

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشکده کشاورزی

پایان نامه کارشناسی ارشد مهندسی سازه های آبی

بررسی عددی افت انرژی در سرریزهای پلکانی با مدل های FLUENT & HEC_RAS

نگارنده:

سراج الدین طاطار

استاد راهنما :

دکتر خلیل اژدری

اساتید مشاور :

دکتر سید حسین حسینی

دکتر زهرا گنجی نوروزی

خرداد ۱۳۹۶

دانشگاه شاهرود


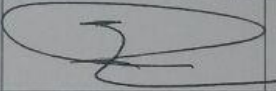

دانشکده کشاورزی

گروه: آب و خاک

پایان نامه کارشناسی ارشد آقای سراج الدین طاطار به شماره دانشجویی: ۹۳۱۱۲۷۴

تحت عنوان: بررسی عددی افت انرژی در سرریزهای پلکانی با مدل‌های FLUENT & HEC_RAC

در تاریخ ۱۳۹۶/۳/۲۲ توسط کمیته تخصصی زیر جهت اخذ مدرک کارشناسی ارشد مهندسی کشاورزی-سازه‌آبی مورد ارزیابی و با درجه متعالی مورد پذیرش قرار گرفت.

امضاء	اساتید مشاور	امضاء	اساتید راهنما
	نام و نام خانوادگی: سید حسین حسینی		نام و نام خانوادگی: خلیل اژدری
	نام و نام خانوادگی: زهرا گنجی نوری		نام و نام خانوادگی:

امضاء	نماینده تحصیلات تکمیلی	امضاء	اساتید داور
	نام و نام خانوادگی: محمدهادی موحدنژاد		نام و نام خانوادگی: صمد امامقلی زاده
			نام و نام خانوادگی: روزبه موذن زاده

پروردگارا:

نه می توانم موهایشان را که در راه عزت من سفید شد، سیاه کنم و نه برای دست های پینه بسته شان که ثمره تلاش برای افتخار من است، مرهمی دارم. پس توفیقم ده که هر لحظه شکر گزارشان باشم و ثانیه های عمرم را در عسای دست بودنشان بگذرانم.

شکر و سپاس خدا را که بزرگ ترین امید و یاور در لحظه لحظه زنگدیست.

بوسه بر دستان پرمهرتان

تشکر و قدردانی

با تشکر و سپاس از استاد راهنمای اینجانب جناب آقای دکتر فلیک اژدری که از مضر پرفیض تدریساتشان ، بهره‌ها برده‌ام ...

و با امتنان بیکران از مساعدت‌های بی‌شائبه اساتید مشاورم

جناب آقای دکتر سید حسین حسینی و خانم دکتر زهرا گنجی نوروزی، که همواره از همکاری و مشورت‌های ایشان بهره بردم، اعلام می‌کنم ...

و با سپاس بی‌اندازه از دوستان و هم‌کلاسی‌های عزیز و مهربانم:

آقایان: مهندس علیرضا رضوی زاده، مهندس علیرضا رنجبر و همپنین رفیق عزیزم مهندس صادق بیات که حضور گرم‌شان تداعی‌گر شیرین‌ترین لحظه‌های زندگی من است.

تعهد نامه

اینجانب سراج‌الدین طاطار دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته مهندسی سازه‌های آبی دانشکده کشاورزی دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان‌نامه بررسی عددی افت انرژی در سرریزهای پلکانی با مدل‌های FLUENT & HEC_RAS تحت راهنمایی دکتر خلیل اژدری متعهد می‌شوم .

- تحقیقات در این پایان‌نامه توسط اینجانب انجام شده است و از صحت و اصالت برخوردار است .
 - در استفاده از نتایج پژوهشهای محققان دیگر به مرجع مورد استفاده استناد شده است .
 - مطالب مندرج در پایان‌نامه تاکنون توسط خود یا فرد دیگری برای دریافت هیچ نوع مدرک یا امتیازی در هیچ جا ارائه نشده است .
 - کلیه حقوق معنوی این اثر متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می‌باشد و مقالات مستخرج 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 پایان‌نامه تأثیرگذار بوده‌اند در مقالات مستخرج از پایان‌نامه رعایت می‌گردد.
 - در کلیه مراحل انجام این پایان‌نامه ، در مواردی که از موجود زنده (یا بافتهای آنها) استفاده شده است ضوابط و اصول اخلاقی رعایت شده است .
- در کلیه مراحل انجام این پایان‌نامه، در مواردی که به حوزه اطلاعات شخصی افراد دسترسی یافته یا استفاده شده است اصل رازداری، ضوابط و اصول اخلاق انسانی رعایت شده است .

تاریخ

امضای دانشجو سراج‌الدین طاطار

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 می‌باشد . این مطلب باید به نحو مقتضی در تولیدات علمی مربوطه ذکر شود .
- استفاده از اطلاعات و نتایج موجود در پایان‌نامه بدون ذکر مرجع مجاز نمی‌باشد.

* متن این صفحه نیز باید در ابتدای نسخه های تکثیر شده پایان‌نامه وجود داشته باشد .

چکیده

سرریز پلکانی به عنوان ابزاری مهم در پراکنش انرژی در طول شوت مورد توجه مهندسين سد می باشد. به منظور بررسی افت انرژی سرریز پلکانی در دو حالت پله بدون لبه و پله لبه دار با ضخامت ۱/۵ سانتی متر و ارتفاع های ۱، ۳ و ۵ سانتی متری مدل سازی گردید. به دلیل پیچیدگی جریان دو فاز آب و هوا بر روی سرریز پلکانی، مدل دینامیکی سیالات محاسباتی حجم محدود با نرم افزار فلوئنت دوبعدی شبیه سازی گردید. شبیه سازی جریان دو فاز آب و هوا با الگوی حجم سیال کانال آزاد صورت گرفت و برای مدل سازی جریان از مدل آشفتگی k_ϵ از نوع RNG استفاده شد. مقایسه نتایج مدل عددی با مشاهدات آزمایشگاهی تطابق خوبی داشت. نتایج این پژوهش نشان داد که در هر دو حالت پله های لبه دار و بدون لبه با افزایش دبی جریان افت انرژی نسبی کاهش می یابد. همچنین افت انرژی در حالت لبه دار بودن پله ها بیشتر از حالت بدون لبه بود. در حالتی که لبه ها به طور جداگانه در انتها و وسط پله نصب شدند، لبه با ارتفاع ۱ سانتی متری به عنوان لبه مناسب معرفی شد. در حالتی که لبه ها هم زمان در انتها و وسط پله نصب شدند، لبه با ارتفاع ۵ سانتی متری به عنوان لبه مناسب معرفی شد. در حالتی که لبه انتها پله ثابت بود و لبه وسط تغییر می کرد، با افزایش ارتفاع لبه در وسط پله افت انرژی هم بیشتر شد. از نظر عملکرد، لبه ۱ سانتی متری در وسط پله با ۹۴/۱۶٪ استهلاک انرژی در مقایسه با لبه ۱ سانتی متری در انتهای پله باعث افزایش ۱/۸۶٪ استهلاک انرژی نسبت به حالت بدون لبه شد. و همچنین در حالتی که لبه ها هم زمان در انتها و وسط پله نصب شدند بهترین حالت قرارگیری لبه در پله، لبه ۳ سانتی متری در انتها و ۵ سانتی متری در وسط پله با ۹۴/۰۴٪ استهلاک انرژی در مقایسه با سایر لبه ها بود که باعث افزایش ۱/۷۳٪ استهلاک انرژی نسبت به حالت بدون لبه شد.

کلمات کلیدی: سرریز پلکانی، مدل عددی فلوئنت، جریان دو فاز، استهلاک انرژی، رژیم جریان ریزشی

مقالات استخراج شده

• "بررسی استهلاك انرژی در سرریز پلکانی با مدل عددی FLUENT"

سراج‌الدین طاطار، خلیل اژدری، سید حسین حسینی، زهرا گنجی نوروزی، چهارمین کنگره بین-المللی عمران، معماری و توسعه شهری، دانشگاه شهید بهشتی تهران، دی‌ماه ۱۳۹۵

فهرست مطالب

۱	فصل اول: مقدمه و کلیات
۲	۱-۱- مقدمه
۴	۲-۱- بیان مسئله
۶	۳-۱- اهداف پژوهش
۷	۴-۱- سازماندهی فصل های پایان نامه
۹	فصل دوم: مروری بر تحقیقات پیشین
۱۰	۱-۲- مقدمه
۱۰	۲-۲- هیدرولیک سرریزهای پلکانی
۱۲	۳-۲- رژیم جریان ریزشی
۱۳	۴-۲- تقسیم بندی رژیم جریان ریزشی
۱۳	۲-۴-۱- پرش هیدرولیکی کاملاً توسعه یافته (NA 1)
۱۶	۲-۴-۲- پرش هیدرولیکی ناقص (NA 2)
۱۷	۳-۴-۲- بدون پرش هیدرولیکی (NA3)
۱۹	۵-۲- جریان رویه ای (رژیم جریان غیر ریزشی)
۲۱	۲-۵-۱- تقسیم بندی رژیم جریان غیر ریزشی
۲۲	۶-۲- رژیم جریان انتقالی
۲۲	۷-۲- ورود هوا در سرریزهای پلکانی
۲۵	۸-۲- خلاءزایی (کاویتاسیون)
۲۷	۹-۲- استهلاك انرژی
۲۹	۲-۹-۱- استهلاك انرژی در رژیم جریان ریزشی
۳۱	۱۰-۲- شروع رژیم جریان غیر ریزشی
۳۴	۱۱-۲- مطالعات انجام شده بر روی سرریزهای پلکانی
۳۴	۲-۱۱-۱- تحقیقات آزمایشگاهی صورت گرفته بر روی سرریزهای پلکانی
۳۶	۲-۱۱-۲- تحقیقات عددی صورت گرفته بر روی سرریزهای پلکانی

۴۷	فصل سوم: مواد و روش ها
۴۸	۱-۳- مقدمه
۴۸	۲-۳- دینامیک سیالات محاسباتی (CFD)
۴۹	۳-۳- مزایای CFD نسبت به روش های تجربی
۵۰	۴-۳- انواع شبکه ها و روش های حل CFD
۵۰	۳-۴-۱- شبکه بی سازمان
۵۱	۳-۴-۲- شبکه با سازمان
۵۱	۳-۵- روش های حل CFD
۵۱	۳-۵-۱- روش تفاضل محدود
۵۲	۳-۵-۲- روش المان محدود
۵۲	۳-۵-۳- روش حجم محدود
۵۲	۳-۵-۱- الگوریتم های عددی روش حجم محدود
۵۲	۳-۶- شرح مدل آزمایشگاهی
۵۵	۳-۷- مراحل حل مسئله دینامیک سیالات محاسباتی
۵۶	۳-۸- هندسه مدل عددی و شبکه بندی آن
۵۶	۳-۸-۱- نرم افزار Gambit
۵۷	۳-۸-۲- آشنایی با نرم افزار فلونت
۵۸	۳-۹- کالیبراسیون
۵۹	۳-۱۰- تنظیمات حل
۵۹	۳-۱۰-۱- شرایط مرزی
۶۰	۳-۱۰-۱-۱- شرایط مرزی سرعت ورودی (velocity inlet)
۶۲	۳-۱۰-۱-۲- شرایط مرزی فشار ورودی و فشار خروجی
۶۲	۳-۱۰-۱-۲-۱- شرط مرزی فشار ورودی (pressure inlet)
۶۲	۳-۱۰-۱-۲-۲- شرط مرزی فشار خروجی (pressure outlet)
۶۳	۳-۱۰-۱-۳- شرط مرزی دیوار (Wall)
۶۳	۳-۱۱- مدل های تک فازی یا چند فازی در نرم افزار Fluent
۶۴	۳-۱۱-۱- مدل VOF
۶۵	۳-۱۲- معادلات جریان دو فاز در مدل VOF

۶۵	۳-۱۲-۱- معادلات جزء حجمی
۶۶	۳-۱۲-۲- معادلات مومنتم
۶۷	۳-۱۳- مدل های آشفتگی در نرم افزار Fluent
۶۹	۳-۱۴- روش حل و گسسته سازی معادلات
۶۹	۳-۱۴-۱- روش حل عددی
۷۰	۳-۱۴-۲- روش های اعمال شده در مدل
۷۱	۳-۱۵- شرایط اولیه
۷۲	۳-۱۶- مدل HEC-RAS
۷۷	فصل چهارم: نتایج و بحث
۷۸	۴-۱- مقدمه
۷۸	۴-۲- کالیبراسیون مدل
۷۹	۴-۳- استهلاک انرژی در سرریزها
۸۰	۴-۴- زمان شبیه سازی
۸۴	۴-۵- بررسی تغییرات $\Delta H/Ht$ در برابر دبی برای پارامترهای مختلف
۸۴	۴-۵-۱- لبه های مختلف در انتهای پله
۸۷	۴-۳-۲- لبه ها در وسط پله
۱۰۰	۴-۷- بررسی الگوی جریان در روی پله ها
۱۰۳	۴-۸- بررسی پروفیل آب در روی پله ها
۱۰۵	۴-۹- تغییرات عمق جریان در ابتدای حوضچه آرامش یا انتهای پله
۱۰۷	۴-۱۰- نوآوری های مربوط به مدل عددی
۱۱۳	فصل پنجم: نتایج و پیشنهادات
۱۱۴	۵-۱- مقدمه
۱۱۴	۵-۲- نتیجه گیری
۱۱۵	۵-۳- پیشنهادات
۱۱۶	منابع

فهرست اشکال

- شکل ۱-۱- هندسه پله در سرریز پلکانی ۳
- شکل ۲-۱- سرریز پلکانی ۴
- شکل ۱-۲- انواع جریان روی سرریز پلکانی ۱۱
- شکل ۲-۲- جریان ریزشی ۱۳
- شکل ۳-۲- رژیم فرعی NA1 ۱۴
- شکل ۴-۲- جریان ریزشی با پرش هیدرولیکی ناقص (NA2) ۱۷
- شکل ۵-۲- جریان ریزشی بدون پرش هیدرولیکی (NA3) ۱۷
- شکل ۶-۲- رژیم جریان غیر ریزشی ۲۰
- شکل ۷-۲- جریان از روی سرریز پلکانی با رژیم غیر ریزشی و تقسیم‌بندی نواحی جریان ۲۰
- شکل ۸-۲- رژیم جریان غیر ریزشی نوع A ۲۱
- شکل ۹-۲- رژیم جریان غیر ریزشی نوع B ۲۱
- شکل ۱۰-۲- رژیم جریان انتقالی (تبدیلی) ۲۲
- شکل ۱۱-۲- نمایش برخی از مؤلفه‌های هیدرولیکی جریان و هندسه تنداب پلکانی ۲۳
- شکل ۱-۳- مقطع طولی فلوم به عرض ۱۰۰ سانتیمتر ۵۳
- شکل ۲-۳- سرریز پلکانی با عرض و ارتفاع یک متر ۵۴
- شکل ۳-۳- فلوم مورد مطالعه ۵۴
- شکل ۴-۳- مدل سرریز پلکانی با لبه ۵ سانتی‌متری در انتها و ۳ سانتی‌متری در وسط پله ۵۷
- شکل ۵-۳- انفصال سازی ترم های معادله انتقال ۵۸
- شکل ۶-۳- نمایی از شرایط مرزی مدل موردنظر در Gambit ۵۹
- شکل ۷-۳- شرط مرزی سرعت در فاز مختلط ۶۱
- شکل ۸-۳- شرط مرزی سرعت ورودی برای فاز دوم ۶۱
- شکل ۹-۳- شرط مرزی فشار برای فاز مختلط ۶۲
- شکل ۱۰-۳- تعیین فاز مدل ۶۳
- شکل ۱۱-۳- تنظیمات حل ۷۰
- شکل ۱۲-۳- شرایط جریان ماندگار در HEC-RAS ۷۳
- شکل ۱۳-۳- شرایط جریان غیر ماندگار در HEC-RAS ۷۴

- شکل ۴-۱- مقایسه نتایج مدل عددی با مقادیر آزمایشگاهی شفيعی پور و همکاران (۱۳۹۲) با توجه به ابعاد مختلف شبکه مش بندی در شیب صفر درصد ۷۹
- شکل ۴-۲- پروفیل سطح آب در زمان ۰/۵ و ۱۰ ثانیه از اجرای مدل به ازای دبی ۰/۰۷۶ مترمکعب بر ثانیه ۸۱
- شکل ۴-۳- پروفیل سطح آب در زمان ۱۵ و ۲۰ ثانیه از اجرا مدل به ازای دبی ۰/۰۷۶ مترمکعب بر ثانیه ۸۲
- شکل ۴-۴- تغییرات دبی خروجی در برابر زمان ۸۳
- شکل ۴-۵- بررسی تغییرات استهلاک انرژی در برابر دبی برای لبه های مختلف در انتهای پله ۸۴
- شکل ۴-۶- مقایسه خطای عددی و آزمایشگاهی ۸۶
- شکل ۴-۷- بررسی تغییرات استهلاک انرژی به ازای دبی های مختلف برای لبه در وسط پله ۸۷
- شکل ۴-۸- مقایسه خطای عددی و آزمایشگاهی ۸۸
- شکل ۴-۹- تغییرات نسبت افت انرژی در برابر جریان در سرریز با لبه در انتها و وسط ۹۱
- شکل ۴-۱۰- تغییرات دبی و افت انرژی جریان برای لبه ۱ سانتیمتری در انتهای پله ثابت و لبه های وسط متغیر ۹۳
- شکل ۴-۱۱- تغییرات دبی و درصد افت انرژی جریان در سرریز با لبه ۳ سانتیمتری در انتها و لبه های متغیر در وسط ۹۵
- شکل ۴-۱۲- تغییرات دبی و درصد افت انرژی جریان با لبه ۵ سانتیمتری در انتها و لبه های متغیر در وسط ۹۷
- شکل ۴-۱۳- تاثیر پارامتر بی بعد yc/h در افت انرژی با لبه در انتهای پله ۹۹
- شکل ۴-۱۴- تاثیر پارامتر بی بعد yc/h در افت انرژی با لبه در وسط پله ۱۰۰
- شکل ۴-۱۵- بردار های سرعت در سرریز پلکانی ساده ۱۰۱
- شکل ۴-۱۶- نمایش بردارهای سرعت در سرریز پلکانی لبه دار برای دبی ۰/۰۲۷ مترمکعب بر ثانیه ۱۰۲
- شکل ۴-۱۷- پروفیل سطح آب برای سرریز بدون لبه با دبی ۰/۰۲۴ متر مکعب بر ثانیه ۱۰۳
- شکل ۴-۱۸- پروفیل سطح آب برای سرریز پلکانی بدون لبه با دبی ۰/۰۱۳ متر مکعب بر ثانیه ۱۰۴
- شکل ۴-۱۹- پروفیل سطح آب برای سرریز پلکانی بدون لبه با دبی ۰/۰۲۷ متر مکعب بر ثانیه ۱۰۴
- شکل ۴-۲۰- پروفیل سطح آب در سرریز با لبه ۳ سانتیمتر ۱۰۵
- شکل ۴-۲۱- تاثیر دبی بر روی عمق جریان پایین دست در سرریز پلکانی ساده ۱۰۶
- شکل ۴-۲۲- تاثیر دبی بر عمق جریان پایین دست در سرریز پلکانی لبه دار ۱۰۷
- شکل ۴-۲۳- شماتیکی از پله ها بر روی سرریز پلکانی ۱۰۸
- شکل ۴-۲۴- بررسی تغییرات دبی و استهلاک انرژی ۱۰۹
- شکل ۴-۲۵- تاثیر پارامتر بی بعد yc/h در افت انرژی ۱۱۰

