو سیال با سطح مشترک است. برای یک سیال،  $F$  معرف کسر حجمی اشغال شده با سیال می‌باشد. بنابراین در مکان‌هایی که  $F = 1$  باشد، سیال وجود دارد، و در مکان‌هایی که  $F = 0$  باشد، حباب و حفره وجود دارد. نواحی حبابی و خالی ناحیه‌هایی هستند که در آن‌ها جرم سیال وجود ندارد و یک فشار یکنواخت در آن‌ها حاکم است. تعبیر فیزیکی این نواحی مانند جاهایی است که بخار یا گاز با دانسیته قابل صرفنظر در مقابل سیال پر شده است. مسائل دارای دو سیال ممکن است شامل دو سیال غیرقابل تراکم و یک سیال قابل تراکم باشد.  $F$  معرف کسر حجمی سیال غیرقابل تراکم است. نواحی متمم با کسر حجمی  $1 - F$ ، معرف سیال دومی است [۲۹].

<sup>51</sup> Fluid Interfaces and Free-Surfaces

#### ۴-۲-۱-۷ روابط ورود هوا

مدل‌های انتقال آشفته‌گی براساس انرژی جنبشی آشفته‌گی،  $k$  و تابع استهلاک  $\varepsilon$  طبقه‌بندی می‌شوند. طول مشخصه گردابه‌های آشفته‌گی با رابطه زیر بدست می‌آید:

$$L_t = \frac{cnu\sqrt{1.5k^3}}{\varepsilon} \quad (۱۵-۴)$$

از این مقیاس برای مشخص کردن آشفته‌گی‌های سطحی استفاده می‌شود. انرژی جنبشی آشفته‌گی بر واحد سطح به‌همراه المان سیال که تا ارتفاع  $L_t$  با استفاده از رابطه ۴-۱۵ بدست می‌آید.

$$P_d = \rho g_n L_t - \sigma / L_t \quad (۱۶-۴)$$

که در آن  $\rho$  چگالی سیال،  $\sigma$  ضریب تنش سطحی و  $g_n$  مولفه شتاب‌گرانش در جهت عمود بر سطح آزاد می‌باشد. برای اینکه هوا وارد جریان شود می‌بایست انرژی جنبشی آشفته‌گی در واحد حجم، از  $P_d$  بیشتر باشد، یعنی نیروهای آشفته‌گی برای غلبه بر نیروهای تعادل سطحی، به‌اندازه کافی بزرگ باشند. حجم هوای وارد شده در واحد زمان  $\delta V$ ، می‌بایست متناسب با مساحت سطح سیال  $A_s$  و ارتفاع سیال بر روی تراز متوسط سطح جریان باشد. برای این منظور رابطه ذیل ارائه شده است:

$$\delta V = C_{air} A_s (2(P_t - P_d) / \rho)^{0.5} \quad (۱۷-۴)$$

$C_{air}$  یک ضریب نسبت می‌باشد. اگر  $P_t$  کمتر از  $P_d$  باشد،  $\delta V$  برابر صفر خواهد بود. انتظار می‌رود که ضریب  $C_{air}$  کمتر از واحد باشد، زیرا قسمتی از حجم آشفته‌گی که به سطح رسیده است، توسط هوا اشغال می‌شود [۲۹].

#### ۴-۲-۲-۲ مدل‌های آشفته‌گی

اکثر جریان‌های موجود در طبیعت بصورت آشفته می‌باشند. در اعداد رینولدز پایین جریان آرام بوده ولی در اعداد رینولدز بالا جریان آشفته می‌شود، بطوریکه یک حالت تصادفی از حرکت در جایی که

سرعت و فشار بطور پیوسته درون بخش‌های مهمی از جریان نسبت به زمان تغییر می‌کنند، گسترش می‌یابد.

#### ۴-۲-۲-۱ فرضیه بوزینسک

بسیاری از مدل‌های آشفتگی بر پایه این فرض استوار هستند. با افزایش نرخ میانگین تغییر شکل‌ها، آشفتگی افزایش می‌یابد. فرضیه بوزینسک بیان می‌کند که می‌توان تنش‌های رینولدز را به نرخ میانگین تغییر شکل‌ها ارتباط داد.

$$\tau_{ij} = -\overline{\rho u_i' u_j'} = \mu_t \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \rho k \delta_{ij} \quad (۱۸-۴)$$

$\mu_t$  لزجت گردابه‌ای یا مولکولی نامیده شده و واحد آن Pa.s می‌باشد.

مدل‌های آشفتگی با توجه به فرضیات گفته شده و تعداد معادلات دیفرانسیل برای ارتباط تنش‌های آشفتگی با سرعت‌های متوسط‌گیری شده یا گرادیان آن‌ها بصورت زیر تقسیم می‌شوند:

- مدل‌های صفر معادله‌ای
- مدل‌های تک معادله‌ای
- مدل‌های دو معادله‌ای
- مدل‌های دارای معادله تنش

#### ۴-۲-۲-۲ مدل‌های صفر معادله‌ای

در این مدل‌ها هیچگونه معادله دیفرانسیلی برای کمیت‌های آشفتگی ارائه نمی‌شود. این مدل‌ها نسبتاً ساده بوده و داده‌های تجربی و آزمایشگاهی در آن‌ها نقش اساسی دارد و تنش‌های آشفتگی در هر جهت متناسب با گرادیان سرعت می‌باشد. نمونه‌ای از این مدل‌ها عبارتند از:

❖ مدل لزجت گردابه‌ای ثابت<sup>۵۲</sup>

<sup>52</sup> Constant Eddy Viscosity model

❖ مدل طول اختلاط پранتل<sup>۵۳</sup>

❖ مدل لایه برش آزاد پранتل<sup>۵۴</sup>

#### ۴-۲-۲-۳ مدل های یک معادله ای

این مدل ها برخلاف مدل های صفر معادله ای، از یک معادله برای انتقال کمیت آشفتگی استفاده می کنند. این معادله ارتباط بین مقیاس سرعت نوسانی و کمیت آشفتگی می باشد که جذر انرژی جنبشی آشفتگی ( $k$ ) بعنوان مقیاس سرعت در حرکت آشفته مدنظر می باشد و مقدار آن توسط معادله انتقال محاسبه می گردد.

#### ۴-۲-۲-۴ مدل های دو معادله ای

مدل های دو معادله ای ساده ترین مدل ها هستند که قادرند نتایج بهتری در جریان هایی که مدل طول اختلاط نمی تواند بصورت تجربی در یک روش ساده مورد استفاده قرار بگیرد، ارائه دهند. به طور مثال جریان های چرخشی از این نمونه اند. تقسیم بندی این مدل ها براساس محاسبه تنش رینولدز و یا لزجت گردابه ای بصورت زیر می باشد:

➤ لزجت گردابه ای

➤ جبری

➤ تنش رینولدز غیرخطی

این مدل ها دو معادله دیفرانسیل را حل می کنند، به معادله  $k$  که از قبل موجود بود، معادله  $\varepsilon$ ، هم برای محاسبه مقیاس طول اضافه می شود.

#### ۴-۲-۲-۵ مدل گروه های نرمال شده<sup>۵۵</sup>

<sup>53</sup> Prandtl Mixing-length model

<sup>54</sup> Prandtl's Free Shear Layer model

<sup>55</sup> RNG

مدل RNG از معادلاتی شبیه به معادلات  $k-\varepsilon$  استفاده می‌کند. اما ثابت‌هایی که به‌طور تجربی در مدل‌های  $k-\varepsilon$  استاندارد بدست آمده است، در مدل RNG به‌طور صریح استحصال می‌شود. به‌طور کلی مدل RNG کاربرد وسیعی نسبت به مدل  $k-\varepsilon$  دارد.



## فصل پنجم

### مدلسازی و تجزیه و تحلیل نتایج

## ۵-۱ مقدمه

پس از انتخاب یک ابزار عددی اولین گام در انجام یک مطالعه عددی، کالیبراسیون و کسب اطمینان از عملکرد آن برای شبیه‌سازی می‌باشد، بدین منظور با استفاده از نرم‌افزار عددی، نمونه‌های عملی و یا آزمایشگاهی مشابه با موضوع پروژه که دارای داده‌های معتبر می‌باشند، با اعمال مجموعه‌ای از تغییرات هندسی و هیدرولیکی از قبیل شرایط مرزی، شرایط اولیه، مدل‌های مختلف آشفتگی و .... مورد بررسی قرار می‌گیرند. با مقایسه نتایج حاصل و داده‌های موجود، ابزار عددی مورد صحت سنجی قرار گرفته و در صورتیکه اختلاف موجود قابل قبول باشد، ابزار مورد نظر می‌تواند با دقتی منطقی برای حل مسئله اصلی بکار گرفته شود.

در این فصل پس از صحت سنجی و تایید قابلیت نرم‌افزار FLOW 3D در مدلسازی سرریزهای پلکانی، به مطالعه در خصوص رفتار این سازه‌ها پرداخته می‌شود. می‌توان ابعاد هندسی پله‌ها، شیب سرریز، تعداد پله‌ها و دبی جریان حاکم را از مهم‌ترین عوامل موثر در عملکرد صحیح این سرریزها دانست. تغییر پارامترهای مذکور و بررسی اثرات آن‌ها بر رفتار هیدرولیکی سرریزپلکانی با تکیه بر دو مسئله اصلی استهلاک انرژی و میدان فشار موضوع اصلی این فصل می‌باشد که در ادامه مورد بحث قرار می‌گیرد.

## ۵-۲ مشخصات مدل آزمایشگاهی

برای کالیبراسیون و امتحان مدل عددی از داده‌های آزمایشگاهی مدل هیدرولیکی سرریزپلکانی ساخته شده توسط چانسون و همکاران در آزمایشگاه دانشگاه کوئینزلند<sup>۵۶</sup> استرالیا استفاده گردید (شکل ۵-۱). این مدل شامل یک سرریز لبه‌پهن بطول ۱/۰۱ متر و عرض ۰/۵۲ متر بوده که وجه بالادست آن از یک قوس دایره‌ای به شعاع ۰/۰۸ متر تشکیل شده و در پایین دست به قسمت پلکانی متصل می‌گردد. قسمت پلکانی متشکل از ۱۰ پله به عرض ۰/۲ و ارتفاع ۰/۱ متر می‌باشد (شکل ۵-۲)

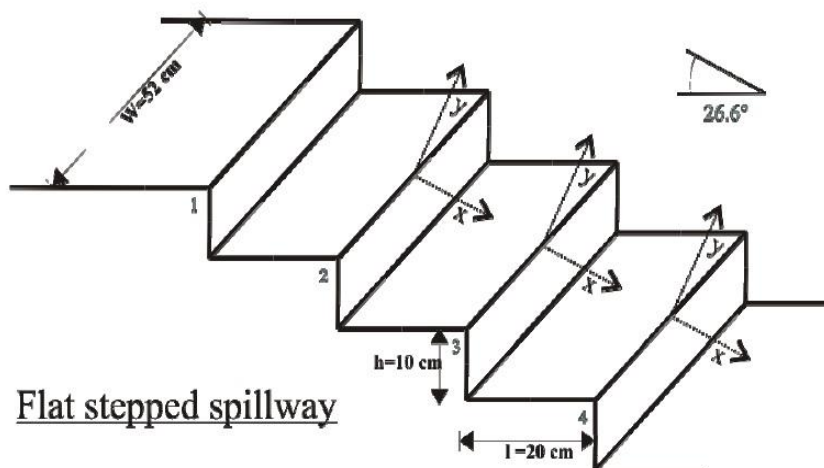
<sup>56</sup> QUEENSLAND



که با توجه به این ابعاد، شیب کلی سرریز ۲۶/۶ درجه می‌باشد. دبی جریان عبوری در محدوده 0.002  $\leq Q \leq 0.155$  مترمکعب بر ثانیه بوده که بنابر داده‌های موجود در مقادیر بزرگتر از ۰/۰۴۹ مترمکعب بر ثانیه با توجه به ابعاد هندسی سرریز، جریان از نوع رویه‌ای می‌باشد [۳۰]. در این تحقیق دبی‌های ۰/۰۷۵، ۰/۰۹ و ۰/۱۱۳ مترمکعب بر ثانیه برای انجام صحت سنجی مورد استفاده قرار گرفته است.



شکل (۵-۱): نمایی از مدل آزمایشگاهی [۳۰]



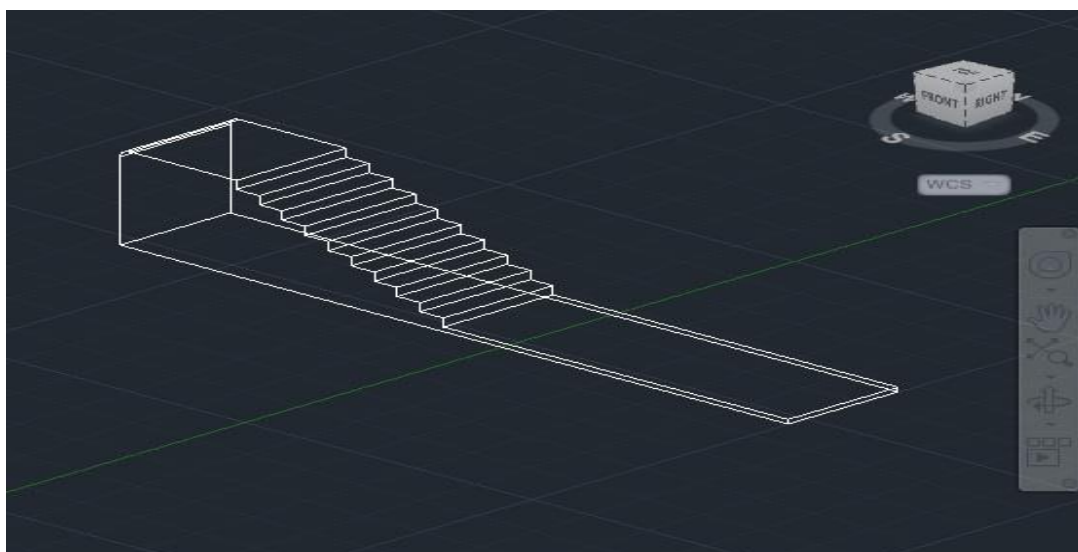
شکل (۵-۲): مشخصات هندسی مدل آزمایشگاهی [۳۰]

## ۳-۵ بررسی قابلیت نرم‌افزار در شبیه‌سازی سرریزپلکانی

قبل از شروع به مدلسازی و بررسی تغییرات عوامل موثر بر عملکرد سرریز می‌بایست از توانایی نرم‌افزار در شبیه‌سازی مسئله مورد نظر اطمینان حاصل نمود. بدین منظور همانطور که گفته شد می‌توان مدل‌های واقعی و یا آزمایشگاهی، که دارای داده‌های معتبر می‌باشند را توسط نرم‌افزار مدل نمود و این قابلیت را مورد بررسی قرار داد. در اینجا پس از تهیه هندسه مدل آزمایشگاهی توصیف شده در بخش قبل جهت ورودی به نرم‌افزار FLOW 3D با تغییر پارامترهای موثر و شرایط حاکم بر مسئله در خصوص کالیبراسیون و حساسیت سنجی مدل اقدام نموده و پس از صحت سنجی نتایج با داده‌های آزمایشگاهی موجود و کسب اطمینان از عملکرد مناسب نرم‌افزار در شبیه‌سازی سرریزپلکانی به مطالعه و بررسی موضوع تحقیق پرداخته می‌شود.