فهرست جداول

- جدول ۳-۱- مشخصات مدل فیزیکی سرریز پلکانی مورد آزمایش..... ۵۴
- جدول ۳-۲- حالت‌های قرارگیری لبه‌ها بر روی پله‌های ۲، ۳، ۴ و ۵..... ۵۵
- جدول ۳-۳- ضرایب ثابت مدل RNG..... ۶۸
- جدول ۴-۱- محاسبه پارامترهای هیدرولیکی برای سرریز پلکانی بدون لبه..... ۸۳
- جدول ۴-۲- محاسبه پارامترهای هیدرولیکی برای سرریز پلکانی با لبه ۱ سانتی‌متری در انتهای پله..... ۸۵
- جدول ۴-۳- محاسبه پارامترهای هیدرولیکی برای سرریز پلکانی با لبه ۳ سانتی‌متری در انتهای پله..... ۸۵
- جدول ۴-۴- محاسبه پارامترهای هیدرولیکی برای سرریز پلکانی با لبه ۵ سانتی‌متری در انتهای پله..... ۸۶
- جدول ۴-۵- محاسبه پارامترهای هیدرولیکی برای سرریز با لبه ۱ سانتی‌متری در وسط پله..... ۸۹
- جدول ۴-۶- محاسبه پارامترهای هیدرولیکی برای سرریز با لبه ۳ سانتی‌متری در وسط پله..... ۸۹
- جدول ۴-۷- محاسبه پارامترهای هیدرولیکی برای سرریز با لبه ۵ سانتی‌متری در وسط پله..... ۹۰
- جدول ۴-۸- محاسبه پارامترهای هیدرولیکی برای سرریز با لبه ۱ سانتی‌متر در انتها و وسط پله..... ۹۱
- جدول ۴-۹- محاسبه پارامترهای هیدرولیکی برای سرریز با لبه ۳ سانتی‌متری در انتها و وسط پله..... ۹۲
- جدول ۴-۱۰- محاسبه پارامترهای هیدرولیکی برای سرریز با لبه ۵ سانتی‌متری در انتها و وسط پله..... ۹۲
- جدول ۴-۱۱- محاسبه پارامترهای هیدرولیکی برای سرریز پلکانی با لبه ۱ سانتی‌متری در انتهای پله و ۳ سانتی‌متری در وسط..... ۹۴
- جدول ۴-۱۲- محاسبه پارامترهای هیدرولیکی برای سرریز پلکانی با لبه ۱ سانتی‌متری در انتهای پله و ۵ سانتی‌متری در وسط..... ۹۴
- جدول ۴-۱۳- محاسبه پارامترهای هیدرولیکی برای سرریز پلکانی با لبه ۳ سانتی‌متری در انتها و لبه ۱ سانتی‌متری در وسط..... ۹۶
- جدول ۴-۱۴- محاسبه پارامترهای هیدرولیکی برای سرریز پلکانی با لبه ۳ سانتی‌متری در انتها و ۵ سانتی‌متری در وسط..... ۹۶
- جدول ۴-۱۵- محاسبه پارامترهای هیدرولیکی برای سرریزهای پلکانی با لبه ۵ سانتی‌متر در انتها و ۱ سانتی‌متر در وسط..... ۹۸

- جدول ۴-۱۶- محاسبه پارامترهای هیدرولیکی سرریز پلکانی با لبه ۵ سانتی‌متری در انتها و ۳ سانتی‌متری در وسط..... ۹۸
- جدول ۴-۱۷- محاسبه پارامترهای هیدرولیکی برای لبه ۵ سانتی‌متری در وسط و انتها..... ۱۱۰
- جدول ۴-۱۸- محاسبه پارامترهای هیدرولیکی برای پله شیب‌دار..... ۱۱۱
- جدول ۴-۱۹- محاسبه پارامترهای هیدرولیکی برای لبه ۵ سانتی‌متری با ضخامت ۲ سانتی‌متری در انتها و وسط..... ۱۱۱
- جدول ۴-۲۰- محاسبه پارامترهای هیدرولیکی برای سرریز پلکانی پله معکوس..... ۱۱۲

علائم و اختصارات

$$y_c = \text{عمق بحرانی } (m)$$

$$h = \text{ارتفاع هر پله } (m)$$

$$l = \text{طول افقی هر پله } (m)$$

$$\rho = \text{جرم مخصوص آب } (m/s^2)$$

$$H_t = \text{انرژی کل در بالادست سرریز } (m)$$

$$H_{dam} = \text{ارتفاع کل سرریز } (m)$$

$$y_1 = \text{عمق قبل از پرش هیدرولیکی } (m)$$

$$V_1 = \text{سرعت متوسط قبل از پرش هیدرولیکی } (m/s)$$

$$N = \text{تعداد کل پله‌ها}$$

$$\Delta H = \text{افت انرژی } (m)$$

$$\mu = \text{گرانروی دینامیک آب } (NS/m^2)$$

$$g = \text{شتاب ثقل } (N/m^3)$$

$$Re = \text{عدد رینولدز (بدون بعد)}$$

$$Fr_1 = \text{عدد فرود (بدون بعد)}$$

$$q = \text{دبی در واحد عرض } (m^2/s)$$

فصل اول

مقدمه و کلیات

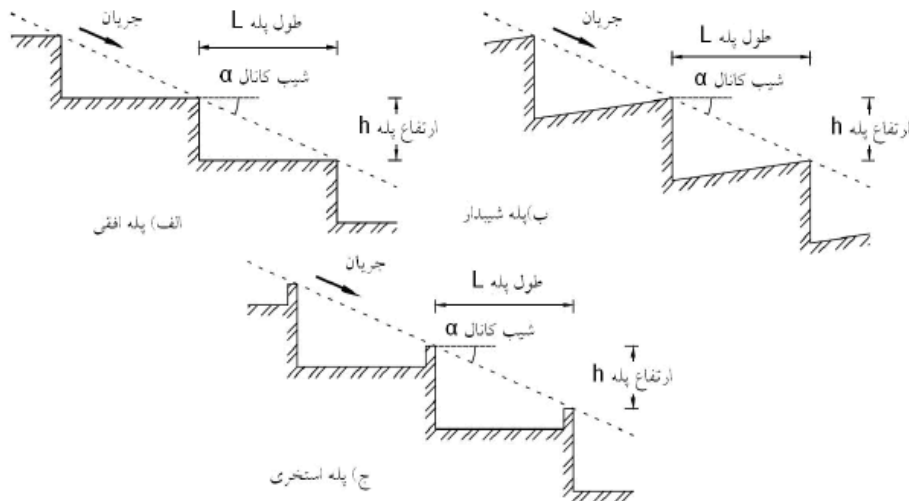
سرریز یک نوع سازه هیدرولیکی است که معمولاً در سدهای مخزنی به منظور آزاد کردن سیلاب‌هایی که نمی‌توانند به‌طور ایمن در پشت سد مهار گردند به کار می‌رود. این سرریزها به دلیل سادگی ساخت و طراحی ساده از حدود ۳۵۰۰ سال پیش، مورد استفاده قرار می‌گرفته‌اند. به دلیل اینکه سد یکی از مهم‌ترین منابع ذخیره آب در پروژه‌های آبی است، توجه به ساخت سد و بهره‌برداری صحیح از آن مهم‌ترین مسئولیت مدیران منابع آب است. اما از آنجاکه سرریز یکی از مهم‌ترین اجزاء سد و همچنین ضامن ایمنی سد است، بررسی آن امری ضروری به نظر می‌رسد. سرریز باید سازه‌ای قوی، مطمئن و باراندمان بالا انتخاب شود که هر لحظه بتواند برای بهره‌برداری آمادگی داشته باشد. تخریب یا عدم کارایی مناسب سرریزها باعث آسیب‌دیدگی شدید سد و یا حتی باعث تخریب آن می‌شود. به همین خاطر است که طراحی و ساخت این قسمت از سد از اهمیت بالایی برخوردار است.

هزینه ساخت و نگهداری سرریزها قسمت عمده‌ای از هزینه کل پروژه‌ی سدسازی را به خود اختصاص می‌دهد که در سدهای بلند و بزرگ تا ۲۰٪ و در سدهای کوچک تا ۸۰٪ کل هزینه را به خود اختصاص می‌دهد (صفریان و همکاران، ۱۳۹۴).

یکی از کاربردهای مهم سرریزها، کنترل ارتفاع و حجم آب دریاچه پشت سد است که در این حالت شکل و ابعاد سرریز تابعی از موقعیت جغرافیایی و هیدرولوژیکی منطقه خواهد بود (حسینی و ابریشمی، ۱۳۸۵).

سرریزهای پلکانی، متشکل از پله‌هایی است که از نزدیکی تاج سرریز شروع و تا پاشنه پایین دست ادامه می‌یابند. امروزه استفاده از سرریزهای پلکانی در نقاط مختلف دنیا به علت توانایی فوق‌العاده آنها در استهلاک انرژی جریان و در نتیجه کاهش ابعاد حوضچه آرامش و همچنین کنترل و کاهش پدیده خلاءزایی در سرریز، رواج گسترده‌ای یافته است. شکل (۱-۱) هندسه پله بر روی سرریز می‌باشد، این سرریزها به‌عنوان یک گزینه برتر در سدهای بتن غلتکی مطرح هستند زیرا علاوه بر مزایای ذکر شده،

همخوانی تکنولوژی ساخت سدهای بتن غلتکی با روش ساخت سرریزهای پلکانی مزید بر علت شده و امروزه به طور معمول سدهای بتن غلتکی به سرریز پلکانی مجهز می‌شوند (رستمی راوری، ۱۳۸۵).

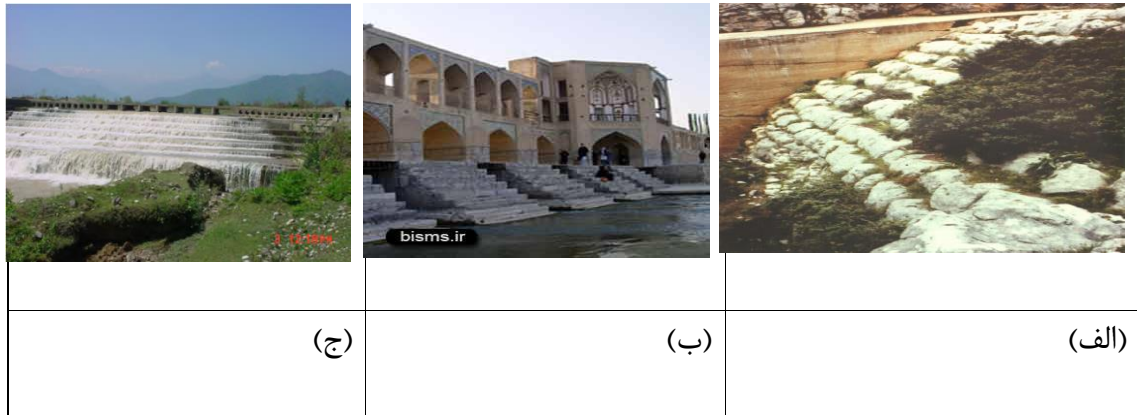


شکل ۱-۱- هندسه پله در سرریز پلکانی الف) پله افقی ب) پله شیب‌دار ج) پله استخری (رضائی و بیدختی، ۱۳۹۰)

از قدیمی‌ترین سرریزهای پلکانی در جهان، سرریز آکارناتیا^۱ در یونان با قدمت ۱۳۰۰ سال قبل از میلاد مسیح است. این سرریز که ارتفاع آن ۱۰/۵ متر و طول تاج آن ۲۵ متر است با مصالح خاک ساخته شده است. ارتفاع پله‌ها در محدوده ۰/۶ تا ۰/۹ متر قرار دارد، این سرریز هنوز هم پابرجاست (چانسون^۲، ۲۰۰۰). سرریز سد تیلوت^۳ نیز با ۱۶۸ سال قدمت در فرانسه جزء قدیمی‌ترین سرریزهای پلکانی است. همچنین می‌توان سرریز سد زولا^۴ در فرانسه و سد یانین^۵ و سد کوراواتا^۶ در استرالیا و ... را نام برد. در ایران قدیمی‌ترین سرریزهای پلکانی می‌توان سرریز پلکانی پل خواجه در استان اصفهان را نام برد که در سال ۱۶۵۰ میلادی به دستور شاه‌عباس صفوی اول ساخته شد (بارانی و سهرابی، ۱۳۸۱). همچنین از دیگر سرریزهای پلکانی احداث شده بر روی رودخانه‌های داخل کشور می‌توان به سرریز

1 Akarnania
2 Chanson
3 Tillot
4 zola
5 Yan yeon
6 koorawatha

پلکانی موجود بر روی رودخانه خالکایی واقع در پایین دست محل عبور سیفون انتقال آب فومن اشاره نمود (رستمی و همکاران، ۱۳۸۶). در شکل (۱-۲) نمایی از این سرریزها نشان داده شده است.



شکل ۱-۲- سرریز پلکانی الف) سد آکارنایا ب) پل خواجه ج) رودخانه خالکایی

۱-۲- بیان مسئله

سرریزهای پلکانی به عنوان یک سازه مستهلک کننده انرژی است بخصوص در سدهای بتنی غلتکی، که سلامت پایین دست سرریز تضمین می شود و نیاز به حوضچه آرامش در پایانه سرریز را کاهش می دهد و حتی موجب عدم لزوم استفاده از حوضچه آرامش در پنجه سرریز می شود که باعث صرفه جویی اقتصادی در ساخت سد می گردد (سورن سن، ۱۹۸۵). یکی دیگر از کاربردهای سرریزهای پلکانی که امروزه گسترش یافته است، استفاده از آنها در شیب پایین دست سدهای خاکی که از لحاظ هیدرولیکی نامطمئن هستند، به عنوان سرریز اضطراری جهت عبور حداکثر سیلاب محتمل^۱ از روی تاج سد است. به عبارت دیگر، سرریز پلکانی برای اولین بار در سدهای بتنی به کار رفتند و سپس در سدهای خاکی توسعه یافتند (حیدر زاده و بنی هاشمی، ۱۳۸۴). شوتها و سرریزها برای عبور دادن دبی های زیاد از روی یک سازه هیدرولیکی به گونه ای طراحی می شوند که هیچ گونه صدمه عمده ای به خود سازه و همچنین محیط اطراف آن وارد نشود. جریان از روی سرریز، نظیر جریان سریع در میان کانال و یا جریان جت با سقوط آزاد به سرعت جاری می شود و لازم است مقداری از انرژی آن به خاطر جلوگیری

¹ Probable maximum flood

از صدمه زدن به پنجه سد، اطراف آن و نهایتاً خود سد، مستهلک شود. کار ایمن این گونه سرریزها به طراحی صحیح، کیفیت مطلوب ساخت، شرایط مناسب جریان و نگهداری منظم بستگی دارد. مجموعه عوامل فوق افزایش نقش شوت‌ها و سرریزهای پلکانی را در سازه‌های آبی سبب شده است (شمسایی و نیک نهال، ۱۳۸۴).

پارامترهای مهم دیگری که سرریزهای پلکانی را از دیگر سرریزها متمایز می‌سازد مسئله هوادهی جریان روی سرریز است که از پدیده خلاءزایی جلوگیری می‌کند، به علت شکل خاص آن و قرارگیری پله‌ها در بدنه سرریز، جریان کاملاً هوادهی می‌شود همچنین ساده بودن شکل آن و مطابقت با تکنولوژی مصالح بتن غلتکی^۱ (RCC) که در ساخت سدهای بتنی وزنی بسیار کارا و باعث تسریع در ساخت سد می‌شود، در همین راستا ساخت سرریز پلکانی می‌تواند همراه با ساخت سد انجام گیرد (سورن سن، ۱۹۸۵).