## ۳-۵-۱ ایجاد هندسه مرزهای جامد و شبکه‌بندی

برای تهیه هندسه مرزها همانطور که در شکل ۳-۵ مشاهده می‌گردد از نرم‌افزار AutoCAD استفاده شده‌است که خروجی این نرم‌افزار در فرمت stl و ورودی نرم‌افزار FLOW 3D بعنوان هندسه مرزهای جامد می‌باشد.



شکل (۳-۵): نمایی از هندسه تهیه شده توسط نرم‌افزار AutoCAD

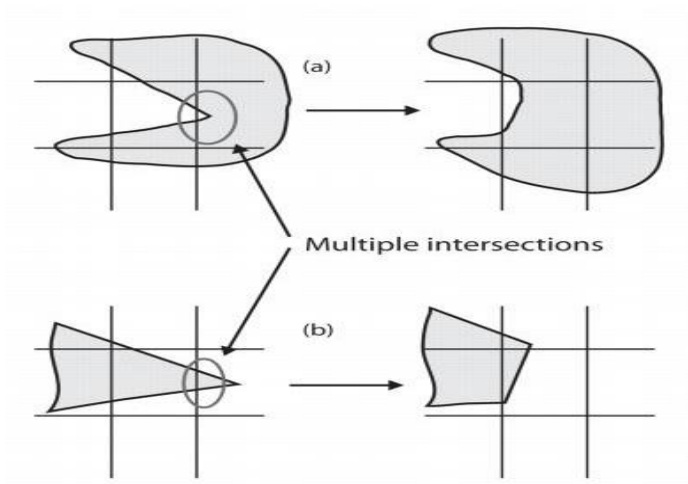
نرم‌افزار FLOW 3D نسبت به مرزهای جامد و شبکه‌بندی نحوه برخورد نسبتاً متفاوتی با سایر بسته‌های دینامیک سیالات محاسباتی دارد.

روش کسر مساحت - حجم مانع (FAVOR) برای شبیه‌سازی سطوح و اجسام صلب مثل مرزهای هندسی کاربرد دارد. هندسه مسئله بوسیله محاسبه کسر مساحت وجوه و کسر حجم هر المان برای شبکه که بوسیله موانعی محصور شده‌اند، تعریف می‌شود. همانطور که کسر حجم سیال موجود در هر المان شبکه برای قرار گیری سطوح سیال مورد استفاده قرار می‌گرفت، کمیت کسر حجم دیگری برای تعیین سطوح صلب مورد استفاده قرار می‌گیرد. اساس این روش بر این مبناست که الگوریتم‌های عددی بر مبنای اطلاعاتی شامل فقط یک فشار، یک سرعت، یک دما و ... برای هر حجم‌کنترل می‌باشد، که این با استفاده از مقادیر زیادی از اطلاعات برای تعریف هندسه متناقض است. بنابراین روش FAVOR المان‌های ساده مستطیلی را حفظ می‌کند، در صورتیکه می‌تواند اشکالی با هندسه پیچیده در حد سازگاری با مقادیر جریان میانگین‌گیری شده را برای هر المان نشان دهد [۲۹].

در این روش، شکل نهایی موانع به شدت به شبکه ساخته شده در اطراف آن‌ها بستگی دارد. اگر سطح مانع دارای لبه‌های تیز، مقعر یا محدب باشد، ممکن است محل تقاطع چندگانه<sup>۵۷</sup> بوجود آید، که این حالت هنگامی رخ می‌دهد که یک پاره‌خط شبکه بیش از یکبار توسط مانع قطع شود. در این مورد فرض می‌شود که سلول یا از داخل پر شود، مانند آنچه در شکل (۴a-۵) نشان داده شده است، یا از خارج بگونه‌ای خالی شود که هر پاره خط شبکه را فقط یکبار قطع کند (شکل ۴b-۵) [۲۹].

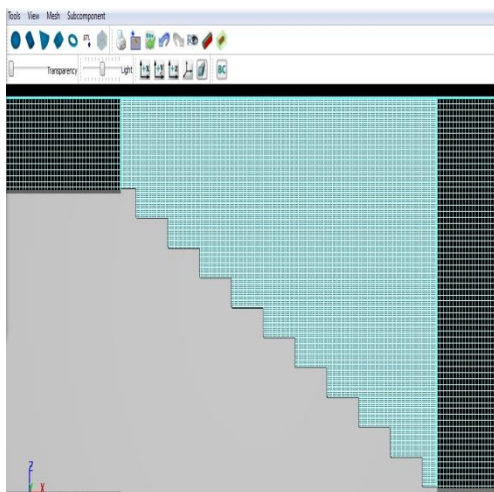
---

<sup>57</sup> Multiple intersection

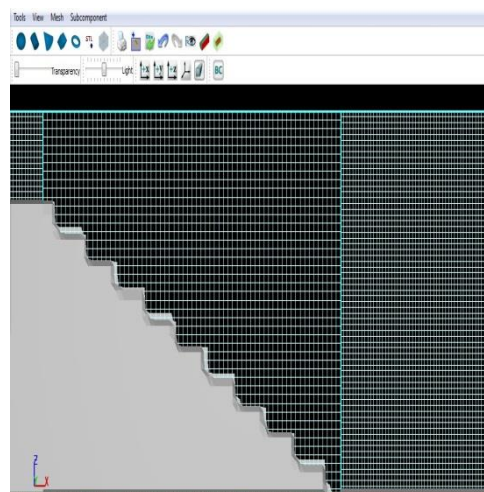


شکل (۴-۵): تغییر شکل موانع در شبکه‌بندی FLOW 3D بدلیل رویداد محل تقاطع چندگانه

برای مشخص کردن حدود شبکه‌بندی، بلوک‌هایی مشخص می‌شود که کلیه اندازه‌های سازه مورد نظر و فضای آزاد در داخل آن تعریف می‌شود. می‌توان تمام جزئیات مورد نظر را در یک بلوک هم در نظر گرفت. در شکل ۵-۵ نشان داده شده است که مدل عددی و روش FAVOR چگونه برخوردی با موانع و مولفه‌های صلب، در شبکه‌بندی‌های گوناگون دارد.



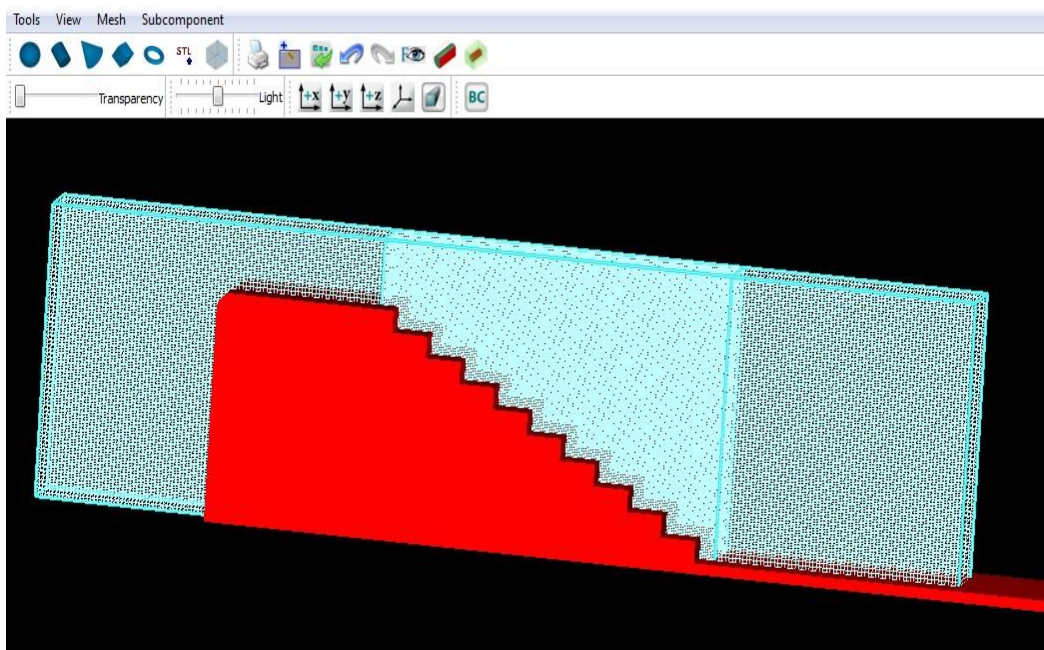
ب) تعداد شبکه ۴۰۰\*۵۳۰



الف) تعداد شبکه ۱۰۰\*۲۳۰

شکل (۵-۵) نحوه عملکرد روش FAVOR با مرزهای جامد

از مباحث فوق می‌توان نتیجه گرفت که ایجاد مرزهای جامد مناسب در شبکه بندی مدل عددی، بخصوص در مدل‌هایی با هندسه پیچیده (مانند مدل در دست بررسی)، بزرگترین محدودیت می‌باشد و انتخاب مناسب آن می‌تواند دقت محاسبات را بیفزاید. در تحقیق حاضر میزان شبکه‌های مدل کمی بیشتر از حد لازم به نظر می‌رسد. اما با توجه به هندسه پیچیده مدل، استفاده از این شبکه‌بندی امری ضروری بوده است. شکل ۵-۶ الگوی شبکه‌بندی بکار رفته در تحقیق حاضر که شامل سه بلوک محاسباتی می‌باشد را نشان می‌دهد. در این الگو بلوک با شبکه‌بندی ریزتر در قسمت میانی که محدوده مورد نظر برای انجام محاسبات می‌باشد (قسمت پلکانی) قرار گرفته، و از آنجا که افزایش تعداد سلول‌ها علاوه بر افزایش دقت محاسبات، رابطه مستقیم با زمان شبیه‌سازی دارد، دو بلوک با شبکه‌بندی درشت‌تر در قسمت‌های ابتدا و انتها که ارزش محاسباتی کمی دارند، می‌باشند قرار گرفته‌اند.



شکل (۵-۶): الگوی شبکه بندی بلوکی در تحقیق حاضر

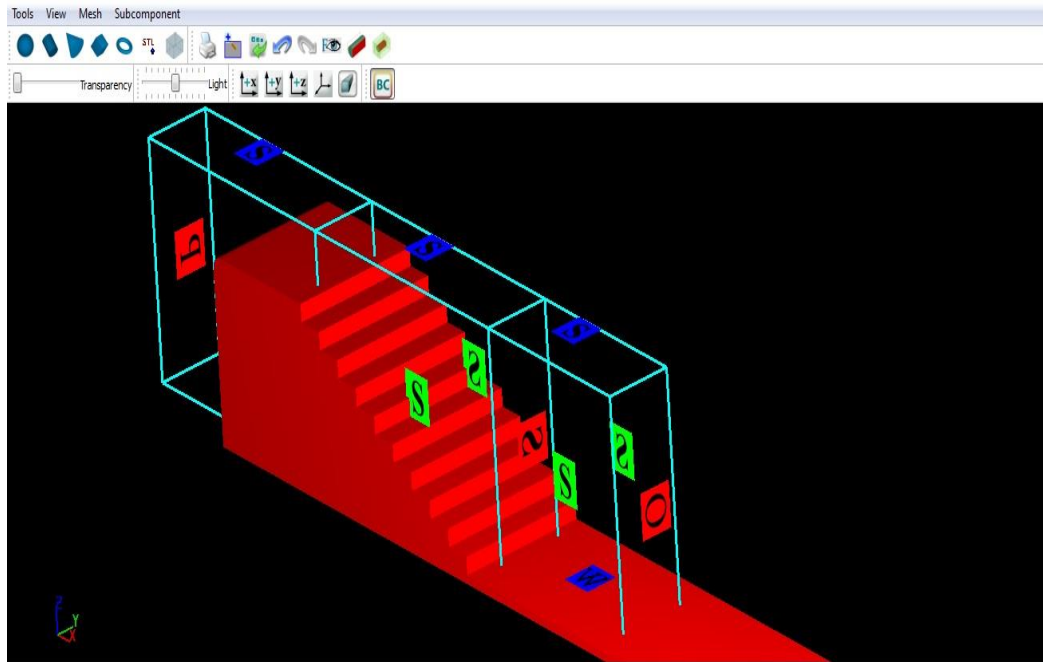
## ۵-۳-۲ کالیبراسیون

از مهم‌ترین گام‌ها در انجام یک مطالعه عددی، کالیبره کردن مدل می‌باشد. بدین معنی که تاثیرات عوامل خارجی را به حداقل رسانده و شرایط مدل را به شرایط واقعی نزدیک‌تر نمود. با توجه به اینکه مدل عددی حاضر از روی مدل آزمایشگاهی ایجاد شده است، پس با یک مدل کالیبره شده آزمایشگاهی روبرو هستیم. آنچه در اینجا مطرح می‌شود کالیبره کردن مدل عددی از لحاظ شرایط مرزی و زمان شبیه‌سازی می‌باشد.

## ۵-۳-۱ شرایط مرزی

از مهم‌ترین مراحل در انجام یک شبیه‌سازی عددی اعمال شرایط مرزی مناسب به محدوده حل برای انطباق هرچه بیشتر مدل با شرایط طبیعی و حل دقیق‌تر معادلات حاکم بر میدان جریان می‌باشد. در این راستا شرایط مرزی زیر جهت انجام این تحقیق انتخاب گردید:

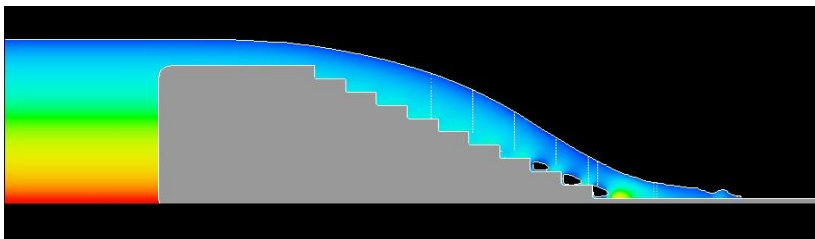
شرط مرزی اعمال شده در بالادست بلوک اول، شرط مرزی فشار مشخصه می‌باشد. در طرفین هر سه بلوک از شرط مرزی تقارن استفاده شده و در پایین دست آن نیز به دلیل هم‌مرز بودن با بلوک دوم از شرط تقارن استفاده شده و به همین دلیل در بالادست بلوک دوم و سوم و پایین دست بلوک دوم از این شرط استفاده شده است. به دلیل حذف تاثیرات پایین دست بر جریان، شرط خروجی در پایین دست بلوک سوم به کار برده شده است. در کف هر سه بلوک شرط مرزی دیواره و در بالای هر سه آن‌ها شرط مرزی تقارن به دلیل ایجاد شرایط موجود منطبق با واقعیت اعمال گشته است (شکل ۵-۷).