سرریز پلکانی علاوه بر مزیت بالا بودن میزان اتلاف انرژی و در نتیجه کاهش ابعاد حوضچه آرامش که منجر به صرفه‌جویی در هزینه‌ها می‌شود، باعث کاهش فشار برکنش نیز می‌گردد. به‌طور کلی می‌توان مزیت‌های سرریز پلکانی را به‌عنوان تخیله‌کننده در سدها به‌صورت زیر برشمرد (یزدی، ۱۳۸۸):

- کاهش هزینه‌های کلی سرریز و تأسیسات پایین‌دست در مقایسه با دیگر انواع سرریزها
- کوتاه شدن زمان اجرا خصوصاً با استفاده از تکنولوژی RCC
- بهره‌برداری و نگهداری آسان‌تر
- کاهش فرسایش در بستر آبراهه پایین‌دست سرریز
- افزایش میزان پراکنش انرژی
- کاهش هزینه اجرای حوضچه آرامش

1 Roller compacted concrete

همچنین سرریزهای پلکانی مانند همه‌ی سازه‌ها دارای نواقصی نیز می‌باشند که از آن جمله به نکات

زیر می‌توان اشاره نمود:

- ◀ پیچیده بودن هیدرولیک آن‌ها
- ◀ عملکرد هیدرولیکی متفاوت این سرریزها و وجود رژیم‌های گوناگون جریان در دبی‌های مختلف
- ◀ تغییر ضریب آبگذری و حساسیت آن نسبت به تغییرات دبی
- ◀ نیاز به عملیات قالب‌بندی در زمان اجرا

۱-۳- اهداف پژوهش

با توجه به مطلب فوق‌الذکر می‌توان لزوم و اهمیت انجام این تحقیق را در طراحی سازه‌های ایمن و بهینه از لحاظ بیشترین میزان استهلاک انرژی و درعین‌حال کاهش هرچه بیشتر اثرات تخریبی جریان بر سازه سرریز به جهت وقوع فشارهای منفی که باعث وقوع پدیده کاویتاسیون^۱ بر سطح پله‌ها در سرریزهای پلکانی می‌شود عنوان نمود. با کمک مدل‌های فیزیکی می‌توان شرایط هندسی مختلف را شبیه‌سازی و با اندازه‌گیری پارامترهای مؤثر، استنباطی جامع و قابل قبول از شرایط حاکم بر این سرریزها به دست آورد. با این وجود صرف هزینه‌های بالا و نیز مشکلات موجود در مطالعات آزمایشگاهی از یک طرف، و نیز نتایج موفق درزمینه‌ی دینامیک سیالات محاسباتی ما را به استفاده از روش‌های عددی در انجام پژوهش سوق می‌دهد. در این تحقیق با استفاده از مدل عددی به بررسی استهلاک انرژی در سرریزهای پلکانی در رژیم جریان ریزشی پرداخته خواهد شد. این تحقیق دارای اهداف زیر است:

۱- بررسی استهلاک انرژی جریان از روی سرریزهای پلکانی لبه‌دار و بدون لبه در رژیم جریان ریزشی

1 cavitation

۲- بررسی پارامترهای هیدرولیکی و هندسی مؤثر بر استهلاک انرژی جریان بر روی سرریزهای پلکانی

از جمله دبی جریان، ارتفاع پله‌ها، تعداد پله‌ها، شیب سرریز

۳- تهیه پروفیل جریان بر روی سرریز و تشخیص رژیم‌های جریان و مقایسه نتایج حاصل با داده‌های

آزمایشگاهی

۱-۴- سازمان دهی فصل‌های پایان‌نامه

فصل اول این پایان‌نامه شامل مقدمه، تاریخچه، کاربردها و اهمیت موضوع، اهداف پایان‌نامه و شرح کلی فصول پایان‌نامه است. فصل دوم به اصول حاکم بر جریان از روی سرریزهای پلکانی و مروری بر تحقیقات پیشین اختصاص یافته است. فصل سوم به تشریح مواد و روش‌های مورد استفاده در انجام مدل و نیز توضیح مختصری در مورد تنظیمات حل و شرایط مرزی به کار برده شده در این پایان‌نامه پرداخته است. در فصل چهارم نتایج حاصل از انجام مدل ارائه و مورد بحث و بررسی قرار گرفته‌اند. در فصل پنجم ضمن ارائه نتایج به دست آمده به صورت کلی و خلاصه، پیشنهادهایی در رابطه با ادامه تحقیقات ارائه گردیده است.

فصل دوم

مروری بر تحقیقات پیشین

سرریز پلکانی سازه هیدرولیکی قدرتمندتری از سرریز اوجی^۱ در مستهلک کردن انرژی جریان و کاهش فرسایش پایین دست سدها است. وقتی که جریان آب توسط سرریز از مخزن تا سطح آب در پایین دست سقوط می‌کند، انرژی پتانسیل آن به انرژی جنبشی تبدیل می‌شود. این انرژی به صورت سرعت زیاد در پایین دست ظاهر می‌شود که برای جلوگیری از فرسایش رودخانه در پایین دست لازم است با تعبیه تأسیساتی از قبیل سرریزهای پلکانی مستهلک گردد (رسائی و همکاران، ۱۳۸۸). مستهلک نمودن انرژی جریان عبوری از روی سرریز جهت جلوگیری از وارد آمدن خسارت به پایین دست بسیار حائز اهمیت است. در این فصل از پایان نامه به صورت مختصر به اصول حاکم بر جریان از روی سرریزهای پلکانی پرداخته می‌شود. رژیم‌های ریزشی و غیر ریزشی، موضوع پدیده هوادهی به داخل جریان و اهمیت آن و استهلاک انرژی جریان به صورت مختصر مورد بحث قرار می‌گیرد. در ادامه در خصوص تحقیقات انجام شده بر روی سرریزهای پلکانی پرداخته می‌شود.

۲-۲- هیدرولیک سرریزهای پلکانی

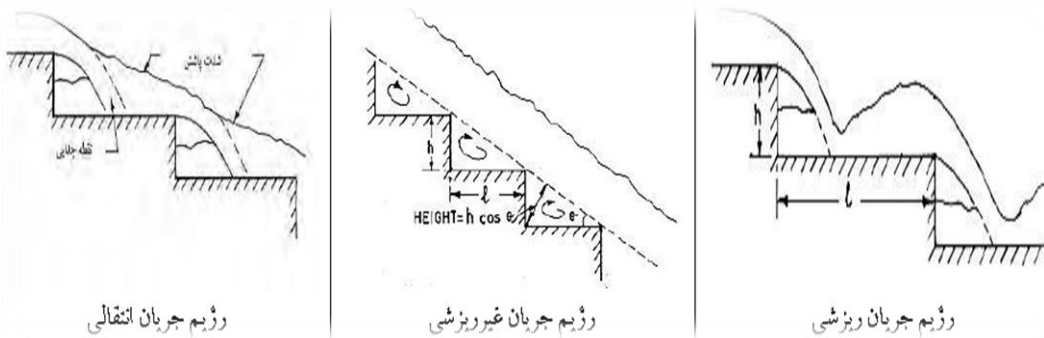
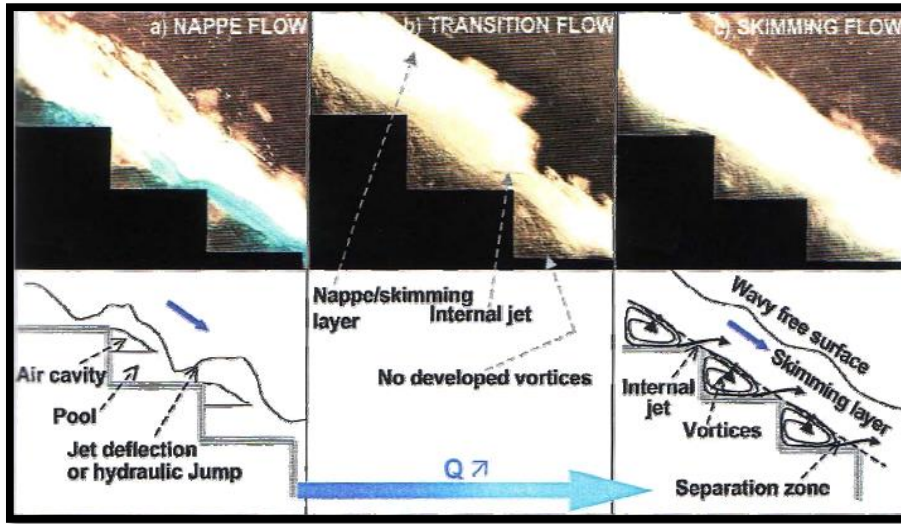
سرریز پلکانی نمونه ساده‌ای از آبراهه با ضریب زبری بالا است که از یک سری پله با اندازه‌های ثابت یا متغیر تشکیل شده است. اصولاً اگر بتوان با افزایش ضریب زبری، انرژی جریان را به صورت پیوسته پراکنده نمود، در پنجه سرریز لزومی به بکارگیری سازه مستهلک کننده انرژی نیست یا ابعاد آن بسیار کوچک خواهد شد (رستمی و همکاران، ۱۳۸۶). با تغییر دبی عبوری از روی این نوع سرریزها سه نوع جریان روی می‌دهد، که در شکل (۲-۱) نشان داده شده است.

¹ Ogee spillway

۱- رژیم‌های جریان ریزشی^۱

۲- رژیم‌های جریان غیر ریزشی^۲

۳- رژیم جریان انتقالی^۳



شکل ۱-۲- انواع جریان روی سرریز پلکانی

بر اساس نتایج آزمایش‌های انجام‌شده بر روی سرریزهای پلکانی با محدوده وسیع تغییر در شیب

لاپه‌ها می‌توان گفت که تبدیل رژیم جریان ریزشی تقریباً در $\frac{yc}{h} = 0.8$ اتفاق می‌افتد.

1 Nappe flow

2 Skimming flow

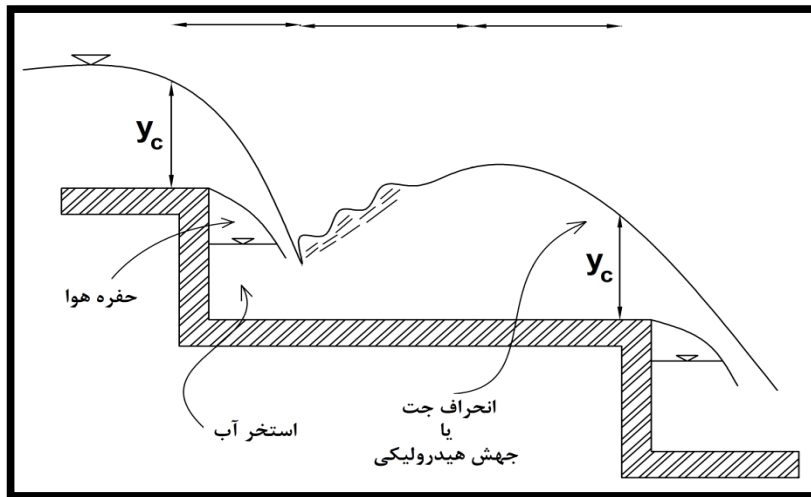
3 Transition flow

چانسون (۲۰۰۲)، با جمع‌آوری نتایج آزمایش‌های سایر محققین نشان داد که در تبدیل رژیم جریان ریزشی به غیر ریزشی علاوه بر پارامتر بی‌بعد $\frac{yc}{h}$ ، شیب سرریز نیز مؤثر است.

۲-۳- رژیم جریان ریزشی

در رژیم جریان ریزشی ارتفاع کل سرریز به تعدادی آبشار عمودی تقسیم شده است که در این حالت جریان از روی هر پله به پله بعدی فرومی‌ریزد. جریان آب در برخورد با پلکان‌های متوالی می‌تواند دارای پرش هیدرولیکی کامل یا ناقص (بسته به طول افقی پلکان) باشد (سلماسی و همکاران، ۱۳۸۲). همچنین یک ناحیه از هوا بین جریان آب و سطح قائم پله تشکیل می‌شود که در صورت عدم هوادهی این ناحیه، فشار داخل آن به صفر نیز خواهد رسید (کاوایانپور و همکاران، ۱۳۸۶). شکل (۲-۲) جریان ریزشی بر روی پله را نشان می‌دهد.

رژیم جریان ریزشی در دبی‌های کم و ارتفاع پله‌های بزرگ اتفاق می‌افتد. استهلاک انرژی بر اثر تماس جت جریان آب و هوا، و اختلاط جت روی هر پله و تشکیل پرش هیدرولیکی کامل یا ناقص روی هر پله حاصل می‌شود (جعفری نیا و همکاران، ۱۳۸۴). جریان در انتهای بالادست هر پله دارای سه خصوصیت عمده یعنی تیغه سقوط آزاد، حفره هوا و یک استخر است که سیال در آن به چرخش درمی‌آید. پدیده حبس هوا در فصل مشترک هر کدام از جت‌های فوقانی و تحتانی به وقوع می‌پیوندد و مقداری هوای اضافی نیز به وسیله مکانیزم غوطه‌وری در محل تقاطع تیغه تحتانی با استخر آب حبس می‌شود (شمسایی و نیک نهال، ۱۳۸۴).



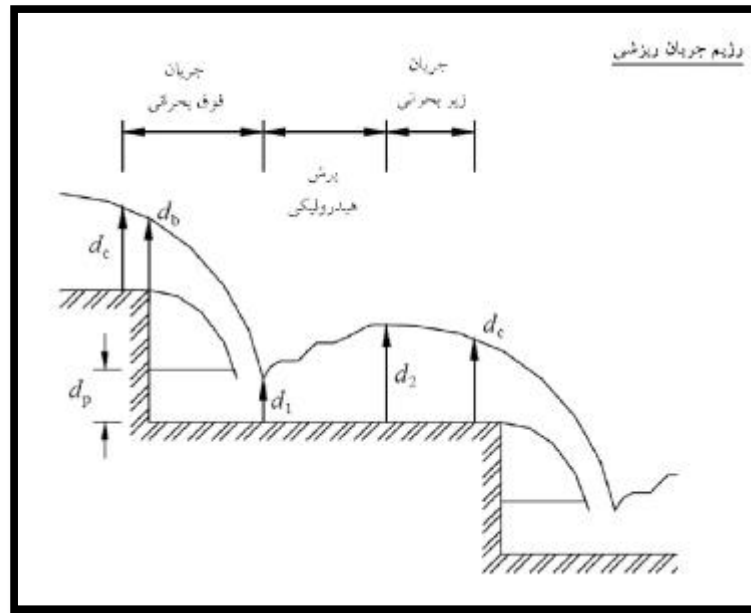
شکل ۲-۲- جریان ریزشی

۲-۴- تقسیم‌بندی رژیم جریان ریزشی

چانسون (۱۹۹۴) سه زیر رژیم برای جریان ریزشی مشخص کرد.

۲-۴-۱- پرش هیدرولیکی کاملاً توسعه یافته (NA 1)

در هر پله بعد از پرش کاملاً توسعه یافته، قبل از انتهای پله جریان ماندگار می‌شود. این حالت برای دبی‌ها یا عمق‌های جریان‌های بسیار کم اتفاق می‌افتد. اگر جریان روی پله زیربحرانی باشد، شرایط جریان در نزدیکی انتهای پله از زیربحرانی به فوق بحرانی تغییر می‌کند. بلافاصله بعد از لبه پله، فشار در وجه پایینی ریزش باید با فشار در خلأ ایجادشده در اثر ریزش برابر باشد. در نتیجه توزیع مجدد فشار، سرعت و عمق در بالادست لبه پله رخ می‌دهد. شکل (۲-۳) جریان ریزشی با پرش هیدرولیکی کاملاً توسعه یافته را نشان می‌دهد.



شکل ۲-۳- رژیم فرعی NA1

عمق جریان در لبه پله d_b با این رابطه تخمین زده می‌شود:

$$d_b = 0.715 d_c \quad (۱-۲)$$

که در آن d_c عمق بحرانی جریان است.

با به کار بردن معادلات حرکت برای جریان در انتهای پله، نسبت طول سقوط آزاد در پرتاب از پله به ارتفاع h در شیب‌شکن^۱ به طول l_d از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$\frac{l_d}{h} = \left(\frac{d_c}{h}\right)^{\frac{3}{2}} \sqrt{\frac{h}{d_b}} \sqrt{1 + 2 \frac{h}{d_b}} \quad (۲-۲)$$

^۱ DROP

معادلات مومنتم در سال ۱۹۴۳ توسط وایت^۱ برای محاسبه اتلاف انرژی در پایین دست یک ریزش آزاد به کار گرفته شد و بر اساس نتایج آن عمق آب پایین دست جریان d_1 در اثر جت برخوردی را با رابطه زیر نشان داد:

$$\frac{d_1}{d_c} = \frac{2^{1/2}}{\frac{3}{2^{3/2}} + \sqrt{\frac{3}{2} + \frac{h}{d_c}}} \quad (۳-۲)$$

عمق جریان در پایین دست پرش هیدرولیکی d_2 ، با استفاده از معادلات پیوستگی و اندازه حرکت در پرش به دست می آید. با صرف نظر از اصطکاک در کف و دیواره‌ها برای یک پله افقی خواهیم داشت:

$$\frac{d_2}{d_1} = \frac{1}{2} \left(\sqrt{1 + 8Fr_1^2} - 1 \right) \quad (۴-۲)$$

هنگام ریزش، نیرویی برای تبدیل جت ریزشی زاویه دار، در جهت موازی با کف کانال لازم است. این نیرو، در قالب نیروی عکس العمل کف و همچنین فشار از طرف استخر آب در زیر جت در حال سقوط وارد می شود. معادله مومنتم توسط مور^۲ (۱۹۴۳) برای به دست آوردن عمق استخر d_p به کار گرفته شد:

$$\frac{d_p}{d_c} = \sqrt{\left(\frac{d_1}{d_c}\right)^2 + 2\left(\frac{d_c}{d_1}\right) - 3} \quad (۵-۲)$$

¹ WHITE

² MOORE

زند^۱ (۱۹۵۵) روابط تجربی زیر را با انجام چندین آزمایش به دست آورد:

$$\frac{d_1}{h} = 0.54 \left(\frac{d_c}{h}\right)^{1.275} \quad (۶-۲)$$

$$\frac{d_2}{h} = 1.66 \left(\frac{d_c}{h}\right)^{0.81} \quad (۷-۲)$$

$$\frac{d_p}{h} = \left(\frac{d_c}{h}\right)^{0.66} \quad (۸-۲)$$

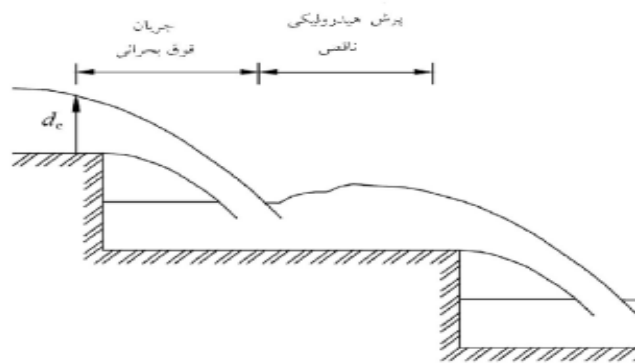
$$\frac{l_d}{h} = 4.30 \left(\frac{d_c}{h}\right)^{0.81} \quad (۹-۲)$$

۲-۴-۲-۲ پرش هیدرولیکی ناقص^۲ (NA 2)

اگر مجموع طول پرش آبشار جریان و پرش هیدرولیکی از طول پله بیشتر باشد پرش کاملاً توسعه-یافته نمی‌تواند تشکیل گردد و پرش هیدرولیکی در شدت جریان‌های بزرگ‌تر به تدریج با لبه پایین دست پله برخورد می‌کند (شمسایی و نیک نهال، ۱۳۸۴)، که در شکل (۴-۲) نشان داده شده است.