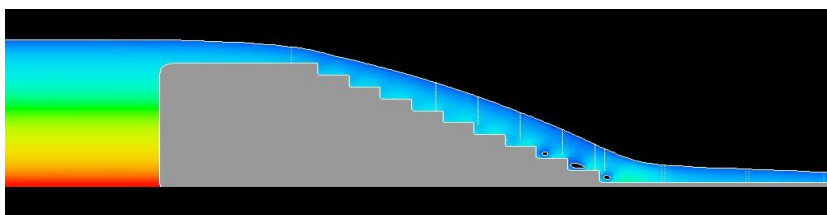
شکل (۷-۵): نمایی از شرایط مرزی به کار برده شده در مدل سازی سرریز پلکانی

### ۲-۲-۳-۵ زمان شبیه سازی

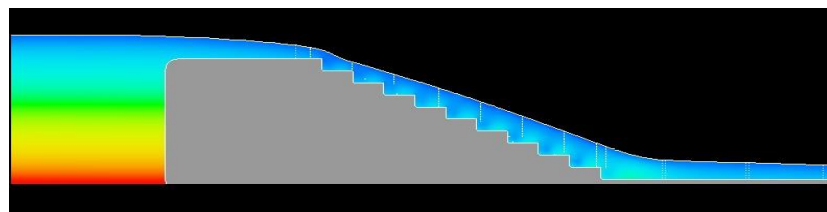
برای استخراج مقادیر درست داده های یک مدل عددی یا آزمایشگاهی، رسیدن حالت جریان به یک شرایط پایدار ضروری می باشد. در مدل حاضر پس از بررسی چند مدل، زمان مناسب برای اجرا ۱۵ ثانیه مدنظر قرار گرفت. در شکل شماره ۸-۵ می توان نحوه عبور جریان از روی سرریز در بازه های زمانی مختلف را مشاهده کرد. جریان از ثانیه ۱۵ به بعد حالت پایدار به خود می گیرد.



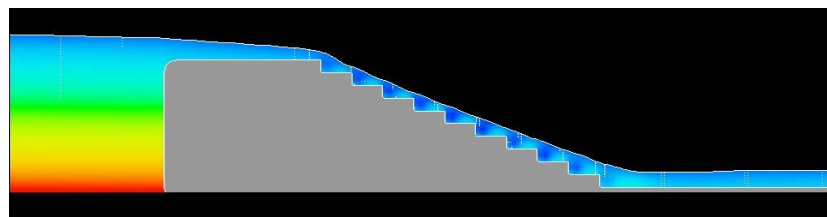
۰/۵ ثانیه



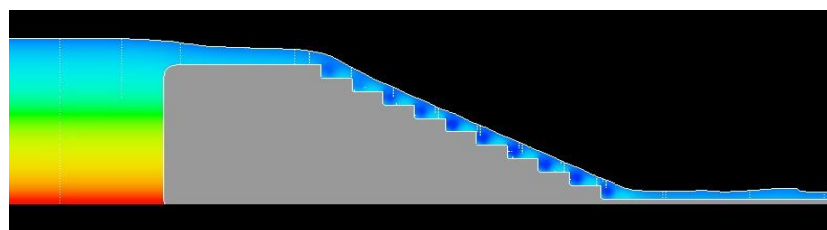
۰/۷۵ ثانیه



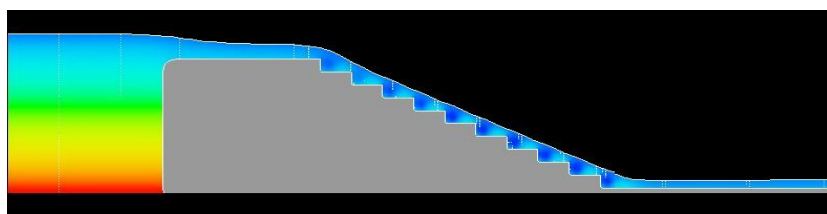
۱ ثانیه



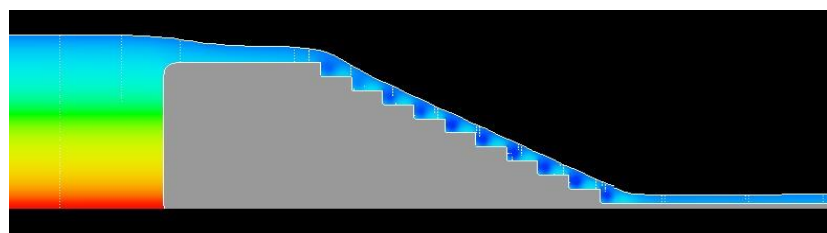
۱/۵ ثانیه



۳/۵ ثانیه



۶ ثانیه

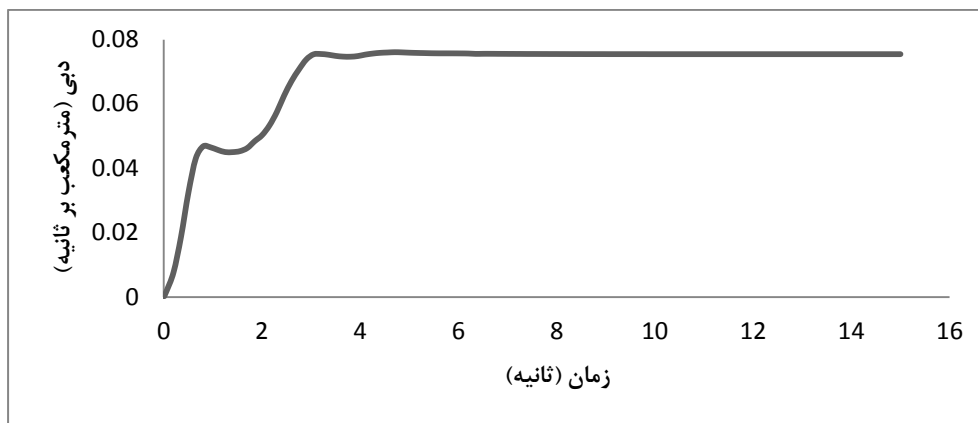


۱۵ ثانیه

شکل (۵-۸): نحوه عبور جریان از روی سرریز در بازه‌های زمانی مختلف

در شکل ۵-۹ نمودار دبی عبوری از مرز خروجی مدل در زمان نشان داده شده است.

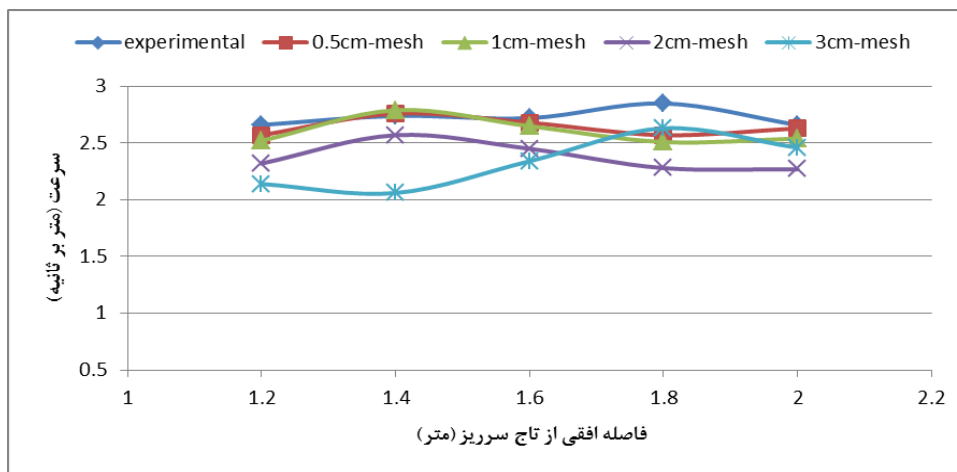




شکل (۵-۹): دبی عبوری از مرز خروجی مدل تا زمان رسیدن به حالت پایدار

### ۵-۳-۳ تحلیل حساسیت

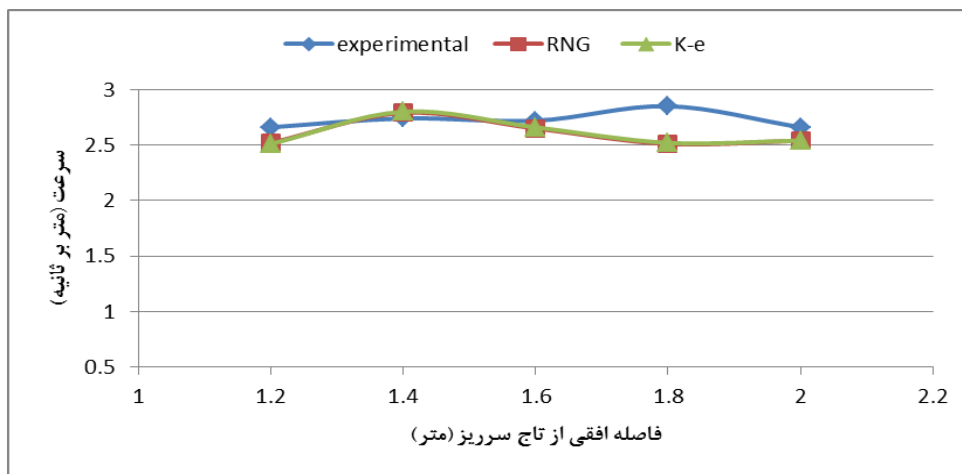
به منظور یافتن ابعاد شبکه بندی مناسب که ضمن دقت بالا در محاسبات از لحاظ زمان نیز بهینه باشد، ابتدا شبیه سازی با شبکه بزرگ صورت گرفت. سپس با ریز کردن ابعاد شبکه و بررسی جواب ها، شبکه با ابعاد ۱ سانتی متر برای بلوک میانی و شبکه ۲ سانتی متری برای دو بلوک محاسباتی دیگر انتخاب گردید. در شکل ۵-۱۰ نتایج سرعت متوسط در فواصل مشخص از تاج سرریز برای دبی ۰/۰۷۵ مترمکعب بر ثانیه و به ازای مقادیر مختلف ابعاد شبکه های محاسباتی، نشان داده شده است. براساس نتایج بدست آمده در شکل ملاحظه می گردد که در مسئله حاضر برای شبکه های ۰/۵ و ۱ سانتی متر جواب ها بسیار نزدیک شده و با کوچکتر کردن ابعاد شبکه، تغییرات قابل ملاحظه ای در جواب ها ایجاد نمی شود. با توجه به این مطلب و نیز تفاوت بسیار زیاد زمان محاسبات در صورت کاهش ابعاد شبکه بندی، شبکه با ابعاد ۱ سانتی متر برای انجام مدلسازی های در این مطالعه مورد استفاده قرار گرفته است.



شکل (۵-۱۰): تاثیر ابعاد مختلف شبکه بندی در مقادیر سرعت متوسط به ازای دبی ۰/۰۷۵ مترمکعب بر ثانیه

### ۵-۳-۴ واسنجی نرم افزار

همانطور که در فصل چهارم اشاره شد مدل عددی بکارگیری شده قابلیت حل معادلات جریان توسط مدل های مختلف آشفتگی را دارا می باشد که با توجه به ماهیت هر مسئله می بایست بهترین مدل انتخاب گردد. برای شبیه سازی سرعت متوسط جریان با دبی ۰/۰۷۵ مترمکعب بر ثانیه از مدل های آشفتگی  $k - \epsilon$  و RNG استفاده شد و مطابق شکل ۵-۱۱ مشاهده گردید که هر دو مدل جواب های نزدیک به مدل آزمایشگاهی و تقریباً مشابه با یکدیگر ارائه می دهند. لذا از آنجاکه مدل RNG به واسطه داشتن ترم اضافی در معادله  $\epsilon$ ، برای تحلیل جریان های سریعاً کرنش یافته و جریان های بر روی سطوح با انحنای زیاد بهبود یافته است و نیز توانایی بالای آن در شبیه سازی جریان های گذرا، این مدل برای ادامه این تحقیق مورد استفاده قرار گرفته است.



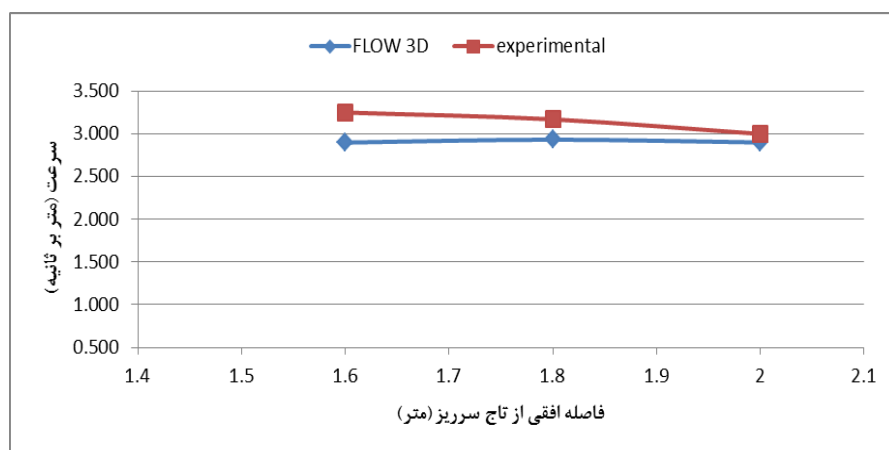
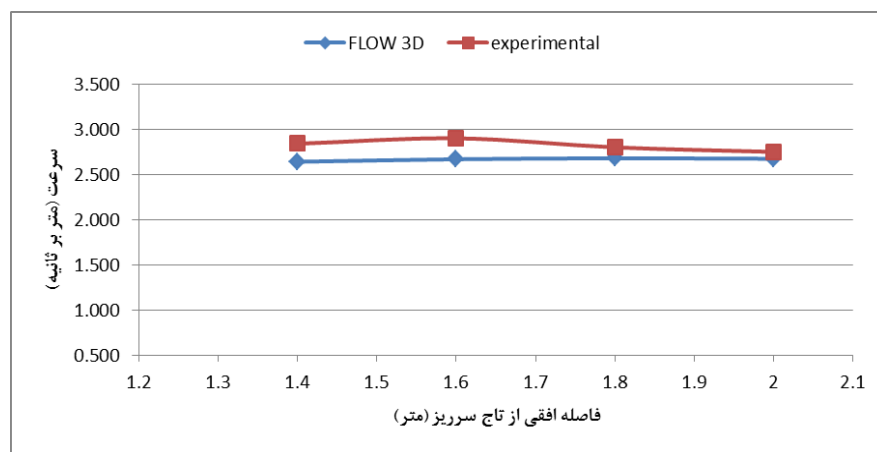
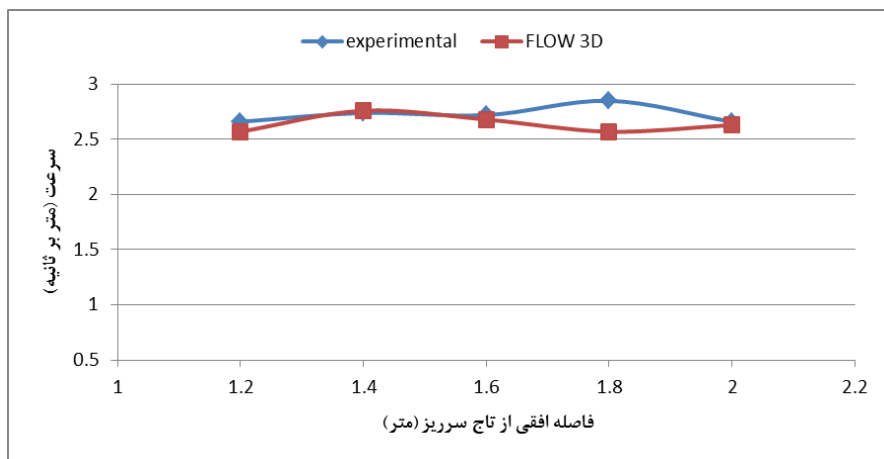
شکل (۵-۱۱): پروفیل سرعت متوسط برای دبی ۰/۰۷۵ مترمکعب بر ثانیه با مدل‌های مختلف آشفتگی

### ۵-۳-۵ صحت‌سنجی مدل عددی

با توجه به اهمیت ویژه موضوع انتخاب ابزار در مطالعات عددی و جلوگیری از صرف زمان و هزینه اضافی و جلوگیری از هرگونه دوباره‌کاری، پس از کنترل‌های اولیه و انتخاب شرایط حاکم بر محیط حل (تعیین مدل آشفتگی، نوع شبکه‌بندی و ...) بررسی‌های دقیق‌تر با رویکرد مقایسه با داده‌های موجود در پروژهای واقعی و یا آزمایشگاهی ضروری به نظر می‌رسد، لذا در ادامه با شبیه‌سازی مدل آزمایشگاهی، سرعت، عمق و فشار در در دبی‌های ۰/۰۷۵، ۰/۰۹ و ۰/۱۱۳ مترمکعب بر ثانیه را مورد مطالعه قرار داده و با داده‌های موجود صحت سنجی می‌نماییم.

### ۵-۳-۵-۱ مقادیر سرعت متوسط

با حرکت در راستای مسیر جریان بر روی سرریز با روند افزایش نسبی سرعت متوسط به علت تبدیل بار ارتفاعی به بار سرعت مواجه می‌باشیم، این روند تا رسیدن به پایاب ادامه داشته و در آنجا به دلیل تغییر روند جریان و عمق موجود با مقداری کاهش روبرو می‌شویم. این روند برای دبی‌های ۰/۰۷۵، ۰/۰۹ و ۰/۱۱۳ مترمکعب بر ثانیه برای مدل عددی و آزمایشگاهی در شکل ۵-۱۲ نشان داده شده است.



شکل (۵-۱۲): مقایسه پروفیل طولی سرعت متوسط بین داده‌های آزمایشگاهی و نتایج عددی در لبه پله‌ها

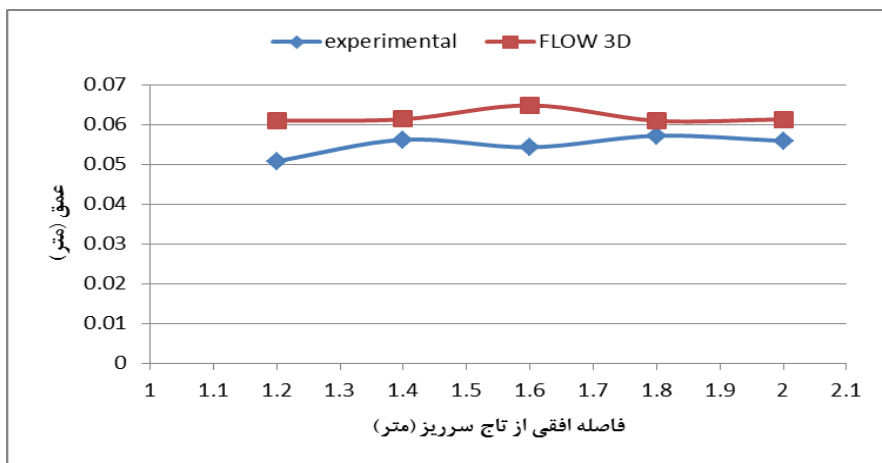
مقادیر نمودارهای فوق و میزان خطای موجود در جدول ۵-۱ ارائه شده است. همانطور که ملاحظه می‌گردد حداکثر میزان اختلاف موجود به میزان حدود ۱۱ درصد می‌باشد که در حد قابل قبول بوده و شباهت مناسبی میان نتایج حاصل از شبیه‌سازی عددی و داده‌های آزمایشگاهی وجود دارد.

جدول (۵-۱): مقادیر عددی و آزمایشگاهی سرعت متوسط در راستای طولی در لبه پله‌ها

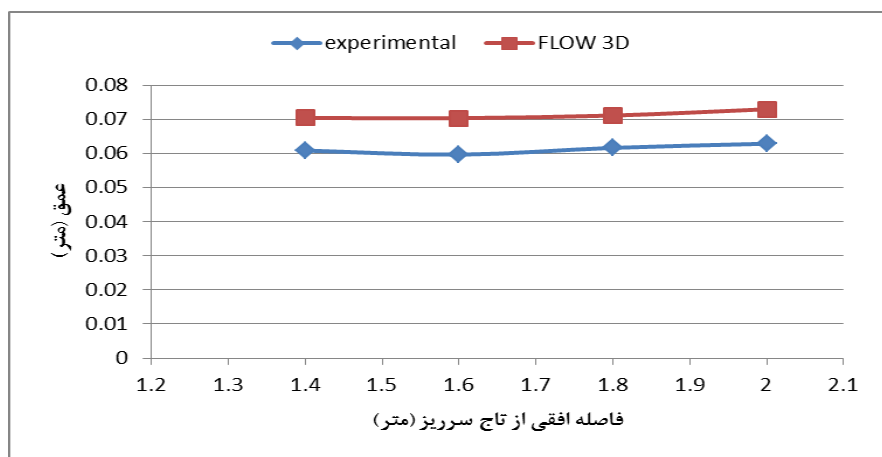
خطا (درصد)	سرعت متوسط (متر بر ثانیه)		شماره پله	دبی (مترمکعب بر ثانیه)
	CFD	exp		
۹,۵	۲,۵۷	۲,۸۴	۶	۰,۰۷۵
۷,۳	۲,۷۶	۲,۵۷	۸	
۰,۷۵	۲,۶۸	۲,۶۶	۸	
۱,۹۸	۲,۵۷	۲,۵۲	۹	
۱,۹۳	۲,۶۳	۲,۵۸	۱۰	
۷,۰۴	۲,۶۴	۲,۸۴	۷	۰,۰۹
۷,۹۳	۲,۶۷	۲,۹	۸	
۴,۲۸	۲,۶۸	۲,۸	۹	
۲,۹	۲,۶۷	۲,۷۵	۱۰	
۱۰,۷۶	۲,۹	۳,۲۵	۸	۰,۱۱۳
۷,۵۷	۲,۹۳	۳,۱۷	۹	
۳,۳۳	۲,۹	۳	۱۰	

### ۵-۳-۵-۲ مقادیر عمق جریان

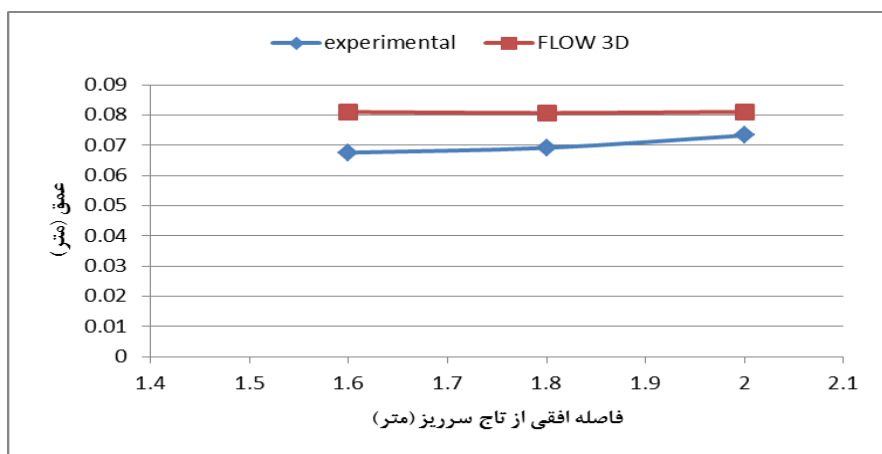
جریان بر روی سرریز پلکانی شامل نواحی مختلف می‌باشد. این نواحی را می‌توان به سه بخش متغیر سریع، متغیر تدریجی و یکنواخت تقسیم نمود، و به همین دلیل پارامترهای جریان تا قبل از محدوده جریان یکنواخت دارای مقادیر مختلف می‌باشند. از جمله این مقادیر، عمق جریان می‌باشد که دارای مقادیر متفاوت تا قبل از ناحیه جریان یکنواخت است، البته روند نسبی کاهش عمق با حرکت جریان در راستای سرریز و افزایش سرعت تا قبل از رسیدن به پایاب قابل پیش‌بینی می‌باشد. در شکل ۵-۱۳ مقادیر عمق جریان حاصل از روش عددی و آزمایشگاهی مشاهده می‌گردد.



الف) دبی ۰/۰۷۵ مترمکعب بر ثانیه



ب) دبی ۰/۰۹ مترمکعب بر ثانیه



ج) دبی ۰/۱۱۳ مترمکعب بر ثانیه

شکل (۵-۱۳): مقایسه عمق جریان بین داده‌های آزمایشگاهی و نتایج عددی در لبه پله‌ها

مقادیر عمق‌های جریان در نمودارهای فوق و میزان خطای موجود در جدول ۵-۲ ارائه شده است. همانطور که ملاحظه می‌گردد حداکثر میزان اختلاف موجود به میزان ۲۰ درصد می‌باشد که تقریباً در حد قابل قبول بوده و شباهت تقریباً مناسبی میان نتایج حاصل از شبیه‌سازی عددی و داده‌های آزمایشگاهی وجود دارد. البته اینکه این اختلاف به خطای مدل عددی نسبت داده شود جای ابهام دارد، زیرا مطالعات آزمایشگاهی نیز خود در بردارنده خطاهایی می‌باشد که در جای خود باید مورد ارزیابی قرار گیرد.

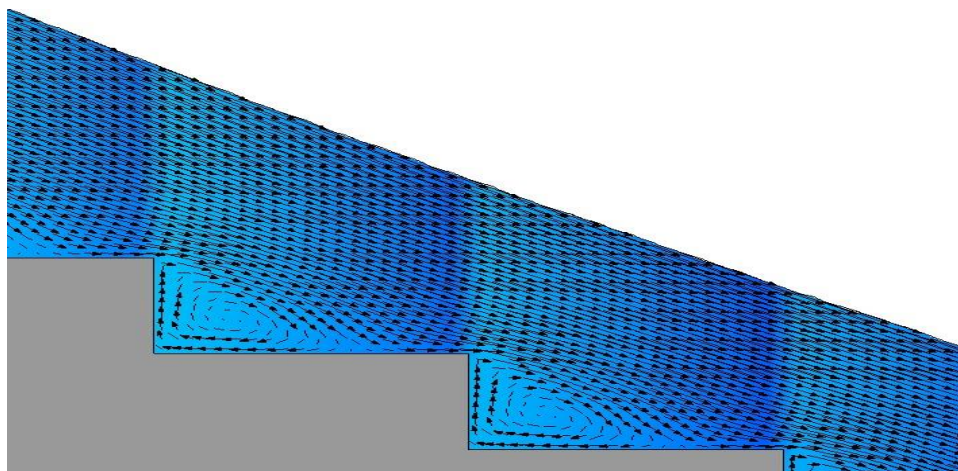
جدول (۵-۲): مقادیر عددی و آزمایشگاهی عمق جریان در لبه پله‌ها

خطا (درصد)	عمق جریان (متر)		شماره پله	دبی (مترمکعب بر ثانیه)
	CFD	exp		
۲۰	۰,۰۶	۰,۰۵	۶	۰,۰۷۵
۹,۱۷	۰,۰۶۱	۰,۰۵۶	۸	
۱۹,۴	۰,۰۶۴	۰,۰۵۴	۸	
۶,۶	۰,۰۶	۰,۰۵۷	۹	
۹,۷۱	۰,۰۶۱	۰,۰۵۵	۱۰	
۱۵,۷	۰,۰۷	۰,۰۶	۷	۰,۰۹
۱۷,۹	۰,۰۷	۰,۰۵۹	۸	
۱۵,۳	۰,۰۷۱	۰,۰۶۱	۹	
۱۶,۱	۰,۰۷۳	۰,۰۶۲	۱۰	
۱۹,۹	۰,۰۸۱	۰,۰۶۷۶	۸	۰,۱۱۳
۱۶,۷	۰,۰۸	۰,۰۶۹۲	۹	
۱۰,۶	۰,۰۸۱	۰,۰۷۳۳	۱۰	

### ۵-۳-۳-۵ مقادیر فشار بیشینه

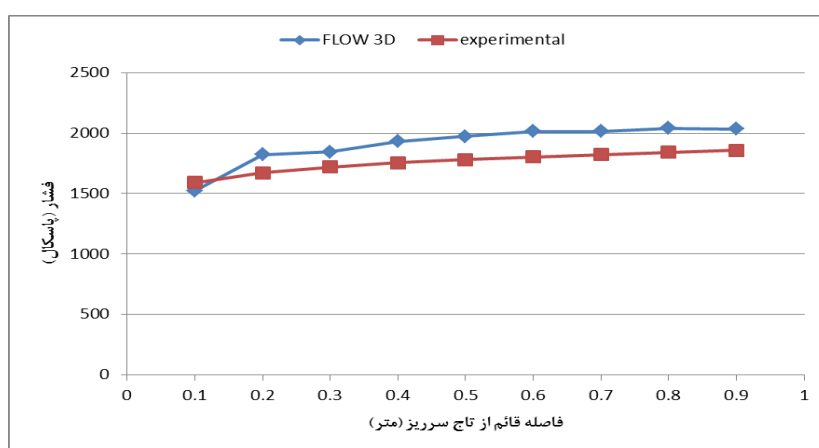
در بخش‌های گذشته مطابق نتایج مطالعات آزمایشگاهی عنوان گردید که حداکثر مقادیر فشار بر روی سرریز در وجوه افقی پله‌ها رخ می‌دهد. در این راستا طی انجام شبیه‌سازی عددی مشاهده گردید که در طرفین نقطه‌ای روی این وجوه جریان دارای حرکت در جهات مختلف بوده که این موضوع سبب

ایجاد نقطه توقف<sup>۵۸</sup> و ایجاد فشار بیشینه می‌گردد. این محل بخوبی در شکل ۱۴-۵ قابل مشاهده می‌باشد.