¹ RAND

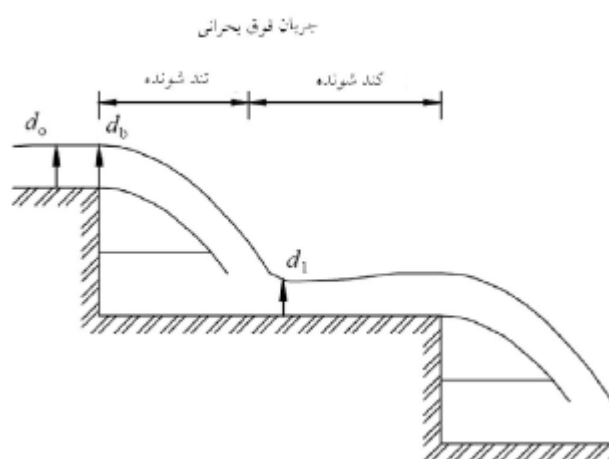
² Partially developed hydraulic jump



شکل ۲-۴- جریان ریزشی با پرش هیدرولیکی ناقص (NA2)

۲-۴-۳- بدون پرش هیدرولیکی (NA3)

روی پله پرشی اتفاق نمی‌افتد. این نوع زیر رژیم معمولاً در دبی‌های نسبتاً زیاد و قبل از وقوع جریان تبدیلی رخ می‌دهد. خصوصاً وقتی در بالادست، جریان فوق بحرانی است. در صورتی که جریان بالادست ریزش، فوق بحرانی باشد تحلیل خصوصیات جریان در لبه پیچیده است چون شرایط جریان بحرانی در بالادست شیب‌شکن تشکیل نمی‌شود و نوع جریان در هر شرایطی فوق بحرانی است و الگوهای سه‌بعدی جریان مثلاً امواج ضربه‌ای یا امواج دیواره‌های جانبی را می‌توان در آن مشاهده کرد (شمسایی و نیک نهال، ۱۳۸۴)، که در شکل (۲-۵) نشان داده شده است.



شکل ۲-۵- جریان ریزشی بدون پرش هیدرولیکی (NA3)

با استفاده از معادله مومنتم در بالادست شیب‌شکن خواهیم داشت:

$$1+2Fr_0^2 = \sqrt{2} Fr_0 \left(\sqrt{\frac{1+Fr_0^2}{2-\frac{d_b}{d_0}}} + \sqrt{\frac{1+Fr_0^2}{2}} \right) \quad (10-2)$$

که در آن d_0 و Fr_0 عمق و عدد فرود بالادست شیب‌شکن هستند.

هاگر (۱۹۸۳) رابطه زیر را با خطای حداکثر ۱٪ قابل قبول دانست:

$$\frac{d_b}{d_0} = \frac{Fr_0^2}{Fr_0^2 + \frac{4}{9}} \quad (11-2)$$

مارچی (۱۹۹۳) رابطه‌ای را برای مسیر یک سقوط آزاد ریزشی با استفاده از معادله انرژی به صورت زیر

به دست آورد:

$$\frac{\Delta z}{d_0} = \frac{2 \left(\left(\frac{x}{d_0} \right)^2 + \frac{x}{d_0} \right)}{(Fr_0^{-1} + 2Fr_0)^2} \quad (12-2)$$

که x فاصله پایین‌دست از لبه پله‌ی سرریز است. با رابطه زیر می‌توان طول شیب‌شکن را تعیین کرد:

$$\frac{l_d}{h} = \frac{d_0}{2h} \left(\sqrt{1 + (Fr_0^{-1} + 2Fr_0)^2 \left(2\frac{h}{d_0} + \frac{d_b}{d_0} \right)} - 1 \right) \quad (13-2)$$

با استفاده از همین روش، وایت در سال ۱۹۴۳ با استفاده از معادله مومنتم عمق جریان پایین‌دست

ریزش را چنین محاسبه نمود:

$$\frac{d_1}{d_0} = \frac{4Fr_0^2}{1 + 2Fr_0^2 + 2Fr_0 \sqrt{Fr_0^2 + 2\frac{h}{d_0} + 2}} \quad (14-2)$$

۲-۵- جریان رویه‌ای (رژیم جریان غیر ریزشی)

در رژیم جریان غیر ریزشی، پلکان‌ها مانند زبری بزرگ در برابر جریان عمل می‌نمایند. در این نوع رژیم یک بستر کاذب که آستانه انتهایی پلکان‌های متوالی را به یکدیگر متصل می‌سازد، تشکیل می‌گردد (سلماسی و همکاران، ۱۳۸۲). گرداب‌های چرخشی، در گنج پله‌ها زیر جریان اصلی (کف کاذب^۱) شکل می‌گیرد. این گرداب‌ها، به واسطه تنش برشی جریان، منتشر شده و در استهلاک انرژی جریان روی پلکان نقش زیادی دارند. جریان در انتهای بالادست صاف است و هوا در آن محبوس نمی‌شود. خصوصیات جریان پس از طی چند پله تغییر می‌کند، به این معنی که در پله هوای زیادی محبوس می‌شود و گردابه‌های شدیدی به وجود می‌آید (شمسایی و نیک نهال، ۱۳۸۴). با رشد لایه مرزی تلاطم و رسیدن به سطح آب، ورود هوا در پله‌های پایین دست صورت گرفته و میزان تلاطم به حداکثر می‌رسد. شکل (۲-۶) جریان غیر ریزشی روی سرریز را نشان می‌دهد. در صورت طولانی بودن سرریز، جریان در پنجه سرریز به صورت کف آلود درآمده و سیال به صورت آب سفید^۲ ظاهر می‌شود. لازم به ذکر است که در شدت جریان‌های بسیار بالا پله‌ها نقش زبری را ایفا می‌کنند و نقش چندانی در استهلاک انرژی ندارد (جعفری نیا و همکاران، ۱۳۸۴).

اکثر محققین پیشنهاد نموده‌اند که بالای خط کف کاذب جریان، سرعت موضعی مخلوط آب و هوا به حداکثر سرعت جریان بستگی دارد و از این رو پارامتر سرعت از قانون توانی به شرح ذیل به دست می‌آید:

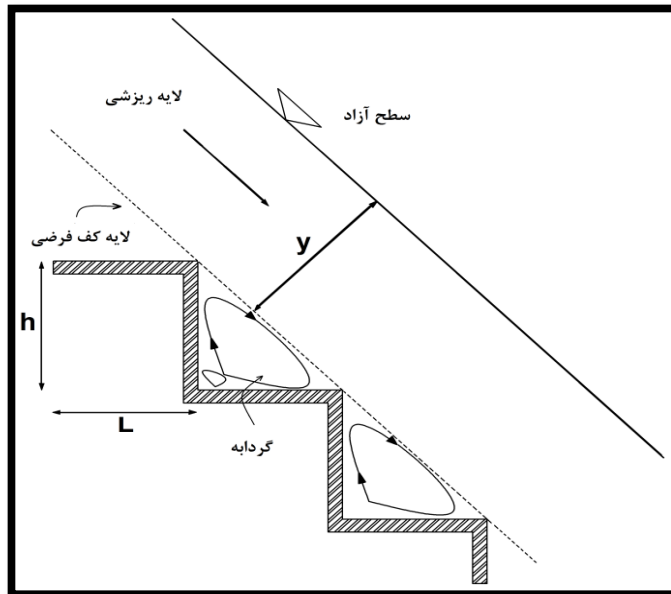
$$U_{90} = DY_{90}^{1/N} \quad (15-2)$$

¹ Pseudo_bottom

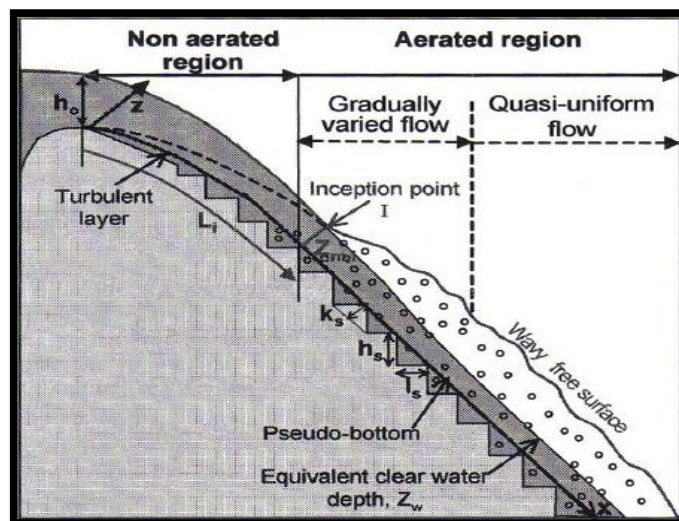
² White water

متغیرهای u_{90} و y_{90} به ترتیب معرف سرعت و عمق در نقطه‌ای از جریان هستند که غلظت هوا به ۹۰ درصد می‌رسد (بهشتی و همکاران، ۱۳۹۴).

به ترتیب پارامترهای بی‌بعد سرعت و عمق جریان دوفازی آب‌وهوا می‌باشند. $U_{90} = \frac{u}{u_{90}}$ و $Y_{90} = \frac{y}{y_{90}}$



شکل ۲-۶- رژیم جریان غیر ریزشی (شمسایی و نیک نهال، ۱۳۸۴)

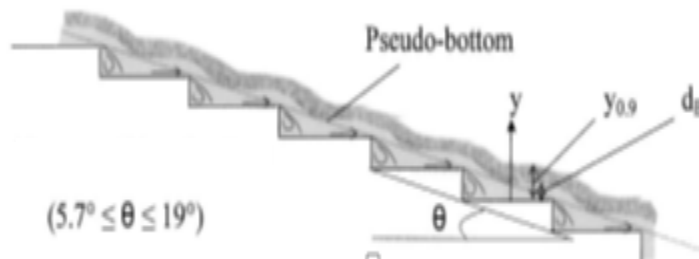


شکل ۲-۷- جریان از روی سرریز پلکانی با رژیم غیر ریزشی و تقسیم‌بندی نواحی جریان (شفیعی پور، ۱۳۹۲)

۲-۵-۱- تقسیم‌بندی رژیم جریان غیر ریزشی

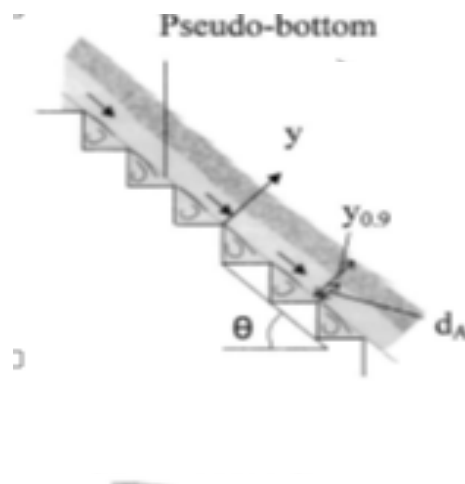
بر اساس رفتار گرداب‌ها، چانسون (۱۹۹۴) جریان رویه‌ای را به دودسته فرعی تقسیم کرد که ذیلاً شرح داده می‌شوند. جریان رویه‌ای شباهت‌های زیادی به جریان روی شوت صاف دارد.

نوع A (SK1): برای شیب‌های خیلی کم، ناحیه گردابی در پایین لبه پله شکل می‌گیرد. سطح آب تقریباً موازی با خط فرضی می‌باشد که از لبه پله‌ها می‌گذرد. همان‌طور که در شکل (۲-۸) مشاهده می‌شود گرداب به‌طور کامل در طول پله توسعه نمی‌یابد. الگوی جریان در گرداب، ناپایدار بوده و در پایین‌دست گرداب مقداری مقاومت سطحی به وجود می‌آید



شکل ۲-۸- رژیم جریان غیر ریزشی نوع A

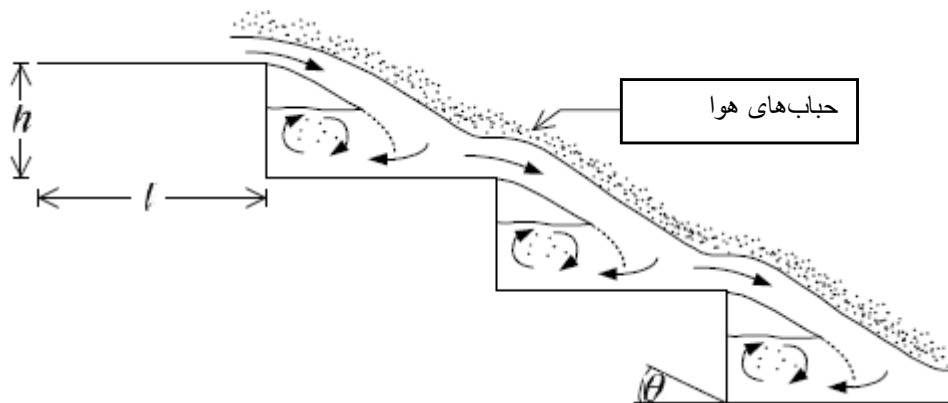
نوع B (SK2): برای شیب‌های بالاتر، ناحیه گردابی کاملاً در طول توسعه‌یافته و به گرداب پله بعدی می‌رسد. شکل (۲-۹) نمایی از این نوع رژیم را نشان می‌دهد در این حالت مقاومت سطحی وجود ندارد.



شکل ۲-۹- رژیم جریان غیر ریزشی نوع B

۲-۶- رژیم جریان انتقالی

اگر جریان عبوری از روی سرریزهای پلکانی با شیب و تعداد پله‌های دلخواه، در دبی‌های کم به صورت ریزشی باشد، به تدریج که دبی افزایش داده می‌شود، حالتی مشاهده می‌گردد که در حد مرز بین دو جریان غیر ریزشی و ریزشی بوده و در آستانه تبدیل به رژیم غیر ریزشی است، که این نوع جریان، رژیم جریان انتقالی نامیده می‌شود (رسایی و همکاران، ۱۳۸۸)، که از مشخصه‌های بارز آن می‌توان به رفتار آشفته جریان، برخورد شدید جت آب به کف پله‌ها، پاشش قطرات آب به هوا در پایین دست نقطه شروع هوادهی سطحی جریان و ایجاد ریزگردابه‌ها در زیر جت عبوری جریان در پله‌های انتهایی و تشکیل جریان نسبتاً استخری و وجود حفره هوا در پله‌های اولیه تنداب اشاره نمود. شکل (۲-۱۰) نمایی از این نوع رژیم جریان را نشان می‌دهد. به عبارت دیگر در این نوع رژیم، الگوی جریان در برخی از پله‌های بالادست به صورت نسبتاً ریزشی و در برخی از پله‌های پایین دست به صورت رویه‌ای مشاهده می‌گردد (بهشتی و همکاران، ۱۳۹۱).

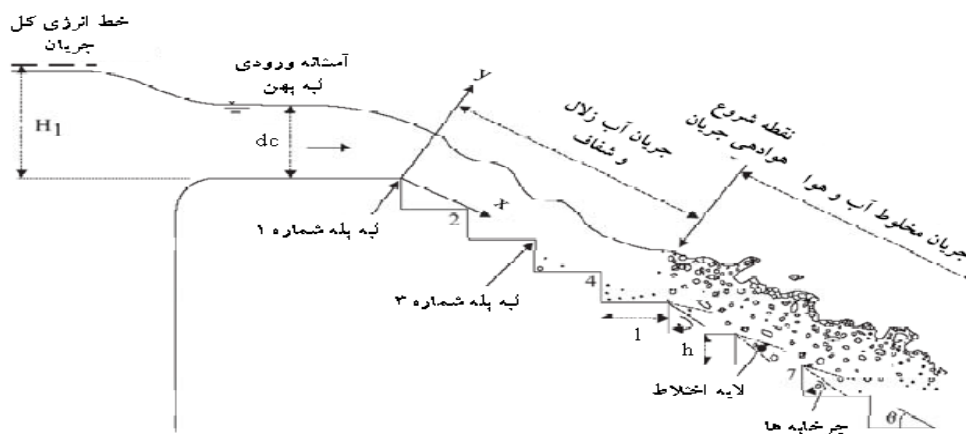


شکل ۲-۱۰- رژیم جریان انتقالی (تبدیلی)

۲-۷- ورود هوا در سرریزهای پلکانی

یکی از پدیده‌های هیدرولیکی حائز اهمیت که در ارتباط با سرریزهای پلکانی همواره مطرح بوده و اغلب نیز در طراحی این سازه‌ها مورد توجه قرار نگرفته است، اندرکنش‌های بین جریان آب عبوری و

جریان هوا است که منجر به اختلاط شدید آب و هوا و ایجاد پیچیدگی زیاد در تحلیل هیدرولیکی این نوع جریان دوفازی می‌گردد (بهشتی و همکاران، ۱۳۹۱). مقدار هوای محبوس، حجم جریان آب را افزایش داده که در تعیین ارتفاع دیواره‌های جانبی سرریز نقش مهمی را ایفا می‌کند. وجود هوا در لایه مرزی، تنش برشی را در لایه‌های جریان کاهش می‌دهد، بنابراین افزایش مومنتم جریان باید در طراحی سازه‌های هیدرولیکی مدنظر قرار گیرد. از طرفی وجود هوا در جریان‌های با سرعت بالا ممکن است از خرابی ناشی از خوردگی یا کاویتاسیون جلوگیری کند یا آن را کاهش دهد (جوان و همکاران، ۱۳۹۲). شکل (۲-۱۱) برخی مؤلفه‌های جریان را نشان می‌دهد که با مشاهده رژیم جریان، می‌توان جریان را در نواحی مختلف تشریح کرد. نزدیک تاج سد، در ناحیه بدون هوا که جریان آب تند شونده است که لایه مرزی سریعاً رشد کرده و به سطح آب می‌رسد در این ناحیه انرژی چرخش‌ها بسیار بیشتر از کشش سطحی و تأثیرات آن‌ها و نیروی جاذبه است. در این زمان هوادهی طبیعی شروع می‌شود و محل شروع این هوادهی به نام نقطه شروع^۱ هوادهی نامیده می‌شود (شفیعی پور و همکاران، ۱۳۹۲). بلافاصله در پایین دست این نقطه، تلاطم در مجاورت سطح آزاد جریان در حدی است که منجر به شروع هوادهی شدید می‌گردد (بهشتی و همکاران، ۱۳۹۱).



شکل ۲-۱۱- نمایش برخی از مؤلفه‌های هیدرولیکی جریان و هندسه تنداب پلکانی (بهشتی و همکاران، ۱۳۹۴)

¹ Inception point

درواقع ورود هوا هنگامی به وقوع می‌پیوندد که انرژی جنبشی تلاطم به قدری زیاد باشد که بر نیروی کششی سطحی غالب شده و از سرعت بالا آمدن حباب‌های هوای موجود در جریان، بیشتر باشد. این شرایط به صورت زیر بیان می‌شوند :

$$\vartheta > \sqrt{\frac{8\sigma}{\rho_w d_{ab}}} \quad (16-2)$$

$$\vartheta > U_r \cos \alpha \quad (17-2)$$

در روابط فوق ϑ : انرژی جنبشی تلاطم، σ : کشش سطحی، ρ_w : جرم مخصوص آب، d_{ab} : قطر حباب‌های هوا، U_r : سرعت بالا آمدن حباب‌های هوا و α : شیب کف کانال است (شمسای و نیک نهال، ۱۳۸۴).