شکل (۱۴-۵): نمایی از محل ایجاد نقاط توقف در وجوه افقی پله‌ها در سرریز پلکانی

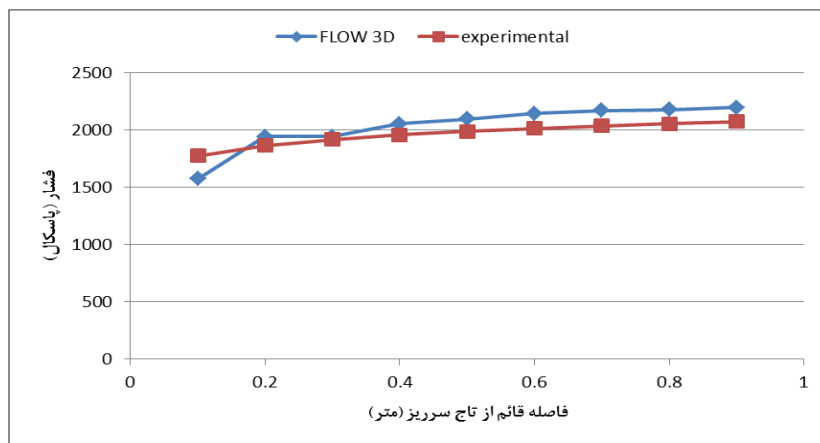
در بخش ۷-۳ نتایج مطالعات آزمایشگاهی چیناراسری در خصوص محاسبه مقادیر فشار حداکثر در قالب رابطه ۳-۳۸ بیان گردید. در ادامه نتایج حاصل از مدل عددی و مقادیر حاصل از رابطه مذکور در شکل ۱۵-۵ برای دبی‌های ۰/۰۷۵ و ۰/۰۹ مترمکعب بر ثانیه نشان داده شده است.



الف) دبی ۰/۰۷۵ مترمکعب بر ثانیه

<sup>58</sup> Stagnation Point





ب) دبی ۰/۰۹ مترمکعب بر ثانیه

شکل (۵-۱۵): مقایسه فشار حداکثر بین داده‌های آزمایشگاهی و نتایج عددی در وجوه افقی پله‌ها

مقادیر فشار در نمودارهای فوق و میزان خطای موجود در جدول ۳-۵ ارائه شده است. همانطور که ملاحظه می‌گردد حداکثر میزان اختلاف موجود در حدود ۱۱ درصد و در حد قابل قبول بوده و شباهت خوبی میان نتایج حاصل از شبیه‌سازی عددی و داده‌های آزمایشگاهی وجود دارد. البته در خصوص اختلاف موجود می‌توان گفت که با توجه به اینکه روش VOF، در عمل بصورت تک فازه عمل می‌کند، از حالت دوفازی تنها برای محاسبه سطح آزاد سیال استفاده می‌کند. این روش هوا را تنها به سطوح سیال وارد می‌کند و در رساندن هوا به عمق سیال (آنچه اتفاق می‌افتد) دچار مشکل می‌شود. علت این مسئله این است که روش VOF قادر به شبیه‌سازی حباب‌های هوای ایجاد شده نیست و با استفاده از معادلات مطرح شده در بخش ۴-۵ به محاسبه ورود هوا می‌پردازد و از تعادل بین نیروهای کشش سطحی آب و نیروی ناشی از آشفتگی و نیز تغییرات چگالی ناشی از ورود هوا، برای تعیین سطح آزاد سیال استفاده می‌کند. با توجه به نمودارهای توزیع فشار در شکل شماره ۵-۱۵، ضعف روش VOF در مدل کردن ورود هوا به جریان در توزیع فشار خودنمایی می‌کند. با توجه به اینکه در مدل فیزیکی ورود هوا به جریان باعث افزایش جزئی عمق جریان در کانال می‌شود، عدم توانایی روش VOF در شبیه‌سازی ورود هوا، باعث برآورد کمتر فشار شده است. البته مقدار قابل

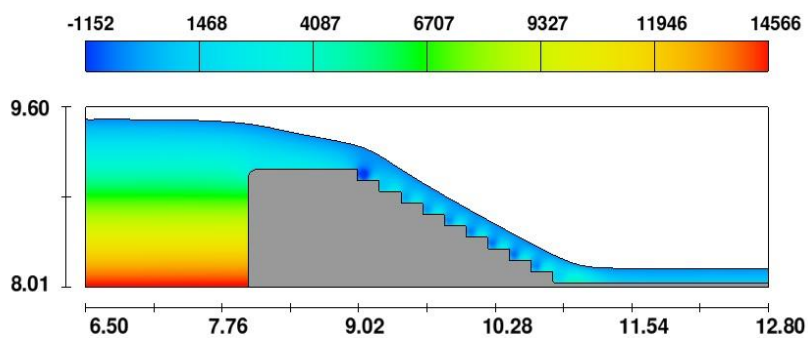
توجهی از این اختلاف، ناشی از خطای ایجاد شده در مدل عددی به واسطه ضعف مدل‌های آشفتگی می‌باشد.

جدول (۳-۵): مقادیر عددی و آزمایشگاهی فشار بیشینه در وجوه افقی پله‌ها

خطا (درصد)	فشار بیشینه (پاسکال)		شماره پله	دبی (مترمکعب بر ثانیه)
	CFD	exp		
۴,۲	۱۵۲۳	۱۵۹۱	۱	۰,۰۷۵
۹	۱۸۲۱	۱۶۷۰	۲	
۷,۲۵	۱۸۴۳	۱۷۱۸	۳	
۱۰,۱۴	۱۹۳۱	۱۷۵۳	۴	
۱۰,۷۶	۱۹۷۳	۱۷۸۱	۵	
۱۱,۶۵	۲۰۱۴	۱۸۰۴	۶	
۱۰,۴	۲۰۱۳	۱۸۲۳	۷	
۱۰,۸۲	۲۰۴۰	۱۸۴۱	۸	
۹,۶	۲۰۳۴	۱۸۵۶	۹	
۰,۰۱۱	۱۵۷۱	۱۷۷۴	۱	۰,۰۹
۴,۱۴	۱۹۴۰	۱۸۶۳	۲	
۱,۲۶	۱۹۴۱	۱۹۱۶	۳	
۴,۹۱	۲۰۵۱	۱۹۵۵	۴	
۵,۴۶	۲۰۹۵	۱۹۸۶	۵	
۶,۴۳	۲۱۴۱	۲۰۱۲	۶	
۶,۶۱	۲۱۶۸	۲۰۳۳	۷	
۶,۰۷	۲۱۷۷	۲۰۵۲	۸	
۶,۰۵	۲۱۹۵	۲۰۶۹	۹	

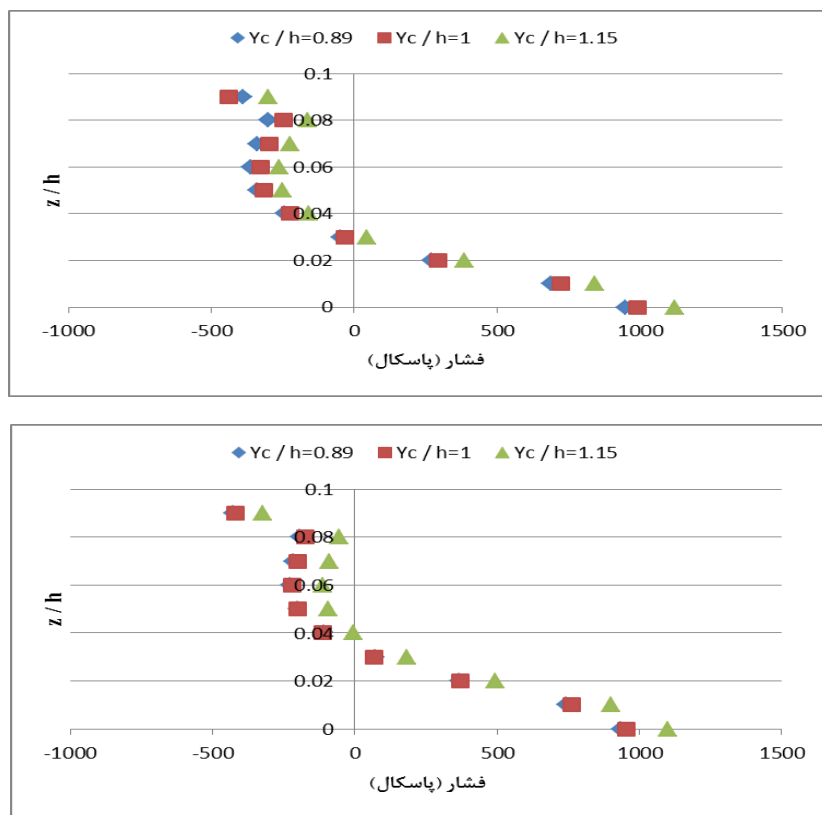
### ۳-۵-۴ مقادیر فشار کمینه

طی بررسی نتایج حاصل از شبیه‌سازی عددی مشاهده گردید که کمینه مقادیر فشار بر روی سرریز، روی وجوه قائم پله‌ها بدلیل سرعت زیاد گردابه‌ها در این نواحی رخ می‌دهد، این موضوع بخوبی در شکل ۱۶-۵ قابل مشاهده می‌باشد.



شکل (۵-۱۶): نمایی از نواحی مختلف میدان فشار بر سرریزپلکانی

در ادامه مقادیر فشار در وجوه قائم دو پله برای دبی‌های ۰/۰۷۵، ۰/۰۹ و ۰/۱۱۳ در شکل ۵-۱۷ ارائه شده است. مشاهده می‌گردد که روند بدست آمده در این اشکال مشابهت بسیار نزدیکی با نتایج حاصل از مطالعات آزمایشگاهی آمادر و همکاران [۲۷]، که در شکل ۳-۱۶ ارائه شد، دارد.



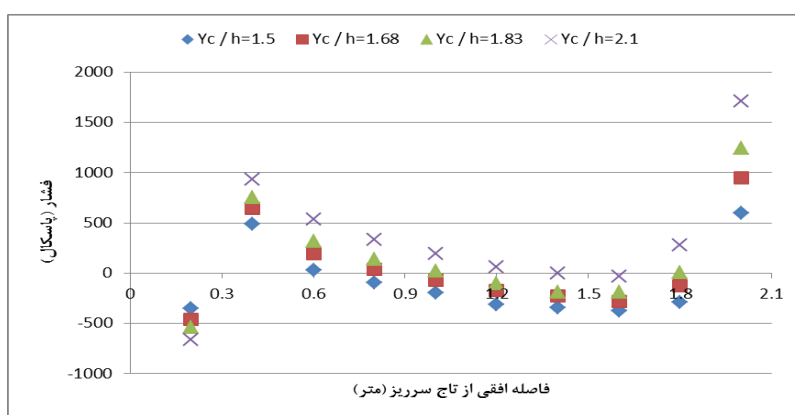
شکل (۵-۱۷): فشار در وجوه قائم دو پله از یک سرریز برای دبی‌های مختلف

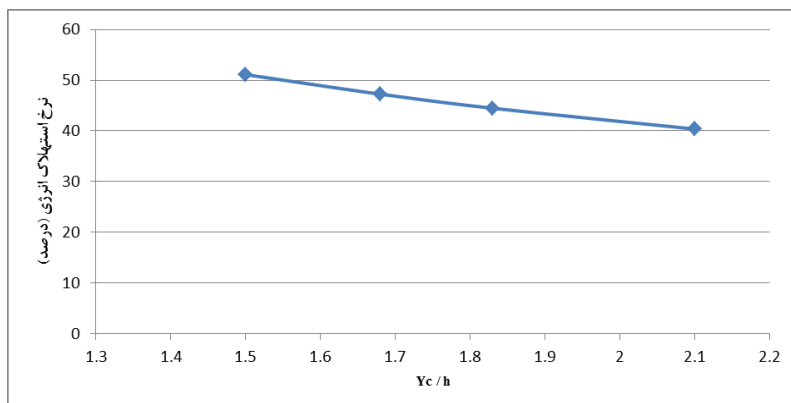
## ۴-۵ بررسی اثر تغییرات پارامترهای موثر بر رفتار سرریزهای پلکانی

پس از صحت‌سنجی و کسب اطمینان از قابلیت نرم‌افزار FLOW 3D در شبیه‌سازی سرریزهای پلکانی و تعیین شرایط حاکم بر مسئله از قبیل مدل آشفتگی، شرایط مرزی و ... می‌توان به مطالعه و بررسی درخصوص موضوع اصلی این تحقیق پرداخت. در این بخش اثر ایجاد تغییرات در پارامترهای هندسی و هیدرولیکی مانند شیب سرریز، تعداد پله‌ها، ابعاد پله‌ها و دبی بر میزان استهلاک انرژی و مقادیر فشارهای حداقل (با تکیه بر مقادیر فشارهای منفی بعنوان عاملی برای وقوع کاویتاسیون)، توسط مدل عددی مورد ارزیابی و بررسی قرار خواهد گرفت. (با توجه به توضیحات بخش قبل مقادیر فشارهای کمینه در وجوه قائم پله‌ها مورد ارزیابی واقع شده است).

### ۴-۵-۱ اثر دبی بر رفتار سرریزهای پلکانی

در این بخش، مدل پلکانی شامل ۱۰ پله به ارتفاع ۰/۱ و عرض ۰/۲ متر برای بررسی اثر تغییرات دبی بر میزان استهلاک انرژی و همچنین مقادیر فشارهای حداقل، با ۴ دبی ۰/۱۶۱، ۰/۱۹۳، ۰/۲۱۷ و ۰/۲۶۲ مترمکعب بر ثانیه مورد بررسی قرار گرفته است (از آنجا که در جریان رویه‌ای شرایط بگونه‌ای است که هواگیری پس از طی مسافتی از تاج سرریز آغاز می‌گردد و باتوجه به احتمال افزایش خطر وقوع کاویتاسیون در لایه‌های زیرین جریان بدون حضور هوا، در این تحقیق تمام دبی‌های انتخاب شده در راستای ایجاد این نوع جریان بوده است). نتایج این مقایسه در شکل ۵-۱۸ ارائه شده است.





شکل (۵-۱۸): مقایسه اثر تغییرات دبی بر میزان استهلاک انرژی و مقادیر فشارهای حداقل

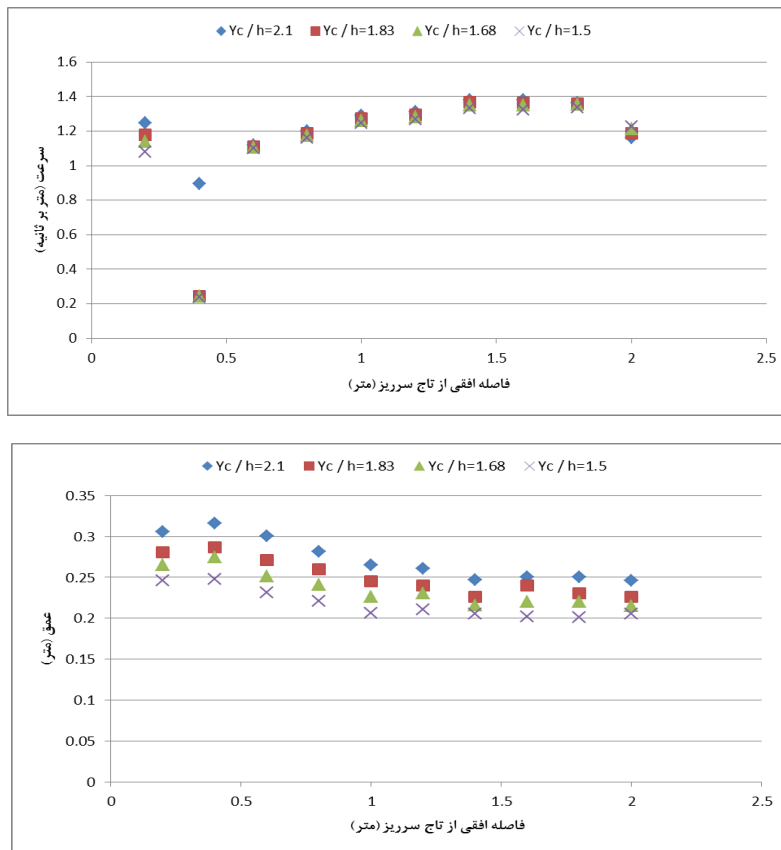
مقادیر کمترین فشار و همچنین نرخ استهلاک انرژی در هر یک از مقادیر دبی در جدول ۴-۵ ارائه شده است

جدول (۴-۵): نرخ استهلاک انرژی و کمترین مقدار فشار در دبی‌های مختلف

دبی (مترمکعب بر ثانیه)	فشار حداقل (پاسکال)	نرخ استهلاک انرژی (درصد)
۰.۱۶۱	-۳۷۶	۵۱.۱
۰.۱۹۳	-۲۸۴	۴۷.۲۶
۰.۲۱۷	-۱۸۸	۴۴.۴۸
۰.۲۶۲	-۳۵	۴۰.۳۷

با توجه به مطالب فوق می‌توان اظهار داشت که افزایش دبی، باعث کاهش نرخ استهلاک انرژی و همچنین کاهش احتمال وقوع خطر کاویتاسیون می‌گردد. در خصوص مورد اول می‌توان علت را اینطور بیان نمود که، عامل اصلی استهلاک انرژی در طول این نوع سرریز شکل پله‌ها و زبری مصنوعی ایجاد شده در زیر جریان می‌باشد. حال آنکه افزایش دبی موجب افزایش عمق جریان و کاهش اثرات این زبری در خصوص لایه‌های رویی جریان می‌گردد، لذا می‌توان افزایش دبی را بعنوان عامل منفی در خصوص نرخ استهلاک انرژی جریان عنوان نمود. همچنین با افزایش دبی انتظار می‌رود که سرعت جریان در طول سرریز افزایش یافته و در اثر تبادل ممنتوم، سرعت گردابه‌ها نیز افزایش

یابد، از اینرو بنابر روابط هیدرودینامیکی، کاهش فشار اجتناب ناپذیر می‌باشد. ولی همانطور که اشاره شد افزایش دبی موجب افزایش عمق جریان شده و ایجاد فشارهای بزرگ استاتیکی تا حد زیادی بر کاهش فشار ایجاد شده در اثر سرعت غلبه می‌نماید. اثر افزایش دبی در مقادیر سرعت و عمق جریان بخوبی در شکل ۵-۱۹ نمایان می‌باشد.

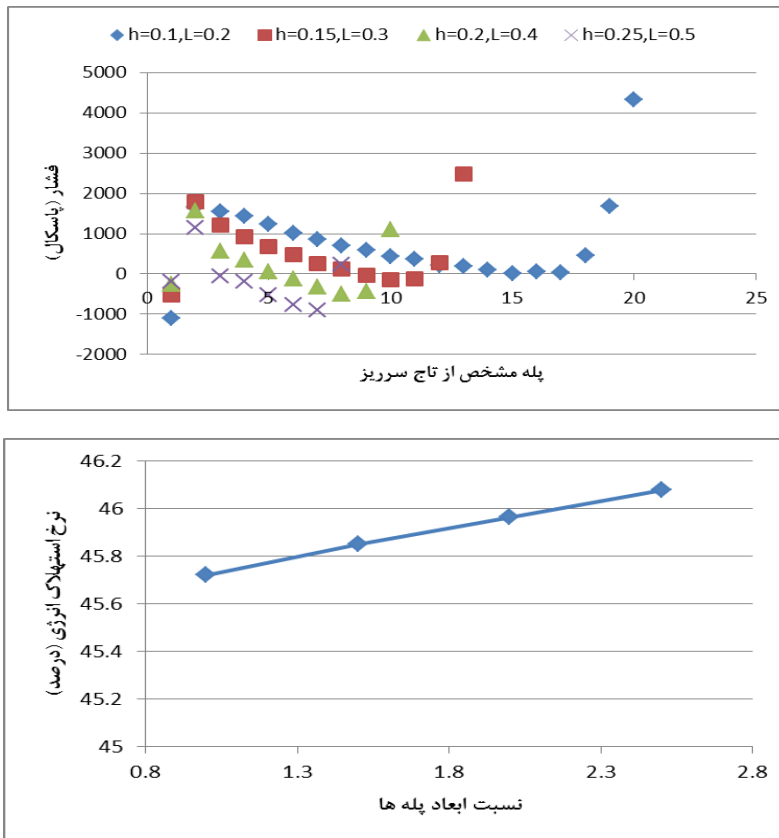


شکل (۵-۱۹): مقایسه اثرات تغییر دبی بر مقادیر سرعت و عمق جریان در محل وقوع مقادیر حداقل فشار

## ۵-۴-۲ اثر ابعاد پله‌ها بر رفتار سرریزهای پلکانی

از آنجاکه عملکرد متفاوت سرریزهای پلکانی در مقایسه با سایر سرریزها، ناشی از شکل متمایز و پله-های موجود در سطح آن می‌باشد، لذا تغییر ابعاد پله‌ها می‌تواند در رفتار این سرریزها تاثیرگذار باشد. برای بررسی این موضوع، مدل شامل پله به ارتفاع ۰/۱ و عرض ۰/۲ متر در نظر گرفته شد و تغییر

ابعاد با نسبت‌های  $1/5$ ،  $2$  و  $2/5$  برابر به پله‌ها اعمال گردید. تمامی این مدل‌ها با طول سرریز و دبی یکسان مورد بررسی قرار گرفت که نتایج آن در شکل ۵-۲۰ قابل مشاهده می‌باشد.



شکل (۲۰-۵): مقایسه اثر تغییر ابعاد پله‌ها بر میزان استهلاك انرژی و مقادیر فشارهای حداقل

مقادیر کمترین فشار و همچنین نرخ استهلاك انرژی در هریک از مقادیر نسبت ابعاد پله‌ها در جدول ۵-۵ ارائه شده است.

جدول (۵-۵): نرخ استهلاک انرژی و کمترین مقدار فشار در نسبت‌های متفاوت ابعاد پله

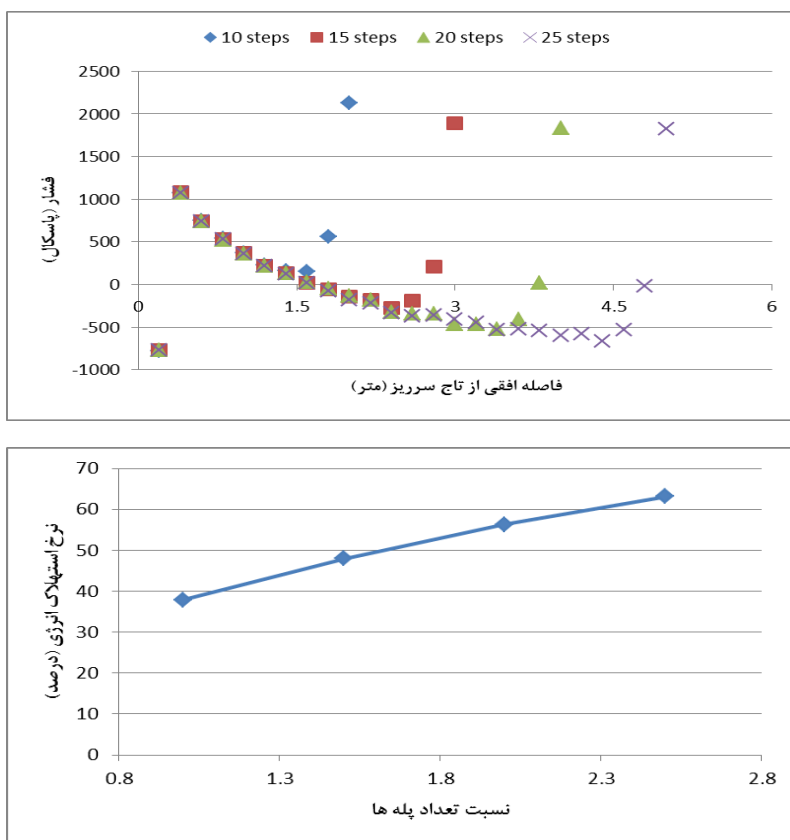
نسبت ابعاد پله ها	فشار حداقل (پاسکال)	نرخ استهلاک انرژی (درصد)
۱	۴۲.۵۷	۴۵.۷۱
۱.۵	-۱۵۶.۷۵	۴۵.۸۵
۲	-۴۹۴.۶۳	۴۵.۹۶
۲.۵	-۹۱۰.۲۹۱	۴۶.۰۸

با توجه به مطالب فوق می‌توان اظهار داشت که افزایش ابعاد پله‌ها، باعث افزایش نرخ استهلاک انرژی و همچنین افزایش احتمال وقوع خطر کاپیتاسیون می‌گردد. در خصوص استهلاک انرژی می‌توان افزایش سطح تماس موجود در بین جریان اصلی و جریان‌های درون گردابه‌ای را علت اصلی این موضوع دانست که البته با توجه به نتایج، تاثیر آن بسیار ناچیز می‌باشد. با افزایش ابعاد پله‌ها، ابعاد گردابه‌های درون پله‌ای نیز افزایش یافته که به دلیل شعاع چرخش بزرگتر و همچنین تبادل ممنتوم بیشتر با جریان اصلی، مقادیر بزرگتر سرعت و بالتبع کاهش شدید فشار را منجر می‌گردد.

### ۵-۴-۳ اثر تعداد پله‌ها بر رفتار سرریزهای پلکانی

بعضاً با توجه به شرایط محیط طرح و الزامات پروژه می‌توان در یک شیب مشخص، سرریز با ترکیب‌های متفاوت از تعداد پله‌ها را اجراء نمود، لذا انجام مطالعه و بررسی در این خصوص ضروری به نظر می‌رسد. از اینرو سرریز با شیب ۲۶/۶ درجه و پله‌های به ارتفاع ۰/۱ و عرض ۰/۲ متر برای انجام شبیه‌سازی، با ترکیب‌های متفاوت از تعداد ۱۰، ۱۵، ۲۰ و ۲۵ پله انتخاب گردید. نتایج این مقایسه برای دبی ۰/۳۰۸ مترمکعب در ثانیه در شکل ۵-۲۱ ارائه شده است.





شکل (۵-۲۱): مقایسه اثر تغییر تعداد پله‌ها بر میزان استهلاک انرژی و مقادیر فشارهای حداقل

مقادیر کمترین فشار و همچنین نرخ استهلاک انرژی در هریک از مقادیر تعداد پله‌ها در جدول ۵-۶ ارائه شده است.