تعیین موقعیت نقطه شروع هوادهی جریان در طول سرریز پلکانی از نظر برآورد ناحیه هوادهی نشده^۱ جریان (عمق جریان آب زلال) که در معرض خطر کایتاسیون قرار دارد بسیار حائز اهمیت است. موقعیت نقطه شروع هوادهی طبیعی جریان تابعی از زبری سطح (K_s)، دبی جریان و شیب سرریز (θ) است. پارامتر K_s ، بیانگر ارتفاع زبری سطح پله بوده و برحسب $h \cos \theta$ بیان می‌گردد. Fr^* عدد فرود جریان برحسب زبری پله است (بهشتی و همکاران، ۱۳۹۱).

$$Fr^* = q_w / \sqrt{(h \cos \theta)^3 g \sin \theta} \quad (18-2)$$

¹Clear water

سطح آب در این ناحیه (نقطه شروع هوادهی) سفید و شیری‌رنگ است که حاصل ورود هوا به داخل جریان می‌باشد. این جریان نسبتاً توسعه‌یافته به آهستگی افزایش عمق می‌یابد که حاصل محبوس شدن کیسه‌های هوا درون جریان است.

مکانیسم ورود هوا به داخل جریان در سرریزهای پلکانی در دو نوع رژیم ریزشی و غیر ریزشی به صورت زیر می‌باشد :

در رژیم جریان ریزشی، مفهوم نقطه شروع قابل فهم و عینی نیست چون هوا در همان پله اول پس از تاج سد وارد می‌شود. باین حال در رژیم جریان ریزشی ورود هوا بر اثر برخورد جت آزاد بر روی پله بعدی و یا تشکیل پرش هیدرولیکی صورت می‌گیرد. اگر در محل برخورد جت، استخر موجود عمیق باشد، اکثر هوای ورودی بر اثر جت برخوردی و به همراه ورود آن به داخل استخر صورت می‌گیرد. برای پلکان‌های افقی و آب کم عمق روی آن، اکثر هوای ورودی در پایاب پرش هیدرولیکی وارد جریان می‌گردد (شمسایی و نیک نهال، ۱۳۸۴).

ناحیه جریان هوا داده شده در جریان رویه‌ای از شرایطی شبیه به سطح آزاد و شیشه‌ای تبعیت می‌کند. بهر حال در جوار مرز جریان با هوا، تلاطم ایجاد می‌شود و لایه مرزی تا زمانی که لبه‌ی خارجی آن به سطح آزاد می‌رسد رشد می‌یابد. وقتی که لبه‌ی خارجی لایه مرزی به سطح آزاد می‌رسد تلاطم می‌تواند هوادهی سطح آزاد را آغاز نماید.

۲-۸- خلاءزایی (کاویتاسیون)

پدیده کاویتاسیون اغلب با فرایند جوشیدن آب در فشار اتمسفر مقایسه می‌شود. آب با افزایش دما در فشار ثابت به جوش آمده و از حالت مایع به گاز تبدیل می‌شود. با کاهش فشار منطقه، آب در دمای کمتری به جوش می‌آید. پدیده کاویتاسیون برخلاف فرایند جوشیدن آب، در دمای ثابت و در اثر کاهش فشار موضعی سیال به وقوع می‌پیوندد (خاتسوریا، ۲۰۰۵). کاویتاسیون پدیده‌ای است که در سرعت‌های بالا به وقوع می‌پیوندد و باعث ایجاد خرابی و حفره در سازه می‌شود. در یک سیستم هیدرولیکی با

افزایش سرعت جریان، فشار موضعی جریان کاهش می‌یابد و این کاهش فشار امکان دارد تا حد فشار بخار سیال ادامه یابد تا حدی که سیال به حالت بخار درآید. همچنین احتمال دارد که در طول سرریز و یا مستهلک کننده انرژی در اثر وجود ناصافی یا ناهمواری‌های موجود در کف، خطوط جریان از بستر خود جدا شده و بر اثر این جداشدگی فشار موضعی در محل جداشدگی کاهش یافته و حتی ممکن است به فشار بخار سیال برسد و سیال به بخار تبدیل شود. حباب‌های بخار تولید شده پس از طی مسیر کوتاهی به منطقه‌ای با فشار بیشتر رسیده و منفجر می‌شوند و ایجاد سروصدا می‌کند. امواج ضربه‌ای ایجاد شده به مرز بین سیال و سازه ضربه‌های شدیدی وارد می‌کنند و منجر به ایجاد فرسایش و خوردگی روی مرز جامد سازه می‌شوند. تبدیل مجدد حباب‌ها به مایع و فشار حاصله از انفجار آن‌ها گاهاً به ۱۵۰۰ مگا پاسکال می‌رسد (فدایی کرمانی و همکاران، ۱۳۹۰). این فرآیند در مدت‌زمان کوتاهی به وقوع می‌پیوندد و در اثر تداوم و تکرار زیاد وقوع آن، بستر سرریزها دچار خوردگی می‌شود و به تدریج این خوردگی‌ها به حفره‌های بزرگ تبدیل می‌شوند.

به‌طور کلی می‌توان خسارت ناشی از پدیده کاویتاسیون در سازه‌های هیدرولیکی را تابعی از سرعت جریان، فشار جریان، مقاومت مصالح مصرفی، سختی مرزها و میزان هوای موجود در جریان دانست (لی و همکاران، ۱۹۹۶). سرریزهای بلند از جمله سازه‌های هیدرولیکی می‌باشند که وقوع پدیده کاویتاسیون در آن‌ها بسیار محتمل است. به علت سرعت زیاد جریان روی سرریزها، ناصافی‌ها و نامنظمی‌های بسیار کوچک در حد چند میلی‌متر در سطوح سازه می‌تواند منجر به جداشدگی جریان و در نتیجه کاهش فشار موضعی و در نهایت به وقوع پدیده کاویتاسیون و فرسایش و خرابی سازه ختم گردد.

معمولاً برای بررسی امکان وقوع پدیده کاویتاسیون در سرریزها از شاخص کاویتاسیون (σ) استفاده می‌شود. زمانی که شاخص کاویتاسیون در هر نقطه از سرریز از مقدار بحرانی شروع کاویتاسیون (σ_i) بیشتر باشد امکان وقوع این پدیده کم است. معادله شماره (۲-۱۹) نحوه محاسبه این شاخص را نمایش می‌دهد:

$$\sigma = \frac{p + p_v}{\rho \frac{v^2}{2}} \quad (19-2)$$

در معادله فوق p فشار موضعی سیال، p_v فشار بخار آب، v سرعت موضعی سیال و ρ جرم مخصوص آب است.

در تعیین شاخص بحرانی کاویتاسیون بر اساس هندسه و نوع زبری سطح روابط متعددی ارائه گردیده است. به عنوان مثال بر اساس نتایج فالوی (۱۹۹۰) برای زبری مفرد شاخص کاویتاسیون بحرانی از معادله (۲۰-۲) محاسبه می شود:

$$\sigma_i = \frac{h - h_v}{\frac{v_0^2}{2g}} \quad (20-2)$$

که در آن h ارتفاع معادل فشار مطلق سیال، h_v ارتفاع معادل فشار تبخیر و v_0 سرعت در نزدیکی بالای زبری است.

آرنت (۱۹۷۹) نشان داد که پدیده کاویتاسیون می تواند روی سطوح با زبری یکنواخت نیز تشکیل گردد که بر این اساس وی رابطه ای بر اساس f ضریب اصطکاک در معادله دارسی - ویسباخ ارائه کرد:

$$\sigma_i = 4f \quad (21-2)$$

۹-۲- استهلاک انرژی

مطالعات انجام گرفته و در دست انجام درزمینه ی سرریزهای پلکانی عموماً بر روی سه موضوع متمرکز بوده است که عبارت اند از استهلاک انرژی در سرریزهای پلکانی و بررسی انواع راهکارها جهت افزایش استهلاک انرژی جریان، بررسی انواع رژیم های جریان تشکیل شده بر روی سرریزهای پلکانی و تعیین

معیارهای تشخیص انواع جریان اعم از ریزشی، تبدیلی و غیر ریزشی و سرانجام طراحی سرریزهای پلکانی. در این تحقیق نیز به بررسی استهلاک انرژی بر روی سرریز پلکانی پرداخته می‌شود با این تفاوت که سرریز مجهز به لبه در انتها و وسط پله است.

استهلاک انرژی جریان آب از روی سرریز سدها معمولاً به یکی از سه صورت زیر اتفاق می‌افتد :

◀ کم کردن سرعت جریان آب از طریق جام پرتابی (یا از تاج سد) و پرتاب درون یک استخر پر از آب در پایین دست که شبیه به بالشتک آب عمل می‌کند (برای مثال سد کاستانگ در فرانسه^۱).

◀ احداث یک حوضچه آرامش استاندارد در پایین دست سرریز به طریقی که پرش هیدرولیکی به وجود آمده در آن بتواند مقدار قابل توجهی از انرژی را مستهلک کند (برای مثال طرح‌های دفتر اصلاح خاک آمریکا).

◀ تعبیه تعدادی پله روی سرریز برای کمک به استهلاک انرژی (برای مثال سد گریک گلد استرالیا^۲) (شمسای و نیک نهال، ۱۳۸۴).

استهلاک بالای انرژی از جمله مهم‌ترین ویژگی سرریز پلکانی به شمار می‌رود، به طوری که بخش عظیمی از انرژی جنبشی جریان حین عبور از روی پله‌های متوالی به پایین دست کاهش می‌یابد. سرریزهای پلکانی با استفاده از پله‌پله شدن پروفیل کف سرریز، مقاومت هیدرولیکی در برابر جریان را افزایش داده و بخش قابل توجهی از انرژی جریان آب در ضمن عبور از روی پله‌ها مستهلک می‌گردد. در واقع، این نوع سرریزها مشابه آبراهه با زبری زیاد محسوب می‌شوند. در این صورت چنانچه بتوان با افزایش زبری، بخشی از انرژی جریان را در ضمن عبور از روی سرریز و تند آب مستهلک نمود، ابعاد سازه کاهنده انرژی در پایاب کاهش می‌یابد (نادری راد و همکاران، ۱۳۸۸).

¹ Chastang Dam, France

² Gold Greek Dam, Australia

۲-۹-۱- استهلاک انرژی در رژیم جریان ریزشی

برای جریان ریزشی چندین روش جهت به دست آوردن انرژی مستهلک شده ارائه شده است. چانسون^۱ (۱۹۹۴) با استفاده از معادله ارائه شده توسط رند (۱۹۵۵) برای شیب شکن قائم، معادله زیر را برای تعیین استهلاک انرژی جریان از روی سرریزهای پلکانی ارائه نمود:

$$\frac{\Delta H}{H_t} = 1 - \left[\frac{0.54 \left(\frac{y_c}{h}\right)^{0.275} + 1.715 \left(\frac{y_c}{h}\right)^{-0.55}}{1.5 + \frac{H_{dam}}{y_c}} \right] \quad (22-2)$$

رابطه (۲۲-۲) برای شوت بدون دریچه می باشد و رابطه زیر برای شوت دریچه دار ارائه شده است.

$$\frac{\Delta H}{H_t} = 1 - \left[\frac{0.54 \left(\frac{y_c}{h}\right)^{0.275} + 1.715 \left(\frac{y_c}{h}\right)^{-0.55}}{\frac{H_{dam} + H_0}{Y_c}} \right] \quad (23-2)$$

در این روابط $\frac{\Delta H}{H_t}$ = افت نسبی انرژی، H_{dam} = ارتفاع کل سرریز، H_0 = بار آب روی تاج سد، y_c = عمق

بحرانی و h = ارتفاع پله، ΔH = استهلاک انرژی کل، H_t = انرژی بالادست سرریز می باشند

معادلات فوق برای جریان های ریزشی با پرش هیدرولیکی کامل تدوین شده اند، با این وجود چانسون اعتقاد دارد که این معادلات برای جریان های ریزشی با پرش هیدرولیکی ناقص نیز دارای کاربرد هستند. درستی این امر با توجه به آزمایش های گوناگون به اثبات رسیده است.

برای بررسی میزان استهلاک انرژی در رژیم جریان ریزشی چمنی و راجاراتنام^۲ (۱۹۹۴) روش زیر را پیشنهاد دادند:

¹ Chanson

² Chamani and Rajaratnam

با فرض یک سرریز پلکانی با طول l برای هر پله، h ارتفاع پله و N تعداد کل پله‌ها داشته باشیم. در این صورت ارتفاع کل سرریز برابر $H_{dam} = Nh$ خواهد بود. با فرض α ، ضریب افت انرژی برای هر پله خواهیم داشت، میزان افت انرژی و انرژی باقیمانده در هر پله به صورت زیر محاسبه خواهد شد:

$$\alpha(h + 1.5y_c) \quad \text{افت انرژی در پله اول}$$

$$(1 - \alpha)(h + 1.5y_c) \quad \text{انرژی باقیمانده در پله اول}$$

$$\alpha[(1 - \alpha)(h + 1.5y_c)] + h \quad \text{افت انرژی در پله دوم}$$

$$(1 - \alpha)[(1 - \alpha)(h + 1.5y_c)] + h \quad \text{انرژی باقیمانده در پله دوم}$$

بنابراین انرژی باقیمانده در N امین پله به صورت زیر است :

$$H = (1 - \alpha)^N (h + 1.5y_c) + h \sum_{i=1}^{N-1} (1 - \alpha)^i \quad (24-2)$$

همچنین می توان رابطه افت انرژی نسبی را به صورت زیر نشان داد :

$$\frac{\Delta H}{H_t} = 1 - \frac{(1 - \alpha)^N \left(1 + 1.5 \frac{y_c}{H}\right) + \sum_{i=1}^{N-1} (1 - \alpha)^i}{N + 1.5 \left(\frac{y_c}{H}\right)} \quad (25-2)$$

در روابط فوق $\frac{\Delta H}{H_t}$ = افت نسبی انرژی، h = ارتفاع پله، N = تعداد کل پله‌ها، y_c = عمق بحرانی و α = ضریب افت انرژی برای هر پله می باشند.

چمنی و راجاراتنام رابطه زیر را برای نشان دادن تغییرات α با h/l ارائه دادند:

$$\alpha = a - b * \log\left(\frac{y_c}{h}\right) \quad (2-26-الف)$$

$$a = 0.30 - 0.35\left(\frac{h}{l}\right) \quad (2-26-ب)$$

$$b = 0.54 + 0.27\left(\frac{h}{l}\right) \quad (2-26-ج)$$

a, b = ضرایبی توصیفی معادله (2-26-الف)

چانسون در بحثی که در مورد نتایج تحقیقات چمنی و راجاراتنام ارائه داده است، چنین اظهار می‌دارد که در کاربردهای مهندسی کاربرد فرمول (2-22) راحت‌تر از فرمول (2-25) برای محاسبه میزان افت انرژی نسبی بوده و در رابطه (2-22) نیازی به محاسبه ضریب افت انرژی در هر پله نمی‌باشد (رستمی راوری، 1385).

2-10- شروع رژیم جریان غیر ریزشی

اولین معیار برای توصیف شروع رژیم غیر ریزشی توسط راجاراتنام ارائه گردید. وی شروع رژیم جریان غیر ریزشی را به ازای $y_c/h > 0.8$ ارائه نمود. این معیار بر اساس اطلاعات موجود از آزمایش‌های اسری و هورنر (1971) و در محدوده شیب‌های $h/l = 0.4 - 0.9$ ارائه گردید (راجارتنام و چمنی، 1999).

دومین رابطه توسط چانسون (1994) برای توصیف شرایط شروع رژیم جریان غیر ریزشی ارائه گردید. رابطه ارائه‌شده توسط وی، بر اساس اطلاعات موجود از آزمایش‌ها برای شیب‌های $h/l = 0.2 - 1.25$ (11 تا 51 درجه) بود. نتایج بررسی‌های وی نشان داد که برای وقوع رژیم جریان غیر ریزشی، می‌بایست دبی جریان از یک مقدار مشخصه بحرانی بیشتر گردد. این دبی مشخصه برای شروع رژیم غیر ریزشی $\{(y_c)_{onset}\}$ به صورت رابطه زیر ارائه گردید:

$$\frac{(y_c)_{onset}}{h} = 1.057 - 0.465 \frac{h}{l} \quad (27-2)$$

در این رابطه y_c = عمق بحرانی، h = ارتفاع پله و l = طول پله می‌باشند.

چمنی و راجاراتنام حد بالایی رژیم جریان ریزشی را به صورت زیر ارائه نمودند:

$$\frac{h}{l} = 0.405 \left(\frac{y_c}{h} \right)^{-0.62} \quad (28-2)$$

در حالی که شرایط شروع رژیم جریان غیر ریزشی برای سرریزهای با شیب بیشتر از ۴۵ درجه به صورت

زیر بیان گردید (حیدرزاده و بنی‌هاشمی، ۱۳۸۴):

$$\frac{h}{l} = \sqrt{0.89 \left[\left(\frac{y_c}{h} \right)^{-1} - \left(\frac{y_c}{h} \right)^{-0.34} + 1.5 \right] - 1} \quad (29-2)$$

در این روابط y_c = عمق بحرانی، h = ارتفاع پله و l = طول پله می‌باشند.

ياسودا و اهاتسو^۱ (۲۰۰۴) روش متفاوتی را با معرفی رژیم تبدیلی ارائه نمودند و نشان دادند روش

مذکور با اطلاعات موجود از آزمایش‌ها تطابق دارد. آن‌ها با تجزیه و تحلیل‌های خود، دو معادله برای

توصیف حد بالایی رژیم جریان ریزشی و حد پایینی رژیم جریان غیر ریزشی به صورت زیر ارائه نمودند:

$$\frac{y_c}{h} = \frac{\left(1.4 - \frac{h}{l} \right)^{0.26}}{1.4} \quad (30-2)$$

$$\frac{y_c}{h} = 0.862 \left(\frac{h}{l} \right)^{-0.165} \quad (31-2)$$

روابط فوق برای سرریزهای با شیب کمتر از ۵۵ درجه به دست آمده‌اند. در این روابط y_c = عمق

بحرانی، h = ارتفاع پله و l = طول پله می‌باشند.

¹ Ohtsu and Yasuda

همچنین یاسودا و اهاتسو در تحقیق دیگری دو معادله برای توصیف حد بالایی رژیم جریان ریزشی و حد پایینی رژیم جریان غیر ریزشی که در شیب‌های مابین ۵/۷ تا ۵۵ درجه صادق است، را به صورت زیر ارائه نمودند.

$$\frac{y_c}{h} = \frac{1}{0.57(\tan\theta)^3 + 1.3} \quad 5.7 \leq \theta \leq 55 \quad (32-2)$$

$$\frac{y_c}{h} = \frac{1}{1.16(\tan\theta)^{0.165}} \quad 5.7 \leq \theta \leq 55 \quad (33-2)$$

رابطه (۳۲-۲) مربوط به حد بالای جریان ریزشی و رابطه (۳۳-۲) مربوط به حد پایین جریان غیر ریزشی است. در این روابط y_c = عمق بحرانی، h = ارتفاع پله و θ = شیب سرریز می‌باشند. روابطی نیز توسط چیناراسری (۲۰۰۲) جهت این امر پیشنهاد شده است.

$$\frac{y_c}{h} = 0.98(0.55) \frac{h}{l} \quad (34-2)$$

$$\frac{y_c}{h} = 0.8 \left(\frac{h}{l}\right)^{-0.22} \quad (35-2)$$

رابطه (۳۴-۲) مربوط به حد بالای جریان ریزشی و رابطه (۳۵-۲) مربوط به حد پایین جریان غیر ریزشی است. در این روابط y_c = عمق بحرانی، l = طول پله و h = ارتفاع پله می‌باشند. حیدری ارجلو و همکاران (۱۳۸۷) نیز محدوده پایین شروع جریان غیر ریزشی را با معادله زیر تعیین نمودند.

$$\frac{y_c}{h} = 1.204 - 0.463 \frac{h}{l} \quad (36-2)$$

در این رابطه l = طول پله، y_c = عمق بحرانی و h = ارتفاع پله می‌باشند.

۲-۱۱- مطالعات انجام شده بر روی سرریزهای پلکانی

۲-۱۱-۱- تحقیقات آزمایشگاهی صورت گرفته بر روی سرریزهای پلکانی

از آنجایی که جریان آب روی سرریز پلکانی رژیم‌های متلاطم مختلفی را تجربه می‌کند، لذا خواص جریان شامل عمق آب، سرعت، غلظت هوا و پراکنش انرژی، با توجه به خواص این سه نوع رژیم به صورت جداگانه تحت بررسی قرار می‌گیرد. بنابراین برای یک طراح، تخمین رژیم‌های جریان احتمالی برای دبی طرح بسیار مهم خواهد بود (کاویانپور و همکاران، ۱۳۸۶). به همین دلیل، شرایط ایجاد رژیم‌های مختلف جریان موضوع مطالعه تعدادی از تحقیقات آزمایشگاهی بوده است. اوتسو و همکاران (۱۹۹۸) پارامتر مقاومت جریان را بر روی سرریز پلکانی مورد بررسی قراردادند و بیان کردند که مقاومت جریان در دبی‌های بالا بستگی به گرداب‌های تشکیل شده در گوشه پله دارد و حداکثر مقاومت در سرریزهایی با شیب ۱۹ درجه به دست آمد.

کریستودلو (۱۹۹۳) نتایج آزمایش‌های مدل‌سازی خود و همچنین سورنسن را به این صورت ارائه کرد که تأثیر تعداد پلکان‌ها بر روی استهلاک انرژی مشهود است و به ازای هر مقدار $\frac{yc}{h}$ (نسبت عمق بحرانی به ارتفاع پلکان) مقدار افت انرژی با افزایش تعداد پلکان، افزایش می‌یابد و تأثیر تعداد پلکان در دبی‌های بالا، بیشتر می‌شود. همچنین به ازای یک دبی معین، استهلاک انرژی با افزایش ارتفاع کل سرریز کاهش می‌یابد.

احمدیار و بیات (۱۳۷۲) بر اساس آزمایش‌هایی که بر روی سرریز پلکانی انجام دادند به این نتیجه رسیدند که با افزایش دبی جریان، میزان افت انرژی کاهش می‌یابد. در اثر پلکانی شدن سرریز میزان قابل توجهی از انرژی مستهلک می‌گردد و در نتیجه ابعاد حوضچه آرامش مورد نیاز کاهش می‌یابد. همچنین با افزایش زاویه کف پله، میزان افت انرژی کاهش می‌یابد. لذا در شیب‌های عمومی بیشتر از ۱:۱، شیب‌دار کردن کف پله‌ها اثر مثبت بر روی میزان استهلاک انرژی ندارد.

فتحی و همکاران (۱۳۸۸) باهدف بررسی محل هواگیری طبیعی در جریان غیر ریزشی، از مدل فیزیکی با انتخاب سه شیب تند آب در پایین دست تاج استفاده کردند. لذا در قسمت تند آب بعد از سهمی تاج استاندارد و قبل از شروع پله‌ها، از سه شیب مختلف ۰/۷: ۱، ۰/۹: ۱ و ۱:۱ استفاده شده است. سپس مدل‌ها در فلوم آزمایشگاه هیدرولیک دانشگاه شهید چمران نصب شد. آزمایش‌ها به ازای ۵ دبی مختلف در واحد عرض (با دامنه ۰/۰۳۶ الی ۰/۰۷۲ مترمربع بر ثانیه) انجام پذیرفته است. مشاهدات نشان می‌دهد هنگام عبور جریان از روی تاج تا فاصله خاصی از تاج مذکور هواگیری در سطح آب صورت می‌گیرد. همچنین هندسه پایین دست تاج اوجی باعث تغییر در هیدرولیک جریان و منجر به تغییر در توسعه لایه مرزی شده است. همچنین ملاحظه گردید که اوجی ۱:۱ در مقایسه با دیگر شیب‌ها عملکرد مناسب‌تری را از نظر هیدرولیکی نشان می‌دهد و طول نقطه هواگیری کمتری را ایجاد می‌نماید که با افزایش شیب تند آب در پایین دست تاج، طول در اوجی ۰/۷: ۱ معادل ۳۳/۱٪ و اوجی ۰/۹: ۱ معادل ۱۳/۲۳٪ بیشتر از اوجی ۱:۱ رشد داشته است، همچنین با افزایش شیب تند آب در پایین دست تاج، عمق آب در اوجی ۰/۷: ۱ معادل ۱۳/۵۴٪ و اوجی ۰/۹: ۱ معادل ۷/۹۷٪ بیشتر از اوجی ۱:۱ رشد داشته است.

رسائی و همکاران (۱۳۸۹) با استفاده از یک مدل فیزیکی سرریز پلکانی با تعداد ۱۰ پله و شیب ۴۵ درجه و ارتفاع پلکان‌های ۸/۵ سانتی‌متر آزمایش‌هایی را انجام دادند. آن‌ها با اندازه‌گیری عمق آب قبل و بعد از پرش هیدرولیکی، میزان استهلاک انرژی را محاسبه نمودند. نتایج نشان داد که به علت ورود هوا به داخل جریان آب عبوری از روی سرریزهای پلکانی، استفاده از عمق آب قبل از پرش هیدرولیکی در پایین دست جهت تعیین افت انرژی، باعث برآورد بیشتر (غیرواقعی) افت انرژی نسبی می‌گردد. درواقع با ورود حباب‌های هوا به داخل جریان (کاهش لزجت) از میزان تنش برشی کاسته شده و در نتیجه از خاصیت استهلاک انرژی نسبی تقلیل می‌یابد. همچنین ورود حباب‌های هوا به داخل جریان باعث افزایش حجم جریان شده و اندازه‌گیری عمق جریان را با خطا روبرو می‌سازد.

فولادی پناه و جعفری در سال ۱۳۹۰ تأثیر شیب پله در استهلاک انرژی را بررسی کردند. نتایج آن‌ها نشان داد که شیب معکوس در سرریز پلکانی نسبت به حالت بدون شیب منجر به افت انرژی قابل ملاحظه می‌شود اما هر چه تعداد پله‌ها افزایش یابد افت انرژی نسبی کاهش یافته و تأثیر شیب معکوس روی افت انرژی کاهش می‌یابد.

محمودی و رستمی در سال ۱۳۹۱ با استفاده از یک شبیه‌سازی فیزیکی در یک نهر پایه‌دار، با تغییر در شمار پلکان‌ها، با روش نصف کردن فاصله بین هر دو پلکان، در قسمت‌های مختلفی از طول سرریز (ابتدایی، میانی، انتهایی) به این نتیجه رسیدند که در شبیه‌سازی که در آن شکست پله‌ها در $\frac{1}{3}$ اول و دوم طول سرریز انجام گرفته است، بیشترین افت انرژی را ایجاد کرده است که مقدار این افت انرژی حتی از حالتی که شکستن پله‌ها به‌طور کامل می‌باشد نیز بیشتر است و کمترین افت انرژی مربوط به حالتی که شکستن پله‌ها در $\frac{1}{3}$ اول انجام شده است.

افراسیابی و همکاران در سال ۱۳۹۳ طی تحقیقی از دو مدل فیزیکی سرریز پلکانی مثلثی (نصف پله معمولی) با شیب معکوس ۴۵ درجه با ۵ پله و سرریز پلکانی ساده با ۶ پله و هر دو مدل با $\frac{h}{l}$ (نسبت ارتفاع به طول پلکان) متفاوت مورد آزمایش قرار گرفت. نتایج این پژوهش نشان داد که وجود پلکان‌ها تأثیر قابل ملاحظه‌ای در استهلاک انرژی دارند و افت انرژی نسبی نسبت به $\frac{yc}{h}$ در سرریز پلکانی ساده در رژیم جریان ریزشی از سرریز پلکانی مثلثی بیشتر می‌باشد.

۲-۱۱-۲- تحقیقات عددی صورت گرفته بر روی سرریزهای پلکانی

ورجاوند و همکاران (۱۳۸۷) سرریز پلکانی را با استفاده از مدل فلوئنت شبیه‌سازی و برای مدل‌سازی آشفتگی جریان از مدل آشفتگی k-ε استاندارد استفاده کردند. برای این کار استهلاک انرژی از روی سرریزهای پلکانی به ازای تعداد پله‌های مختلف ارزیابی شد. به‌وسیله روش عددی، سرعت و عمق جریان در پایین دست سرریز به دست آمده و در ادامه انرژی مستهلک شده در طول سرریز محاسبه گردید. نتایج

این پژوهش نشان می‌دهد که به ازای انرژی ثابت بالادست، افزایش تعداد پلکان‌ها به میزان قابل توجهی باعث افزایش استهلاک انرژی می‌گردد. همچنین نتایج آنالیزهای عددی به صورت منحنی‌های هم‌فشار و سرعت ارائه شده که با نتایج به دست آمده از منحنی‌های هم‌فشار می‌توان نقاط حساس به کاویتاسیون را شناسایی کرد.

رسائی و همکاران (۱۳۸۸) برای تشخیص تأثیر پارامترهای مختلفی مانند تعداد پله‌ها، ارتفاع پله‌ها، طول پله‌ها، و دبی در واحد عرض بر استهلاک انرژی در سرریزهای پلکانی ساده از روش عددی فلوئنت استفاده کردند و روابط بین استهلاک انرژی و عمق بحرانی جریان در سرریز پلکانی را ارائه و مورد بحث قرار دادند. در این بررسی برای حل معادلات حاکمه از روش انفصال حجم محدود و برای ارزیابی آشفتگی جریان از مدل $k-\varepsilon$ استاندارد استفاده شده است و روش حجم سیال (VOF) برای حل سطح آزاد جریان به کار گرفته شده است. سطح آزاد جریان، سرعت‌ها و فشارها در سرریز پلکانی به وسیله روش عددی، مغشوش مدل شده‌اند. نتایج روش عددی با نتایج آزمایشگاهی دیگر محققان مقایسه شد و نتایج از همخوانی مناسبی برخوردار بود که تغییرات خطاها ۱ تا ۱۹ درصد است. نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که با افزایش دبی جریان، استهلاک انرژی کاهش و با ثابت بودن ارتفاع سد و افزایش تعداد پله‌ها، استهلاک انرژی کاهش می‌یابد.

طاهرشمسی و همکاران (۱۳۸۸) به منظور بررسی افت انرژی سرریز پلکانی در دو حالت پله بدون پله و پله لبه‌دار با ضخامت‌های ۱، ۲، ۳ و ۴ سانتی‌متری مدل‌سازی را انجام دادند. به دلیل پیچیدگی جریان دوفازی آب‌وهوا بر روی سرریز پلکانی، مدل دینامیک سیال محاسباتی حجم محدود با نرم‌افزار فلوئنت دوبعدی برای شبیه‌سازی این نوع جریان مورد استفاده قرار گرفت. شبیه‌سازی جریان دو فاز آب‌وهوا با الگوی حجم سیال کانال آزاد صورت گرفته است و برای مدل‌سازی آشفتگی از مدل آشفتگی $k - \varepsilon$ (RNG) استفاده شده است.

نتایج نشان می‌دهد که مدل حجم سیال کانال آزاد به همراه مدل آشفتگی RNG می‌تواند جریان روی سرریزهای پلکانی ساده و لبه‌دار را به خوبی مدل نماید. مقایسه نتایج محاسباتی با یکدیگر و با مشاهدات آزمایشگاهی نشان می‌دهد که این روش در مورد تعیین علل هیدرودینامیکی افزایش افت انرژی با لبه‌دار نمودن سرریز، بسیار کارا تر است به طوری که در این روش مقدار خطا در مقادیر افت انرژی در مقایسه با نتایج حاصله از آزمایشگاه کمتر می‌باشد چرا که در رابطه میزان افت انرژی سرعت متوسط نه از رابطه پیوستگی، بلکه با توجه به پروفیل‌های حاصله از حل عددی در محاسبه افت انرژی وارد شده‌اند. همچنین با اجرای این مدل عددی می‌توان گردابه‌های پادساعت‌گرد که در آزمایشگاه با چشم قابل دیدن نیست را در مدل عددی حاضر مشاهده نمود. هم‌چنین طبق نتایج حاصل از تحلیل عددی، با لبه‌دار کردن سرریز پلکانی هواگیری جریان زودتر اتفاق می‌افتد و خطر ریسک ایجاد پدیده کاویتاسیون کاهش می‌یابد.

برای مدل با ضخامت لبه ۲ سانتی‌متر تأثیر افزایش دبی بر میزان افت انرژی کمتر بوده و به عبارت دیگر لبه با ضخامت ۲ سانتی‌متری مقاومت هیدرولیکی مناسب‌تری در برابر جریان ایجاد می‌نماید که نتایج آزمایشگاهی هم مؤید این قضیه است.

منصوری و همکاران (۱۳۸۹) با بررسی پارامترهای مؤثر بر استهلاک انرژی و مدل‌های اغتشاش و روش‌های انفصال، آنالیز برای ۱۶ مدل با هندسه گوناگون برای دو دبی $\frac{3}{6}$ لیتر بر ثانیه (ریزشی) و ۲۵ لیتر بر ثانیه (غیر ریزشی) یعنی جمعاً ۳۲ مدل توسط نرم‌افزارهای گمبیت و فلوئنت با انتخاب مدل اغتشاش $k - \epsilon$ و روش VOF انجام دادند. نتایج به دست آمده با نتایج آزمایشگاهی و روابط موجود مقایسه گردید و همچنین نتایج بررسی آنالیز جریان ریزشی نشان می‌دهد که با افزایش عرض و ارتفاع لبه، میزان استهلاک انرژی افزایش می‌یابد. در مورد جریان غیر ریزشی تغییرات عرض لبه‌ها و همچنین زاویه بالادست آن تأثیری در میزان استهلاک انرژی ندارند و فقط ارتفاع لبه بر آن تأثیر می‌گذارد و باعث افزایش آن می‌گردد.

آصفی و همکاران (۱۳۹۰) الگوی جریان در داخل حوضچه آرامش را به صورت دوبعدی با استفاده از نرم افزار Fluent که معادلات جریان را به روش حجم محدود حل می نماید، شبیه سازی کردند. میدان محاسباتی با استفاده از شبکه بندی منشوری منظم^۱ گسسته گردید. در این تحقیق روش حجم سیال (volume of Fluid) جهت مدل سازی سطح آزاد به کار گرفته شد. مدل آشفتگی $k-\epsilon$ استاندارد، تابع های دیواره استاندارد و غیرتعدالی استفاده شد که در صحت سنجی پروفیل سطح پرش حالت تابع دیواره استاندارد نتایج بهتری را تولید کرد.

رفیع وحید و همکاران (۱۳۹۰) به مقایسه نرخ پراکنش انرژی در سرریز پلکانی لبه دار با حالت بدون لبه پرداختند. این مدل عددی بر پایه نتایج مدل فیزیکی ۲۱ پله ای با لبه های ۲ سانتی متری و پوشش رنگی تدوین شده است. در بررسی نتایج مشاهده گردید، در سرریز لبه دار میزان نرخ پراکنش انرژی ۷۵٪ است. همچنین تغییرات مقادیر عدد فرود برای هر یک از سرریزها محاسبه گردید. مقایسه نتایج، تغییرات محسوسی از استهلاک انرژی بین سرریز پلکانی لبه دار و بدون لبه را نشان می دهد. همچنین نرخ کاهش ابعاد حوضچه آرامش پس از لبه دار نمودن پله ها افزایش می یابد.

رضائی و بیدختی (۱۳۹۰) به بررسی اثر مقیاس بر روی جریان دوفازی در سرریزهای پلکانی، در سه مقیاس مختلف (۱:۱، ۲:۱ و ۱:۲) انواع سرریزهای پلکانی ساده، شیب دار و لبه دار با استفاده از نرم افزار فلونت پرداختند. در این نرم افزار جریان دوفازی عبوری از روی سرریز با استفاده از مدل دوفازی Mixture و مدل آشفتگی RSM شبیه سازی شدند. معیار ارزیابی مدل ها عبارت بود از مقایسه میزان استهلاک انرژی و میزان غلظت هوای موجود در جریان. نتایج نشان داد که جریان دوفازی بر روی سرریزهای پلکانی تأثیرپذیری قابل توجهی از عامل مقیاس داشته بنابراین نتایج حاصل از مدل های فیزیکی را نمی توان مستقیماً برای نمونه های واقعی سرریزهای پلکانی به کار برد.

¹ structured grid

در این راستا روش‌های عددی که قابلیت مدل‌سازی سرریزها را در اندازه واقعی خود دارند می‌توانند به‌عنوان راهنمایی در کنار مدل‌های آزمایشگاهی قرار گرفته و نتایج به‌دست‌آمده از آزمایشگاه را تصحیح نمایند.

منصوری و همکاران (۱۳۹۰) با استفاده از نرم‌افزار فلوئنت بر روی سرریزهای پلکانی با پله‌های شیب‌دار معکوس به انجام شبیه‌سازی جریان پرداختند. با کمک مقادیر به‌دست‌آمده از روش عددی جهت عمق و سرعت، میزان استهلاک انرژی مشخص گشته و با مقادیر استهلاک انرژی به‌دست‌آمده از روش آزمایشگاهی مقایسه گردیده، نتایج نشان‌دهنده اختلاف قابل‌قبول بین اعداد به‌دست‌آمده از روش عددی و آزمایشگاهی بوده و فلوئنت را به‌عنوان جایگزین مناسبی برای روش آزمایشگاهی در سرریزهای پلکانی معرفی می‌نماید.