جدول (۵-۶): نرخ استهلاک انرژی و کمترین مقدار فشار در نسبت‌های متفاوت تعداد پله

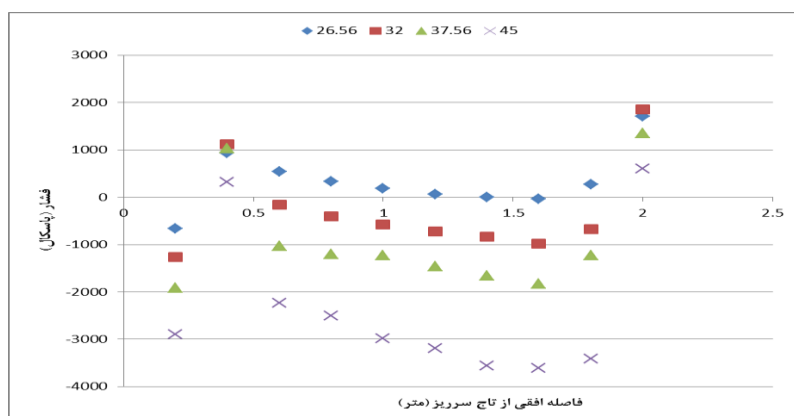
نسبت تعداد پله‌ها	فشار حداقل (پاسکال)	نرخ استهلاک انرژی (درصد)
۱	۱۴۹.۷	۳۷.۸۵
۱.۵	-۲۷۷.۳	۴۸.۰۱
۲	-۵۱۹	۵۶.۲۸
۲.۵	-۶۶۵.۱	۶۳.۱۳

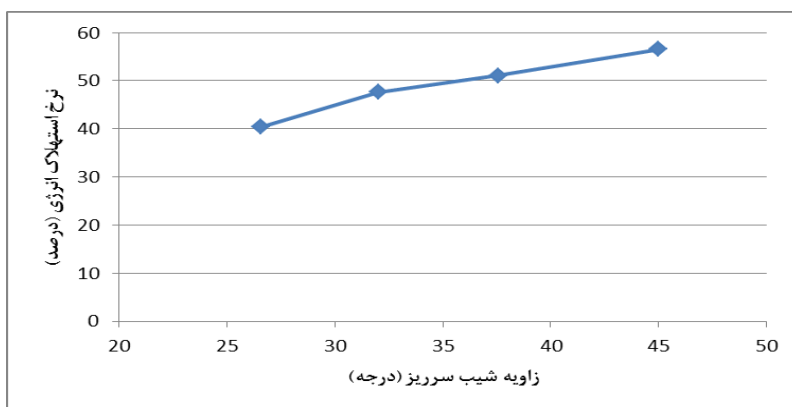
با توجه به مطالب فوق می‌توان اظهار داشت که افزایش تعداد پله‌ها، باعث افزایش نرخ استهلاک انرژی و همچنین افزایش احتمال وقوع خطر کایتاسیون می‌گردد، در هر دو مورد افزایش طول مسیر جریان را می‌توان بعنوان عامل اصلی این تغییر عنوان نمود. در خصوص استهلاک انرژی افزایش تعداد پله‌ها

سبب می‌گردد تا جریان در مسیر حرکت خود با زبری بیشتر مواجه شده و در اثر این حرکت همراه با اصطکاک مقدار بیشتری از انرژی جریان مستهلک گردد. افزایش طول مسیر حرکت در سطح شیبدار امکان رسیدن به سرعت‌های بالاتر را برای جریان فراهم می‌نماید، که با توجه به تبادل ممنتوم موجود میان جریان اصلی و جریان‌های درون حفره‌ای، سرعت گردابه‌ها نیز افزایش می‌یابد. این افزایش سرعت مطابق روابط هیدرودینامیکی موجب افت فشار در مناطق مجاور گردابه‌ها می‌گردد.

#### ۴-۴-۵ اثر شیب بر رفتار سرریزهای پلکانی

با مروری بر روابط هیدرولیکی موجود می‌توان دریافت که شیب از پارامترهای بسیار تاثیرگذار در رفتار سازه‌های هیدرولیکی می‌باشد، از این رو در مطالعه رفتار سرریزها که عمدتاً سازه‌های با شیب کلی و یا شیب موضعی می‌باشند، بررسی این عامل ضروری به نظر می‌رسد. در این راستا سرریزپلکانی شامل ۱۰ پله با ۴ شیب مختلف ۲۶/۶، ۳۲، ۳۷/۶ و ۴۵ درجه و دبی ۰/۲۶۳ مترمکعب برثانیه مورد ارزیابی قرار گرفت که نتایج این مقایسه در شکل ۵-۲۲ مشاهده می‌گردد.





شکل (۵-۲۲): مقایسه اثر تغییر شیب سرریز بر میزان استهلاک انرژی و مقادیر فشارهای حداقل

مقادیر کمترین فشار و همچنین نرخ استهلاک انرژی در هریک از مقادیر شیب سرریز در جدول ۵-۷ ارائه شده است.

جدول (۵-۷): نرخ استهلاک انرژی و کمترین مقدار فشار در شیب‌های مختلف سرریز

شیب سرریز (درجه)	فشار حداقل (پاسکال)	نرخ استهلاک انرژی (درصد)
۲۶.۶	-۳۵	۴۰.۳۷
۳۲	-۹۸۶	۴۷.۶۵
۳۷.۶	-۱۸۲۹	۵۱.۱
۴۵	-۳۶۱۱	۵۶.۵۴

با توجه به مطالب فوق می‌توان اظهار داشت که افزایش شیب سرریز، باعث افزایش نرخ استهلاک انرژی و همچنین افزایش احتمال وقوع خطر کاویتاسیون می‌گردد. عمده استهلاک انرژی در سرریزهای پلکانی بعلت تنش برشی و اصطکاک موجود بین جریان اصلی و جریان‌های درون حفره‌ای و حفظ تعادل میان این دو جریان رخ می‌دهد. افزایش شیب سرریز موجب افزایش مولفه وزن آب در راستای حرکت جریان می‌گردد که در نتیجه آن تنش برشی موجود در بین جریان‌های مذکور که مطابق اصول هیدرودینامیکی دارای رابطه مستقیم با این مولفه می‌باشد، نیز افزایش می‌یابد. از اینرو و با توجه به مطالب فوق می‌توان عنوان نمود که افزایش شیب موجب افزایش نرخ استهلاک انرژی می‌-

گردد. همچنین افزایش مولفه وزن در راستای حرکت جریان موجب افزایش شتاب و در نتیجه افزایش سرعت جریان اصلی در این راستا می‌گردد، در این شرایط مطابق اصل بقاء ممنتوم سرعت گردابه‌های درون حفره‌ای نیز افزایش یافته که بنابر اصول هیدرودینامیکی کاهش فشار در نقاط مجاور گردابه‌ها اجتناب ناپذیر می‌باشد.

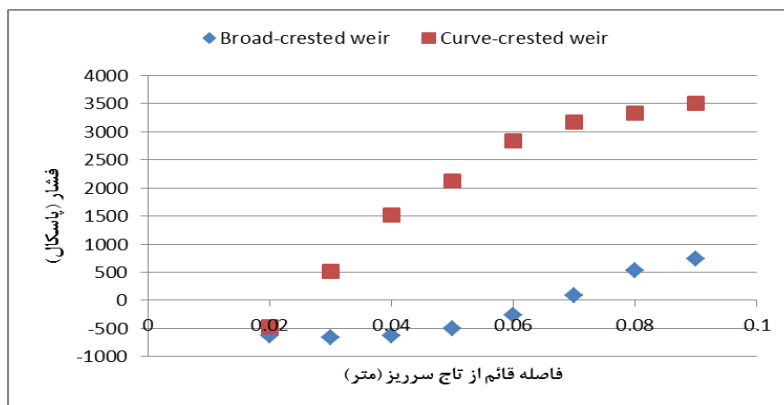
### ۵-۴-۵ مقادیر غیر طبیعی فشار در نقاط ابتدایی و انتهایی

بررسی نمودارهای فشارهای حداقل، مقادیر غیر طبیعی در نقاط ابتدایی (افت شدید) و انتهایی (افزایش) را نشان می‌دهد. با ارزیابی داده‌های حاصل از شبیه‌سازی عددی می‌توان عمق جریان در پایاب را بعنوان عامل افزایش فشار در پله‌های انتهایی بیان نمود، بطور نمونه در سرریز شامل ۱۰ پله به ارتفاع ۰/۱ و عرض ۰/۲ متر، عمق جریان در پایاب، برای دبی ۰/۲۱۷ مترمکعب برثانیه ۰/۲۲ متر بوده که با توجه به ارتفاع پله‌ها دو پله آخر سرریز را تحت تاثیر قرار می‌دهد.

شکل تاج سرریز را می‌توان بعنوان عامل اصلی افت غیرطبیعی فشار در نقاط ابتدایی عنوان نمود. برای بررسی این موضوع دو مدل یکسان از سرریز پلکانی با تاج لبه تیز و منحنی مورد ارزیابی قرار گرفت و مشاهده گردید که در حالت تاج منحنی، مقادیر فشار در پله اول بطور قابل توجهی افزایش می‌یابد (شکل ۵-۲۳). علت این موضوع عدم انطباق منحنی جریان با شکل ورودی سرریز و وقوع پدیده جدایی جریان در حالت تاج لبه تیز می‌باشد. از این رو، استفاده از منحنی استاندارد تاج سرریز (پیشنهاد شده توسط اداره احیاء اراضی ایالات متحده<sup>۵۹</sup>) به دلیل انطباق با شکل جت جریان، برای ساخت مدل‌های واقعی پیشنهاد می‌گردد:

$$X^{1.85} = KH_d^{0.85} Y \quad (۱-۵)$$

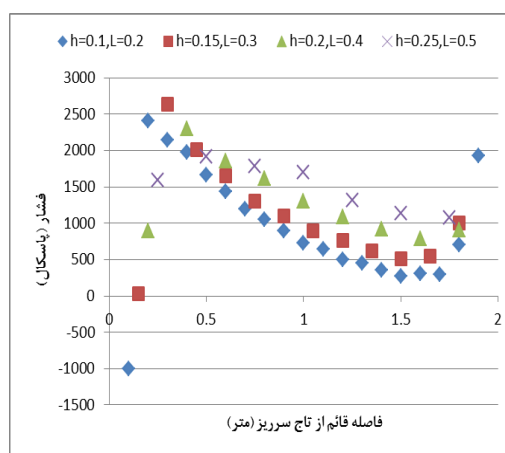
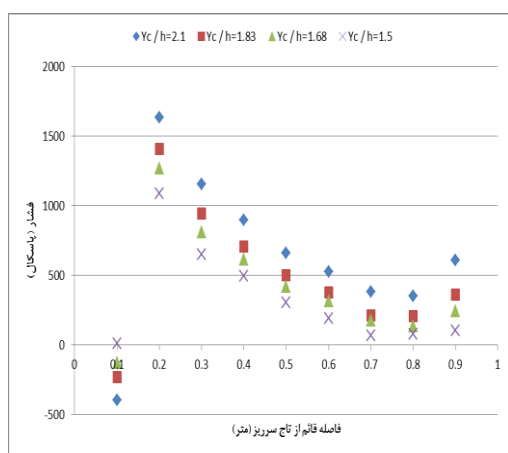
<sup>59</sup> USBR



شکل (۵-۲۳): مقایسه فشار در پله اول، در سرریز پلکانی با تاج لبه تیز و منحنی

### ۵-۴-۶ مقادیر فشار حداقل در وجوه افقی پله‌ها

همانطور که اشاره شد، حداقل مقادیر فشار در سرریزهای پلکانی بر روی وجوه قائم پله‌ها رخ می‌دهد. برای بررسی این موضوع مقادیر حداقل فشار در وجوه افقی پله‌ها در شرایط تغییر دبی و ابعاد پله‌ها در شکل ۵-۲۴ نشان داده شده است. با مقایسه بین نمودارهای موجود می‌توان مشاهده نمود که مقادیر فشار در وجوه افقی بطور قابل ملاحظه‌ای بیشتر از مقادیر موجود در وجوه قائم می‌باشد.



شکل (۵-۲۴): مقادیر حداقل فشار در وجوه افقی پله‌ها با تغییر دبی و ابعاد پله‌ها

## ۵-۵ جمع‌بندی و خلاصه فصل

استفاده از مدل‌های عددی در یک زمینه بخصوص زمانی توجیه‌پذیر می‌باشد که آن مدل قابلیت خود را در پیش‌بینی آن پدیده خاص نشان داده باشد. از همین‌رو صحت‌سنجی مدل‌های عددی همواره اولین و مهم‌ترین گام در یک مطالعه عددی می‌باشد. در این فصل با توجه به داده‌های آزمایشگاهی موجود به صحت‌سنجی مدل عددی پرداخته شد و قابلیت مدل در پیش‌بینی ویژگی‌های هیدرولیکی حاکم بر مسئله مشخص گردید.

با شبیه‌سازی سرریزپلکانی در شرایط مختلف مشاهده گردید، که اعمال تغییرات در پارامترهای موثر هندسی و هیدرولیکی، لزوماً منجر به ایجاد روندی مشابه در رفتار سرریز از لحاظ نرخ استهلاک انرژی و مقادیر حداقل فشار نخواهد شد. بطور کلی می‌توان اظهار داشت که افزایش ابعاد پله‌ها، افزایش تعداد پله‌ها و افزایش شیب سرریز سبب افزایش نرخ استهلاک انرژی و افزایش دبی جریان موجب کاهش نرخ استهلاک انرژی در سرریزهای پلکانی می‌گردد. همچنین با بررسی مقادیر فشار حداقل مشخص گردید که، افزایش ابعاد پله‌ها، افزایش تعداد پله‌ها و افزایش شیب سرریز موجب افزایش احتمال وقوع خطر کاویتاسیون و افزایش دبی سبب کاهش احتمال وقوع خطر کاویتاسیون در سرریزهای پلکانی می‌گردد.

## فصل ششم

### نتیجه‌گیری و پیشنهادات

## ۶-۱ مقدمه

رفتار سرریزهای پلکانی دارای پیچیدگی‌های زیادی می‌باشد، لیکن به دلیل شکل ظاهری متمایز و میزان استهلاک قابل توجه انرژی در طول این سازه‌ها، اکثر تحقیقات صورت گرفته پیرامون آن‌ها صرفاً به بررسی تاثیر عوامل مختلف بر میزان استهلاک انرژی پرداخته‌اند. از این رو مطالعه همه‌جانبه در خصوص این سرریزها ضروری به نظر می‌رسید.

پارامترهای زیادی در رفتار سازه‌های هیدرولیکی موثر می‌باشند، که لازمه بررسی تمامی این موارد صرف زمان و امکانات گسترده می‌باشد. با توجه به اهمیت فشار (بویژه مقادیر فشار منفی بعنوان عاملی جهت وقوع پدیده کاویتاسیون) در میان پارامترهای موثر و محدودیت‌های موجود و همچنین تجربیات موفق گذشته در زمینه دینامیک سیالات محاسباتی، در این تحقیق به مطالعه عددی در خصوص استهلاک انرژی و مقادیر حداقل فشار به‌طور هم‌زمان در سرریزهای پلکانی پرداخته شد، که نتایج آن به شرح ذیل ارائه می‌گردد.

## ۶-۲ نتایج

بررسی نتایج این مطالعه می‌تواند، پاسخگوی برخی از سوال‌های مطرح در خصوص سرریزهای پلکانی باشد:

✓ آیا نرم‌افزار FLOW 3D می‌تواند میدان جریان بر روی سرریزهای پلکانی را به درستی شبیه-

سازی نماید؟

روند مشابه میان نتایج حاصل از شبیه‌سازی عددی و داده‌های موجود (آزمایشگاهی) و وجود اختلاف قابل قبول بین این مقادیر و نیز مشاهده الگوی جریان تشکیل شده بر روی سرریز (حاصل از نرم‌افزار) نشان می‌دهد، در صورتیکه شرایط هندسی و مرزی بطور صحیح به مدل اعمال شود، FLOW 3D می‌تواند میدان جریان بر روی سرریزهای پلکانی را به خوبی مدل نماید.