مرتضوی و همکاران (۱۳۹۱) آنالیزی برای یک سرریز پلکانی (۱۵ پله‌ای) با دبی‌های متفاوت با نرم‌افزار Fluent با انتخاب مدل آشفتگی $k-\varepsilon$ استاندارد و روش عددی حجم سیال (VOF) انجام دادند. نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که با افزایش دبی جریان، بدون اعمال تغییرات در هندسه مدل از میزان استهلاک انرژی کاسته می‌شود.

کشاورزبان و همکاران (۱۳۹۱) احتمال وقوع کاویتاسیون را در انواع سرریز پلکانی ساده، لبه‌دار و شیب‌دار با در نظر گرفتن پارامترهایی مانند تعداد پله‌ها، ارتفاع پله‌ها، طول پله‌ها، دبی در واحد عرض، میزان افزایش ارتفاع پله‌ها، شیب سرریز و حتی تأثیر نوع جریان به‌وسیله روش عددی مورد ارزیابی قرار دادند. برای مدل‌سازی عددی سرریزهای پلکانی در تحقیق حاضر از روش احجام محدود استفاده شده است. برای مدل‌سازی سطح آزاد جریان از روش VOF و مدل‌سازی آشفتگی جریان از مدل $k-\varepsilon$ استاندارد استفاده گردیده است. برای تقریب مقادیر پارامترهای موردنظر از روش قاعده توانی استفاده شده است. نتایج به‌صورت زیر خلاصه شده است :

۱- افزایش تعداد پله‌ها وقتی که ارتفاع سد ثابت باشد در سرریزهای پلکانی باعث کاهش خطر کاویتاسیون می‌شود.

۲- کاهش ارتفاع پله‌ها وقتی که ارتفاع سد ثابت باشد در سرریزهای پلکانی ساده باعث کاهش خطر کاویتاسیون می‌شود.

۳- کاهش شیب سرریزهای پلکانی وقتی که ارتفاع سد ثابت باشد باعث کاهش خطر کاویتاسیون می‌شود.

۴- افزایش ارتفاع لبه پله‌ها وقتی که ارتفاع سد، تعداد، طول، ارتفاع پله‌ها و شیب سرریز ثابت باشد در سرریزهای پلکانی لبه‌دار باعث کاهش خطر کاویتاسیون می‌شود.

۵- افزایش شیب کف پله‌ها وقتی که ارتفاع سد، تعداد، طول، ارتفاع پله‌ها و شیب سرریز ثابت باشد در سرریزهای پلکانی شیب‌دار باعث کاهش خطر کاویتاسیون می‌شود.

۶- افزایش طول پله‌ها وقتی که تعداد و ارتفاع پله‌ها ثابت باشد در سرریزهای پلکانی باعث کاهش خطر کاویتاسیون می‌شود.

۷- افزایش دبی در هر سه حالت سرریزهای پلکانی باعث افزایش خطر کاویتاسیون می‌شود و تغییرات فشار از نوع جریان مستقل نیست.

رضائی و بیدختی (۱۳۹۱) به بررسی افت انرژی در انواع سرریز پلکانی ساده، شیب‌دار و لبه‌دار با شبیه‌سازی عددی پرداختند. در این نرم‌افزار جریان دوفازی عبوری از روی سرریز با استفاده از مدل دوفازی Mixture و مدل آشفتگی RSM شبیه‌سازی شدند. مدل Mixture مناسب‌تر از روش VOF در تولید برهم‌کنش بین حباب‌های ورودی و چرخش حفره‌ها در رژیم جریان غیر ریزشی است. رابطه افت انرژی نسبی و عمق جریان بحرانی نسبی در انواع مختلف سرریزها بحث شده است. نتایج به صورت زیر خلاصه شده است :

۱- پله با لبه انتهایی بیشترین تأثیر را درافت انرژی نشان داد.

۲- برای یک دبی خاص با یک عمق جریان بحرانی ثابت افت انرژی نسبی با افزایش تعداد پله افزایش یافت.

۳- در جریان غیر ریزشی، به دلیل افزایش خصوصیت ارتفاع لبه پله‌ها حجم آب به دام افتاده و چرخش حباب‌های بزرگ‌تر با دیگر سرریزها مقایسه شد. هندسه پله افت انرژی نسبی را افزایش داد.

۴- با افزایش ارتفاع پله در سرریزها افت انرژی نسبی افزایش می‌یابد.

مرتضوی و همکاران (۱۳۹۲) برای ۶ مدل ساخته شده در آزمایشگاه (شامل مدل‌های ۵، ۱۰، ۱۵، ۲۰، ۴۵، ۵۰ پله‌ای) آنالیز عددی انجام دادند. مدل‌سازی جریان بر روی سرریز پلکانی با استفاده از روش حجم محدود در محیط نرم‌افزار Fluent صورت گرفته است. جهت حل جریان‌های اغتشاشی مدل k-ε استاندارد و برای تعیین سطح آزاد جریان روش حجم سیال (VOF) مورد استفاده قرار گرفت. نتایج این مطالعه نشان می‌دهد که برای یک دبی ثابت، استهلاک انرژی با افزایش تعداد پله‌ها، کاهش می‌یابد. به عبارت دیگر برای یک سد معین و با ارتفاع ثابت، با افزایش تعداد پله‌ها از ۵ به ۵۰ عدد، ارتفاع پله‌ها کوچک شده و در نتیجه حاصل تقسیم عمق بحرانی به مقدار ارتفاع کوچک پله (h) باعث افزایش مقدار $\frac{yc}{h}$ شده و استهلاک انرژی کمتر می‌گردد.

معیری و همکاران (۱۳۹۲) با استفاده از مدل عددی فلوئنت رژیم‌های جریان رویه‌ای و بینابینی برای سرریز را مورد بررسی قرار دادند. پارامترهای مدل شده شامل عمق مشخصه (y_{90})، سرعت مشخصه (v_{90}) و سرعت جریان آب زلال و غلظت متوسط هوا بودند. مدل‌های جریان چند فازی حجم سیال (vof)، اختلاط و اولرین و همچنین مدل‌های تلاطم k-ε به صورت دوبعدی و سه‌بعدی به همراه الگوریتم‌های حل هم‌زمان فشار-سرعت PISO و Simple مورد استفاده قرار گرفت. از بین مدل‌های جریان چند فازی، مدل اختلاط و از بین مدل‌های تلاطم مدل RNG k-ε بهترین جواب را داشتند. نتایج به دست آمده برای

رژیم رویه‌ای جهت برآورد پارامترهای طراحی با در نظر گرفتن اختلاط حباب هوا مناسب‌تر و برای رژیم جریان بینابینی ضعیف است.

مقدم و همکاران (۱۳۹۲) سرریز پلکانی را در محیط فلونت شبیه‌سازی و برای مدل‌سازی آشفتگی جریان از مدل استاندارد استفاده کردند. برای این کار، استهلاك انرژی از روی سرریزهای پلکانی به ازای تعداد پله‌های مختلف ارزیابی شد. به وسیله $K-\epsilon$ آشفتگی، سرعت و عمق جریان در پایین دست سرریز به دست آمده و در ادامه انرژی مستهلک شده را در طول سرریز محاسبه کرده‌اند. نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که به ازای انرژی ثابت بالادست، افزایش تعداد پلکان‌ها به میزان قابل توجهی باعث افزایش استهلاك انرژی می‌گردد. همچنین نتایج آنالیزهای عددی به صورت منحنی‌های هم‌فشار و سرعت ارائه شده که با نتایج به دست آمده از منحنی‌های هم‌فشار می‌توان نقاط حساس به کاویتاسیون را شناسایی نمود.

ناعمی و همکاران (۱۳۹۳) جهت تعیین میزان تأثیر پارامترهای مختلفی چون دبی در واحد عرض (q)، تعداد و ارتفاع پله‌ها (به ترتیب N و L) بر استهلاك انرژی در سرریز پلکانی، برای ۱۱ سرریز توسط نرم‌افزار Fluent شبیه‌سازی انجام دادند. مقایسه نتایج عددی و آزمایشگاهی و حصول میزان خطای ۱ تا ۷ درصد برای شبیه‌سازی، نشان داد که نتایج عددی قابل اعتماد می‌باشند. همچنین مشخص شد که تا زمانی که رژیم جریان تغییر نکند از دید N باعث افزایش میزان استهلاك انرژی می‌شود و در صورت ایجاد جریان غیر ریزشی این روند کاهشی خواهد بود. علاوه بر این، میزان تغییرات استهلاك انرژی نسبت به افزایش L و q صعودی است. نتایج زیر به دست آمد.

- با افزایش تعداد پله‌ها تا ۲۸ عدد مقدار افت انرژی در پلکان افزایش می‌یابد، ولی با افزایش تعداد ۲۸ پله به بعد نتیجه عکس به دست می‌دهد

- تا جاییکه رژیم جریان ریزشی است افت انرژی با افزایش تعداد پله افزایش می‌یابد، ولی با تغییر رژیم جریان از ۲۹ پله به بعد به دلیل تغییر رژیم جریان، افت انرژی با کاهش روبرو می‌شود.

-از این تحقیق استنباط می‌شود که هرچه نسبت طول پله به ارتفاع آن بیشتر باشد میزان افت انرژی بیشتر است

-با توجه به تحقیق فوق می‌توان نتیجه گرفت که استهلاک انرژی در رژیم ریزشی به نسبت بیشتر از رژیم جریان غیر ریزشی در شرایط یکسان است.

- هنگامی که جریان به سمت رژیم جریان غیر ریزشی پیش می‌رود افزایش تعداد پله‌ها در میزان استهلاک انرژی تأثیر ناچیزی دارد.

صدریان زاده و همکاران (۱۳۹۳) مدل‌های آزمایشگاهی از جریان در یک سرریز پلکانی با جریان غیر ریزشی را توسط نرم‌افزار FLUENT در حالت سه‌بعدی شبیه‌سازی و نقطه هواگیری طبیعی را مورد بررسی قرار دادند. در این شبیه‌سازی‌ها از سلول‌های هرمی باقاعده مثلثی شکل استفاده شده است. جهت تنظیم معادلات چند فازی از مدل MIXTURE و برای شبیه‌سازی آشفتگی از مدل $K-\epsilon$ در حالت RNG استفاده گردیده است. پس از تحلیل مسائل در مدل فلوئنت نتایج زیر استخراج گردید:

۱- با مقایسه‌ی نتایج مدل عددی با مدل آزمایشگاهی مشخص گردید که فلوئنت نتایج قابل قبولی در حل معادلات کسر حجمی ارائه می‌دهد.

۲- شبکه‌بندی تأثیر مستقیم بر صحت نتایج دارد، ریز بودن سلول‌ها، گرچه به‌شدت، سرعت همگرایی را کاهش و هزینه‌های زمانی را افزایش می‌دهد، لیکن دقت حل را بالا برده و موجب کاهش خطا می‌گردد.

۳- با توجه به حل معادلات کسر حجمی، مشخص شد با افزایش دبی جریان، غلظت هوای محلول در آب کاهش می‌یابد.

۴- با مقایسه‌ی نتایج حاصل از مدل عددی فلوئنت و نتایج آزمایشگاهی، مشخص گردید که مدل فازي MIXTURE، شبیه‌سازی جریان دوفازی آب-هوا را در جریان غیر ریزشی در سرریزهای پلکانی به‌خوبی مدل کرده و نتایج مناسبی ارائه می‌نماید.

سوری و همکاران (۱۳۹۳) به منظور ارزیابی پارامترهای شدت استهلاک انرژی در سرریزهای پلکانی، ابتدا در یک فلوم آزمایشگاهی، یک مدل فیزیکی تعبیه و به صورت تجربی بررسی کردند. سپس به منظور بررسی شرایط افت انرژی بر روی سرریز، از قابلیت دینامیک سیالات محاسباتی در انجام آنالیز حساسیت نسبت به تغییرات دبی جریان استفاده کردند. بدین منظور، مدل عددی مربوطه در نرم افزار FLOW_3D تهیه شده و با توجه به نتایج آزمایشگاهی، تأثیر دبی بر میزان استهلاک انرژی مورد مقایسه قرار گرفت. نتایج به دست آمده از شبیه سازی عددی در تطابق مناسبی با نتایج آزمایشگاهی است. نتایج نشان دادند که با افزایش دبی ورودی جریان، میزان استهلاک انرژی کاهش می یابد.

مروتی و همکاران (۱۳۹۵) از سرریز پلکانی لبه دار با ۱۲ پله و شیب ۸/۹ درجه استفاده کردند. شبیه سازی سطح آزاد و آشفتگی جریان با استفاده از روش VOF و $\kappa\text{-}\epsilon$ از نوع RNG بود. نتایج بار باقیمانده در انتهای سرریز نشان داد که سرریز پلکانی با ترکیبی از پله های لبه دار و مسطح عملکرد مطلوب تری در کاهش بار باقیمانده در پایاب دارد. همچنین کاربرد ارتفاع لبه ۷/۵ سانتی متری بیشترین تأثیر را در کاهش بار باقیمانده در انتهای سرریز نشان داد.

فصل سوم

مواد و روش‌ها

۳-۱- مقدمه

در این فصل در ابتدا دینامیک سیالات محاسباتی^۱ تعریف شده و به اهمیت آن در علم سیالات اشاره می‌شود. در علم سیالات سه روش آزمایشگاهی، تئوری و عددی برای مطالعه جریان وجود دارد. یک تحقیق آزمایشگاهی، گران، کند و تنها برای یک هدف می‌باشد درحالی‌که یک تحقیق عددی ارزان‌تر و سریع‌تر بوده و می‌توان برای اهداف مختلفی از آن استفاده کرد. در یک تحقیق عددی برای اطمینان از نتایج آن نیازمند داده‌های آزمایشگاهی هستیم. به همین منظور مدل آزمایشگاهی موردنظر شرح داده می‌شود و در ادامه به بررسی نرم‌افزار فلونت^۲ و بیان هندسه مدل و نحوه شبکه‌بندی آن پرداخته می‌شود. سپس تنظیمات حل در نرم‌افزار فلونت مانند تعیین پایداری و ناپایداری، مدل چند فازی، مدل آشفتگی، اعمال شرایط مرزی و روش‌های گسسته سازی معادلات بیان می‌شود.

۳-۲- دینامیک سیالات محاسباتی (CFD)

به‌طور کلی برای شبیه‌سازی و حل میدان‌های جریان سه روش وجود دارد:

الف) روش‌های تجربی (آزمایشگاهی)

ب) روش‌های تئوری و تحلیلی

ج) روش‌های حل عددی و CFD

روش‌های تجربی و آزمایشگاهی بر پایه اندازه‌گیری‌های عملی و اغلب بر اساس قضیه‌ی پی باکینگهام بنا شده‌اند، یعنی با بی بعد سازی معادلات می‌توانیم به‌جای آزمایش کردن یک مدل حقیقی با اندازه‌ی

¹ Computational fluid dynamics

² Fluent

بزرگ و شرایط خاص، یک نمونه کوچک‌تر با شرایط مناسب را آزمایش کنیم و سپس با استفاده از قضیه‌ی پی‌باکینگهام، نتایج حاصله را به مدل حقیقی و اصلی نسبت دهیم. از طرفی با کمک این قضیه و بی‌بعد سازی می‌توانیم تعداد آزمایش‌های لازم برای رسیدن به نتیجه را نیز کاهش دهیم.

روش‌های تئوری و تحلیلی بر اساس حل معادلات حاکم در مکانیک سیالات و انتقال حرارت بنا شده‌اند، اما در اغلب موارد فرمول‌بندی قوانین پایه‌ی مکانیک سیالات و انتقال حرارت به صورت معادلات دیفرانسیل جزئی^۱ (PDE) مرتبه‌ی دوم درمی‌آیند که فقط در بعضی از حالت‌های خاص دارای حل تحلیلی و دقیق هستند. چون معادلات حاکم در مکانیک سیالات یک مجموعه معادلات دیفرانسیل پاره‌ای غیرخطی و وابسته را ایجاد می‌کنند که باید در یک قلمرو ناهموار و با شرایط اولیه و مرزی مختلف حل شوند. بنابراین در بیشتر موارد حل تحلیلی معادلات دیفرانسیل بسیار محدود است و با اعمال شرایط مرزی این محدودیت‌ها تنگ‌تر می‌شود. روشی که در سال‌های اخیر برای حل این معادلات، شهرت زیادی یافته دینامیک سیالات محاسباتی (CFD) است که بر پایه‌ی محاسبات عددی می‌باشد.

۳-۳- مزایای CFD نسبت به روش‌های تجربی به شرح زیر است:

◀ کاهش اساسی در زمان و قیمت طراحی‌های جدید: مسلماً هزینه انجام محاسبات CFD کمتر از هزینه‌ی انجام یک آزمایش و ساخت آزمایشگاه مربوطه است، از طرفی سرعت انجام محاسبات نیز از سرعت انجام آزمایش بیشتر است.

◀ توانایی مطالعه و شبیه‌سازی مسائلی که انجام آزمایش‌ها روی آن‌ها مشکل و یا غیرممکن است. (مثل سیستم‌های بزرگ و یا دماهای بسیار بالا)

◀ توانایی شبیه‌سازی و مطالعه‌ی مسائل در شرایط خاص و بحرانی: یعنی می‌توان با استفاده از تحلیل CFD شرایطی از دستگاه را که رسیدن به آن در شرایط آزمایشگاهی غیرممکن است را نیز مورد مطالعه قرار داد.

¹ Partial Differential Equations

◀ به دست آوردن اطلاعات کامل و جزئیات بسیار دقیق از حل: در یک مسئله CFD می‌توان در هر نقطه از جریان تمام کمیت‌های موردنظر مثل سرعت، دما، چگالی، انرژی و ... را محاسبه کرد، اما در آزمایش فقط در چند نقطه می‌توان اطلاعات محدودی را به دست آورد.

◀ مکانیک سیالات تجربی می‌تواند اطلاعات موردنیاز یک میدان جریان خاص را فراهم کند. در هر حال به علت محدودیت‌های تجهیزاتی مانند اندازه‌ی نمونه‌های آزمایش و همچنین مشکلات ناشی از عدم تشابه کامل با میدان جریان واقعی، کسب اطلاعات آزمایشگاهی در بیشتر میدان‌های جریان غیرعملی است.