✓ آیا حداکثر میزان اتلاف انرژی را می‌تواند بعنوان تنها ملاک طراحی سرریزهای پلکانی مدنظر

قرار گیرد؟

مطالعه پارامترهای هندسی و هیدرولیکی نشان می‌دهد، که تغییر این پارامترها در راستای رسیدن به بیشترین نرخ استهلاک انرژی، ممکن است باعث بروز مشکلاتی در عملکرد این سرریزها، از قبیل افزایش احتمال وقوع پدیده کاویتاسیون گردد. از این‌رو انجام مطالعات همه جانبه در هنگام طراحی این سازه‌ها توصیه می‌شود.

✓ افزایش دبی چه تاثیری بر رفتار سرریزهای پلکانی دارد؟

افزایش دبی باعث کاهش نرخ استهلاک انرژی و همچنین کاهش احتمال وقوع خطر کاویتاسیون می‌گردد. افزایش عمق جریان، که در مورد اول موجب کاهش تاثیر زبری پله‌ها بر لایه‌های رویی جریان اصلی و در مورد دوم سبب افزایش فشار استاتیک وارد بر سطوح پله‌ها می‌گردد را، می‌توان به‌عنوان عامل اصلی بیان نمود.

✓ افزایش ابعاد پله‌ها چه تاثیری بر رفتار سرریزهای پلکانی دارد؟

افزایش ابعاد پله‌ها، باعث افزایش نرخ استهلاک انرژی و همچنین افزایش احتمال وقوع خطر کاویتاسیون می‌گردد. در خصوص استهلاک انرژی می‌توان افزایش سطح تماس موجود در بین جریان اصلی و جریان‌های درون گردابه‌ای را علت اصلی این موضوع دانست که البته با توجه به نتایج تاثیر آن بسیار ناچیز می‌باشد. با افزایش ابعاد پله‌ها، ابعاد گردابه‌های درون پله‌ای نیز افزایش یافته که به‌دلیل شعاع چرخش بزرگتر و همچنین تبادل ممنتوم بیشتر با جریان اصلی، مقادیر بزرگتر سرعت و بالتبع کاهش شدید فشار را منجر می‌گردد.

✓ افزایش تعداد پله‌ها چه تاثیری بر رفتار سرریزهای پلکانی دارد؟

افزایش تعداد پله‌ها، باعث افزایش نرخ استهلاک انرژی و همچنین افزایش احتمال وقوع خطر کاویتاسیون می‌گردد. در هر دو مورد افزایش طول مسیر جریان عامل اصلی می‌باشد. در مورد اول

جریان در مسیر حرکت خود با زبری بیشتر مواجه شده و در اثر این حرکت اصطکاکی مقدار بیشتری از انرژی جریان مستهلک می‌گردد. افزایش طول مسیر حرکت در سطح شیبدار امکان رسیدن به سرعت‌های بالاتر را برای جریان فراهم می‌نماید، که با توجه به تبادل ممنتوم موجود میان جریان اصلی و جریان‌های درون حفره‌ای، سرعت گردابه‌ها نیز افزایش می‌یابد. این افزایش سرعت موجب افت فشار در مناطق مجاور گردابه‌ها می‌گردد.

✓ افزایش شیب سرریز چه تاثیری بر رفتار سرریزهای پلکانی دارد؟

افزایش شیب سرریز، باعث افزایش نرخ استهلاک انرژی و همچنین افزایش احتمال وقوع خطر کاویتاسیون می‌گردد. عمده استهلاک انرژی در سرریزهای پلکانی بعلت تنش برشی و اصطکاک موجود در بین جریان اصلی و جریان‌های درون حفره‌ای و حفظ تعادل میان این دو جریان رخ می‌دهد. افزایش شیب سرریز موجب افزایش مولفه وزن آب در راستای حرکت جریان می‌گردد که بالتبع آن تنش برشی و اصطکاک موجود در بین جریان‌های مذکور که مطابق اصول هیدرودینامیکی دارای رابطه مستقیم با این مولفه می‌باشد نیز افزایش می‌یابد. همچنین افزایش مولفه وزن در راستای حرکت جریان موجب افزایش شتاب و در نتیجه افزایش سرعت جریان اصلی در این راستا می‌گردد، در این شرایط سرعت گردابه‌های درون حفره‌ای نیز افزایش یافته که در این شرایط کاهش فشار در نقاط مجاور گردابه‌ها اجتناب ناپذیر می‌باشد.

## ۳-۶ پیشنهادها

- جهت تکمیل و ادامه مطالعه حاضر، تعیین دقیق محل شروع هواگیری و نیز میزان غلظت هوای موجود روی سطوح پله‌ها پیشنهاد می‌گردد.
- مطالعه سرریز با پله به اشکال هندسی مختلف (لبه گرد، شیبدار و ...) بمنظور یافتن طرح بهینه از لحاظ بیشترین میزان نرخ استهلاک و کمترین احتمال وقوع خطر کاویتاسیون پیشنهاد می‌گردد.

- با توجه به رفتار پیچیده گردابه‌ها در جریان رویه‌ای، مطالعه عددی و آزمایشگاهی بویژه در خصوص مکانیزم تبادل میان جریان اصلی و گردابه‌ها ضروری به نظر می‌رسد.
- با توجه به مزایای ویژه سرریزهای پلکانی، پله‌ای نمودن سایر سرریزها از قبیل نیلوفری، سیفونی و ... جهت بهبود عملکرد آنها می‌تواند به‌عنوان موضوعی جهت انجام تحقیقات آینده مورد توجه قرار گیرد.
- با توجه به تغییر علامت فشار و مقادیر نیروهای هیدرو دینامیکی بر روی وجوه قائم پله‌ها، انجام بررسی‌های بیشتر به‌ویژه از لحاظ سازه‌ای در این مقاطع ضروری به نظر می‌رسد.



## فصل هفتم

### منابع و مراجع

[١] Chanson, H. (2013). "Interactions between a Developing Boundary Layer and the Free-Surface on a stepped spillway: Hinze Dam Spillway Operation in January 2013." Proc. 8<sup>th</sup> International Conference on Multiphase Flow ICMF 2013, 26-31 May, Gallery Session ICMF2013-005 (2:15)

[٢] Chanson, H. and Gonzalez, C.A. (2005). "Physical Modelling and Scale Effects of Air-Water Flows on Stepped Spillways". *J. Zhejiang Univ. Science* 6A(3), March, 243-250.

[٣] Chanson H,(1996)."Prediction of the Transition Nappe Skimming Flow on a Step Channel." *Journal of Hydraulic.Res.IAHR.VOL.34,NO.3Page* 421-429

[٤] Qun C., Guangqing D.,and Haowu L. "Volume of Fluid Model for Turbulence Numerical Simulation of Stepped Spillway Over Flow" *Journal of Hydraulic Engineering.,ASCE,Vol 128,No.7.Page:* 683-688

[٥] Gonzalez, C.A. and Chanson, H. (2004). "Interactions between Cavity Flow and Main Stream Skimming Flows: an Experimental Study." *Canadian Journal of Civil Engineering, Vol. 31, No. 1, pp. 33-44*

[٦] افشار ع، نیک صفت غ، طراحی سازه‌های هیدرولیکی سدهای کوچک، دانشگاه علم و صنعت ایران، ۱۳۶۷

[٧] شمسایی ا، پاک نهال ف، (۱۳۸۴) "هیدرولیک شوت‌ها و سرریزهای پلکانی"، تهران، انتشارات دانشگاه صنعتی شریف

[٨] Chanson, H. (1995). "*Hydraulic Design of Stepped Cascades, Channels, Weirs and Spillwas.*" Pregamon, Oxford, UK, Jan., 292 pages

[٩] Chanson, H. 2006. "Air Bubble Entrainment in Hydraulic Jumps." Similitude and Scale Effects. Report No. CH57/05, Department of Civil Engineering, The University of Queensland, Brisbane, Australia. 119pp

[١٠] Robert m.Boes and Willi H.Hager, "Hydraulic Design of Steeped Spillway", *Journal of Hydraulic Engineering, ASCE/September 2003, Vol.129,No.9,pp.671-679*

[١١] Chanson, H. and Toombes, L. (2004), "Hydraulic of Stepped Chutes: The Transition Flow." *Journal of Hydraulic Engineering.Vol 42,No.1.page:*43-54

[١٢] Chanson, H. (1994). "*Hydraulic of Nappe Flow Regime above Stepped Chutes and Spillways.*" Civil Engineering trans.Australia.Vol.CE36,No.1,page:69-76

[١٣] Chanson, H., "*The Hydraulics of Stepped Chutes and Spillways*", A.A.Balkema, Lisse, The Netherlands.2001.

[١٤] Matos, J., Yasuda, Y., and Chanson, H. "Interaction between Free-surface Aeration and Cavity Recirculation in Skimming Flow down Stepped Chutes" Proceeding of 29 th

IAHR Congress, Beijing, China, Theme D, Vol.2, 2001, page 611-617

[١٥] Boes, R. and Hager, W., “Two Phase Flow Characteristics of Stepped Spillways”, *J of Hydraulic Engineering*, Vol.129, No.9, 2003, pp.661-670

[١٦] Bozorg Haddad, O., Sharifi, F. “Genetic Algorithm in Optimum Design of Stepped Spillways and It’s Downstream Energy Dissipators” 73<sup>rd</sup> Annual Meeting of ICOLD, Tehran, Iran, 2005

[١٧] Chanson, H., Toombes, L., “Experimental Investigation of Air Entrainment in Transition and Skimming Flows down a Stepped Chutes.”  
[http://www.Uq.Edu.Au/~e2hchans/reprints/ce158\\_1.pdf](http://www.Uq.Edu.Au/~e2hchans/reprints/ce158_1.pdf)

[١٨] Amador, A., Van der Graaf, G., Sanchez-Juny, M., Dolz, J., Sanchez-Tembleque, F. and Puertas, J., “Characterization of the Flow field in a Stepped Spillway by PIV.”  
[http://in3.dem.Ist.Utl.Pt/lxlaster2004/pdf/paper\\_26\\_2.pdf](http://in3.dem.Ist.Utl.Pt/lxlaster2004/pdf/paper_26_2.pdf)

[١٩] Chinnarasri, C. (2002), “Assessing the Flow Resistance of Skimming Flow on the Step faces of Stepped Spillways.” *Journal of Dam Engineering*. Vol 7, No.4. page:303-321

[٢٠] Chen, Q., Dai, G. and Lin, H., “Volume of Fluid Model for Turbulence Numerical Simulation of Stepped Spillway Overflow.”, *Journal of Hyd. Engineering*, Vol.128, No.7. 2002, pp.683-688

[٢١] Boes, R. and Minor, H.E., “Guidelines for the Hydraulic design of Stepped Spillway Proceeding”. workshop of International on Hydraulics of stepped spillways.

[٢٢] Chanson, H. and Toombes, L., “Strong Interactions between Free-surface Aeration and Turbulence down a Staircase Channel.”, 14<sup>th</sup> Australasian Fluid Mechanics Conference, 10-14 December 2001

[٢٣] Cain, P., “Measurment within Self-aerated Flom on a Large Spillway.”, PHD Thesis, Departman of Civil Engineering, University of Conterbury, Christchurch, Newzeland, 1978

[٢٤] Qun Chen, Guangqing Dai, Haowu Liu. (2002) “Volume of Fluid Model for Turbulence Numerical Simulation of Stepped Spillway Overflow.” *J. Hydraul. Eng.*, 128(7), 683-688

[٢٥] Frantino, U., Amador, A., Valenzano, B., Renna, F.M., Sunchez Juny, M. and Dolz, J., “Air Inception and Pressure Fields over a Stepped Spillway in Transition Floe Regime.” Proceeding of 15<sup>th</sup> IAHR Congress, Thssaloniki, page:711-718

[٢٦] Ohtso, I., Yasuda, D., (1997), “Characteristic of flow Condition on Stepped Channel.” Proceeding of 27<sup>th</sup> IAHR Congress, San Francisco, page: 583-588

[٢٧] Amador, A., Sunchez Juny, M. and Dolz, J., (2004) “Velocity and Pressure Field in Skimming Flow in Stepped Spillways.” Conference on Hydraulics of Dams and River

Structures(2004) [www.flumen.upc.edu/admin/files/65.pdf](http://www.flumen.upc.edu/admin/files/65.pdf)

[۲۸] شجاعی فرد م، نورپور ع، (۱۳۷۹) "مقدمه‌ای بر دینامیک سیالات محاسباتی"، تهران، انتشارات دانشگاه علم و صنعت ایران

[۲۹] [http://www.flow3d.com/resources/tech\\_paper/res\\_tp\\_main.html](http://www.flow3d.com/resources/tech_paper/res_tp_main.html)

[۳۰] Felder, S., Guenther, P., and Chanson, H. (2012). "Air-Water Flow Properties and Energy Dissipation on Stepped Spillways: a Physical Study of Several Pooled Stepped Configurations." Hydraulic Model Report No. CH87/12, School of Civil Engineering, The University of Queensland, Brisbane, Australia, 228 pages



## **Abstract**

Protection of downstream facilities of dams against floods discharge, reducing flow energy and directing it to downstream, are among the most important issues in the process of studies and design. Several solutions have been suggested to solve this problem, including stilling basin. However, a more suitable solution is to disperse the flow energy while it is passing on the spillway. For this reason, stepped spillways have received attention as an effective and suitable solution.

These spillways show highly complicated behaviors; however to this date, most researches have merely studied the effects of various factors on the process of variation of energy dissipation; thus, it seems necessary to study other factors (especially pressure field) along this subject. Due to the high expenses and problems in making lab studies on one hand, and successful experiences in computational fluid dynamics encouraged researchers to use numerical methods in conducting the researches.

In the present research, FLOW 3D software was used as a modeling tools after measuring its accuracy and gaining confidence of its proper function in simulating flows on those spillways; and, by changing a series of effective hydraulic parameters such as spillway slope, proportion of cascade dimensions, The flow behavior in those spillways were studied. It was observed that exercising those changes in line with achieving the highest rate of energy dissipation could not be considered as the most essential criteria in designing as it and might give way to the emergence of problems in proper performance of the overflow as well as creating risks (such as sharpe fall in pressure, possibility of cavitation danger in some parts); therefore, in the initial studies, the effect of changes made on all effective factors must be studied simultaneously.

**Key words:** Stepped spillway, Energy dissipation, Cavitation, pressure



**Shahrud University**  
**Faculty of Civil Engineering**

# **Numerical study on some parameters effecting hydraulics of stepped spillways simultaneously**

**V. Bagheriyeh**

**Supervisor:**  
**A.Ahmadi**

**Advisor:**  
**S.A.A.Salehi Neyshabouri**

**February 2015**