۳-۴- انواع شبکه‌ها و روش‌های حل CFD

برای استفاده از روش‌های CFD لازم است که میدان جریان را با استفاده از شبکه، گسسته سازی نمود و برای شبیه‌سازی میدان جریان باید دامنه‌ی محاسباتی را با المان‌های کوچکی تقسیم‌بندی کرد تا بتوان معادلات مزبور را بر روی آن‌ها حل کرد. به‌طور کلی دو نوع شبکه وجود دارد:

◀ شبکه‌ی بی‌سازمان

◀ شبکه‌ی با سازمان

۳-۴-۱- شبکه بی‌سازمان

به شبکه‌ای که نقاطش با خط‌های مرتبط نباشند، شبکه‌ی بی‌سازمان می‌گویند. در شبکه‌های بی‌سازمان برای تجزیه‌ی قلمروی میدان جریان و شبکه‌بندی در حالت دوبعدی از سلول‌های مثلثی و در حالت سه‌بعدی از سلول‌های هرمی یا شش‌وجهی استفاده می‌شود. در روش‌های حجم محدود و المان محدود که هر دو انتگرالی هستند (یعنی از معادله‌های دیفرانسیل اولیه در فضای فیزیکی، انتگرال می‌گیریم و سپس آن‌ها را به روش عددی حل می‌کنیم) باید شبکه‌ی نقاط را مستقیماً در فضای فیزیکی ایجاد کنیم و بنابراین در حالت کلی ممکن است که نقاط شبکه با خط‌های شبکه مرتبط نباشند.

مهم‌ترین ویژگی شبکه‌ی بی‌سازمان تطبیق خوب آن با مرزها و هندسه‌های پیچیده است که باعث می‌شود زمان تولید شبکه در این روش بسیار کمتر از روش با سازمان شود. البته عیب شبکه‌ی بی‌سازمان پیچیده بودن سازمان اطلاعات آن و نیاز به حافظه و محاسبات بیشتر است.

۳-۴-۲ - شبکه با سازمان

شبکه‌ی که نقاطش با خط‌های مرتبط هستند، شبکه با سازمان می‌نامند. ایجاد شبکه‌ی با سازمان با فواصل یکنواخت در قلمرو فیزیکی مستطیلی شاید ساده باشد و بتوان به راحتی شبکه را بر مرزهای قلمرو فیزیکی منطبق کرد، اما متأسفانه بیشتر قلمروهای فیزیکی غیر مستطیلی هستند و باید با کمک یک نگاشت، فضای فیزیکی را به فضای محاسباتی منتقل کنیم.

مهم‌ترین مزیت شبکه‌ی با سازمان، تولید آسان و استفاده سریع و آسان از سازمان اطلاعات است که باعث می‌شود سرعت انجام محاسبات بیشتر شود و به حافظه‌ی کمتری نیاز باشد. در حالی که تولید این نوع شبکه در روی مرزها و هندسه‌های پیچیده به راحتی امکان پذیر نیست و نیاز به زمان زیادی دارد.

۳-۵ - روش‌های حل CFD

۱- روش تفاضل محدود ۲- روش المان محدود ۳- روش حجم محدود ۴- روش طیفی

۳-۵-۱ - روش تفاضل محدود

در این روش معادلات دیفرانسیل جزئی در مکانیک سیالات و انتقال حرارت را به همان صورت دیفرانسیلی در نظر می‌گیرند و با استفاده از بسط‌های تیلور این معادلات را تقریب می‌زنند تا تبدیل به یک سری معادلات جبری به نام معادلات تفاضل محدود شوند.

۳-۵-۲ - روش المان محدود

در این روش معادلات دیفرانسیل جزئی در مکانیک سیالات و انتقال حرارت به صورت انتگرالی نوشته می‌شوند و برای تبدیل فرم انتگرالی به فرم معادلاتی و جبری از توابع پیوسته چندتکه‌ای و صاف (خطی یا درجه دوم) برای تقریب کمیت‌های مجهول استفاده می‌کنند.

۳-۵-۳ - روش حجم محدود

درواقع نوعی از روش المان محدود است که تقریب این انتگرال‌ها با روش المان محدود متفاوت است. این روش بیشتر برای مسائل مکانیک سیالات و انتقال حرارت مناسب است و نرم‌افزار Fluent نیز بر پایه‌ی این روش برنامه‌ریزی شده است.

۳-۵-۳-۱- الگوریتم‌های عددی روش حجم محدود

۱- انتگرال‌گیری کلی از معادلات حاکم بر جریان سیال روی تمام حجم‌های کنترل مربوط به میدان حل.

۲- گسسته‌سازی و تبدیل معادلات انتگرالی به یک سیستم معادلات جبری

۳- حل معادلات جبری با استفاده از یک روش تکرار

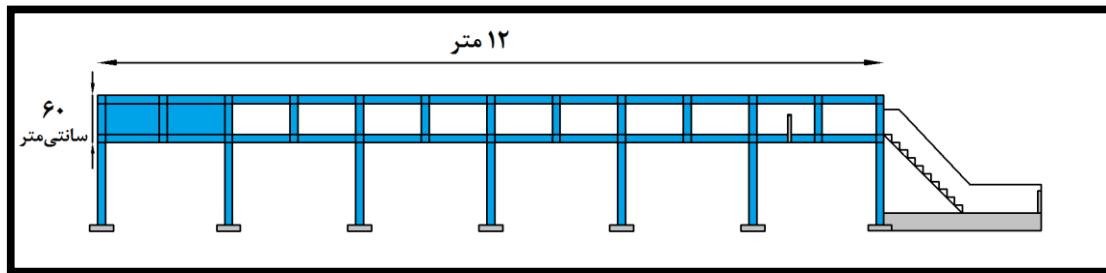
گام نخست، یعنی انتگرال‌گیری از حجم کنترل، روش حجم محدود را از سایر روش‌های CFD متمایز می‌کند (حسن‌زاده، ۱۳۹۴).

۳-۶- شرح مدل آزمایشگاهی

این تحقیق در آزمایشگاه هیدرولیک گروه آب و خاک دانشکده کشاورزی دانشگاه صنعتی شاهرود توسط شفیعی پور و همکاران (۱۳۹۲) انجام پذیرفت. آزمایشگاه دارای یک استخر است که آب آن توسط یک پمپ با الکتروموتور به قدرت ۷/۵ کیلووات پمپاژ می‌گردد.

در این تحقیق از یک فلوم به عرض ۱۰۰ سانتی‌متر جهت انجام آزمایش‌ها استفاده گردید. فلوم موجود دارای اسکلت فلزی بوده که عموماً از نبشی و ورقه‌های آهنی ساخته شده و دیواره‌های آن از جنس شیشه سکوریت با ضخامت ۱۰ میلی‌متر است. کف فلوم جز دو متر اول که صفحه فلزی است، کاملاً از جنس شیشه سکوریت با ضخامت ۱۰ میلی‌متر ساخته شده است. طول فلوم ۱۲ متر و ارتفاع آن در تمام طول ۶۰ سانتی‌متر است.

این فلوم به نحوی طراحی شده است که دارای یک سیستم بسته جریان آب است، به طوری که آب از ابتدای فلوم، توسط یک لوله که به وسط دیواره در انتهای فلوم متصل است، وارد فلوم شده و پس از طی طول فلوم از روی سرریز پلکانی که در خارج از فلوم نصب شده وارد حوضچه آرامش به طول یک متر می‌شود و از آنجا با طی مسافتی وارد استخر آب می‌شود. شکل (۱-۳) و (۳-۳) مقطع طولی فلوم به عرض ۱۰۰ سانتی‌متر را نشان می‌دهد.

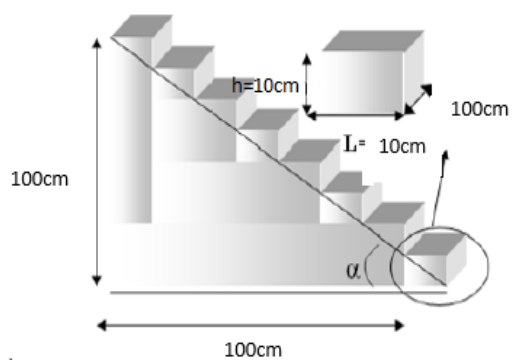


شکل ۳-۱ - مقطع طولی فلوم به عرض ۱۰۰ سانتی‌متر

در این پایان‌نامه سرریز پلکانی با شیب ۴۵ درجه، ارتفاع یک متر و با تعداد ۱۰ عدد پله است که در جدول (۱-۳) مشخصات آن نشان داده شده است. جنس سرریز از نوعی چوب به نام فومیزه ساخته شده است. که در شکل (۲-۳) نشان داده است.

جدول ۱-۳- مشخصات مدل فیزیکی سرریز پلکانی مورد آزمایش

جنس سرریز	شیب سرریز (درجه)	تعداد پله‌ها	عرض پله‌ها (سانتی‌متر)	ارتفاع پله‌ها (سانتی‌متر)	طول پله‌ها (سانتی‌متر)
صفحات فومیزه پی‌وی‌سی	۴۵	۱۰	۱۰۰	۱۰	۱۰



شکل ۲-۳- سرریز پلکانی با عرض و ارتفاع یک متر



شکل ۳-۳- فلوم مورد مطالعه

در این تحقیق به بررسی افت انرژی در سرریزهای پلکانی لبه‌دار و بدون لبه پرداخته شده است. به همین منظور، همچون مدل آزمایشگاهی لبه‌های با سه ارتفاع ۱، ۳ و ۵ سانتی‌متری به ضخامت ۱/۵ سانتی‌متر در سرریز بر روی پله‌های ۲، ۳، ۴ و ۵ تعبیه شد که به صورت جدول (۲-۳) حالت‌های مختلف قرارگیری لبه‌ها بر روی پله‌ها به تفکیک ارائه شده است.

جدول ۲-۳- حالت‌های قرارگیری لبه‌ها بر روی پله‌های ۲، ۳، ۴ و ۵

ردیف	شیب سرریز (درجه)	حالت‌های مختلف قرارگیری لبه‌ها	پله‌های مورد آزمایش	تعداد آزمایش‌ها
۱	۴۵	لبه ۱ سانتی‌متری انتهای پله	۵، ۴، ۳، ۲	۴
۲	۴۵	لبه ۱ وسط پله	۵، ۴، ۳، ۲	۴
۳	۴۵	لبه ۱ وسط و انتهای پله	۵، ۴، ۳، ۲	۴
۴	۴۵	لبه ۱ وسط و ۳ انتهای پله	۵، ۴، ۳، ۲	۴
۵	۴۵	لبه ۱ وسط و ۵ انتهای پله	۵، ۴، ۳، ۲	۴
۶	۴۵	لبه ۳ انتهای پله	۵، ۴، ۳، ۲	۴
۷	۴۵	لبه ۳ وسط پله	۵، ۴، ۳، ۲	۴
۸	۴۵	لبه ۳ وسط و ۱ انتهای پله	۵، ۴، ۳، ۲	۴
۹	۴۵	لبه ۳ وسط و انتهای پله	۵، ۴، ۳، ۲	۴
۱۰	۴۵	لبه ۳ وسط و ۵ انتهای پله	۵، ۴، ۳، ۲	۴
۱۱	۴۵	لبه ۵ انتهای پله	۵، ۴، ۳، ۲	۴
۱۲	۴۵	لبه ۵ وسط پله	۵، ۴، ۳، ۲	۴
۱۳	۴۵	لبه ۵ وسط و ۱ انتهای پله	۵، ۴، ۳، ۲	۴
۱۴	۴۵	لبه ۵ وسط و ۳ انتهای پله	۵، ۴، ۳، ۲	۴
۱۵	۴۵	لبه ۵ وسط و انتهای پله	۵، ۴، ۳، ۲	۴

۳-۷- مراحل حل مسئله دینامیک سیالات محاسباتی

برای حل یک مسئله CFD لازم است مراحل زیر انجام شود:

۱. بیان هدف‌های شبیه‌سازی و تحلیل
۲. تعیین معادلات حاکم بر جریان که شامل معادلات ناویر استوکس، انتقال حرارت و ... است.
۳. ایجاد هندسه مسئله و شبکه موردنیاز آن
۴. انتخاب حل‌کننده و مدل فیزیکی مناسب
۵. محاسبه و تحلیل مسئله و سپس نمایش نتایج حل آن

۶. امتحان کردن نتایج محاسبات و ذخیره‌ی نتایج

۷. در صورت لزوم تجدیدنظر و اصلاح مدل

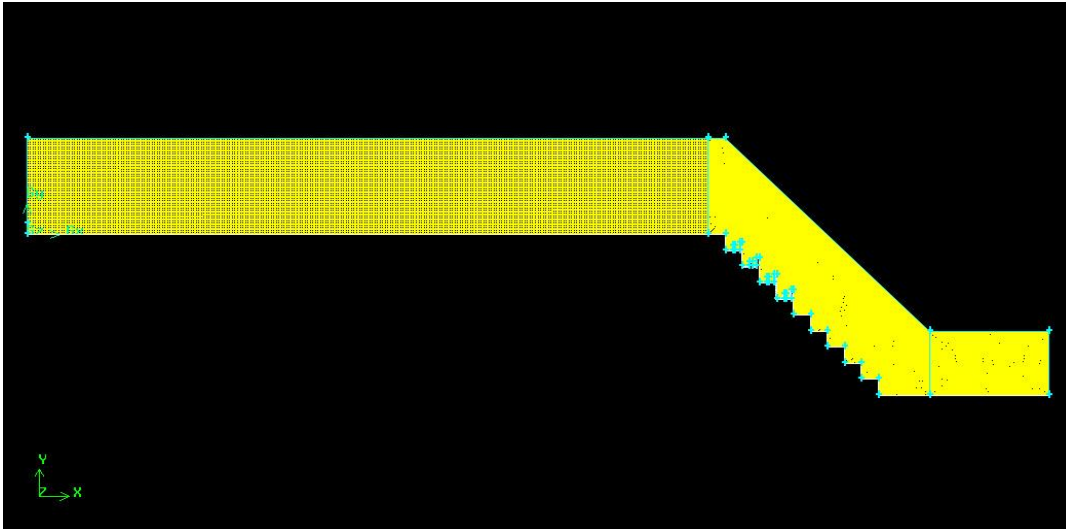
۳-۸-۱- هندسه مدل عددی و شبکه‌بندی آن

نرم‌افزار فلوئنت قادر به ساخت هندسه و شبکه‌بندی آن نیست و برای این کار باید از یک نرم‌افزار جانبی استفاده نمود. در این تحقیق از نرم‌افزار گمبیت^۱ برای ساخت هندسه و شبکه‌بندی آن استفاده شده است. در این مرحله شبکه‌بندی انجام‌شده کمی درشت بوده و توسط نرم‌افزار فلوئنت شبکه‌ها در محدوده حساس‌تر، ریز می‌شوند. تولید شبکه یکی از مهم‌ترین بخش‌های حل عددی محسوب می‌شود که در دقت حل عددی بسیار تأثیرگذار است و بیش از ۵۰٪ زمان تحلیل یک مسئله CFD به تولید شبکه‌ی آن اختصاص می‌یابد (دهقانی سانچ، ۱۳۹۳).

۳-۸-۱-۱ - نرم‌افزار Gambit

نرم‌افزار Gambit یک نرم‌افزار پیش محاسبه‌گر است که در این تحقیق برای ترسیم شبکه جریان و مشخص نمودن شرایط مرزی از آن استفاده‌شده است. در این تحقیق فلومی با طول ۱۲ متر، عرض ۱ متر و ارتفاع ۰/۶ متر وجود دارد که به دلیل اینکه عرض فلوم در طول فلوم ثابت است و تأثیری در مقادیر متغیر موردنظر ندارد، لذا به‌منظور ساده‌تر نمودن محاسبات و کاهش حجم محاسبات از مدل-سازی آن صرف‌نظر شده و مدل دوبعدی فلوم با طول ۱۲ متر و ارتفاع ۰/۶ متر و سرریز پلکانی به طول ۱ متر و ارتفاع ۱ متر (۱۰ پله) و حوضچه آرامش به طول ۱ متر اجرا شده است که در شکل (۳-۴) نشان داده شده است.

¹ Gambit



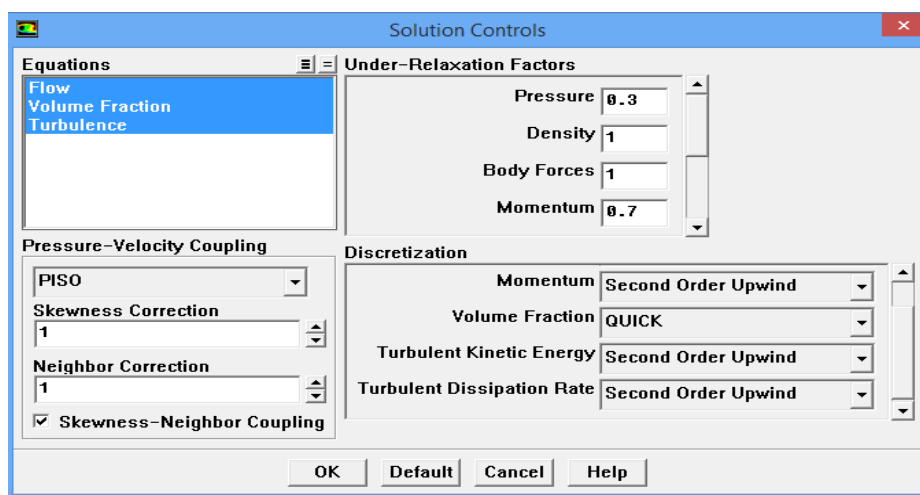
شکل ۳-۴- مدل سرریز پلکانی با لبه ۵ سانتی‌متری در انتها و ۳ سانتی‌متری در وسط پله

۳-۸-۲- آشنایی با نرم‌افزار فلونت

نرم‌افزار Fluent که با زبان برنامه‌نویسی C نوشته شده است، یک برنامه کامپیوتری قدرتمند برای تحلیل و شبیه‌سازی جریان سیال و انتقال حرارت در هندسه‌های پیچیده است. در این نرم‌افزار با کمک قابلیت توابع تعریف شده توسط کاربر (user defined function یا UDF) که با زبان C و توسط کاربر نوشته می‌شوند می‌توان قابلیت‌ها و توانایی‌های نرم‌افزار را در تشریح شرایط مرزی، تعریف خواص فیزیکی و حتی ایجاد و تولید شیوه‌های بهتر و ... افزایش داد.

این نرم‌افزار می‌تواند جریان را در شبکه‌های بی‌سازمان و با سازمان (شبکه‌هایی با سلول‌های مثلثی و چهارضلعی در حالت دوبعدی و سلول‌های چهاروجهی، شش‌وجهی، هرمی یا گوه‌ای در حالت سه‌بعدی) برای هندسه‌های پیچیده شبیه‌سازی و تحلیل نماید (رستمی و همکاران، ۱۳۸۶). همچنین Fluent با کمک گزینه Adapt خود، به کاربر اجازه تطبیق و بهبود شبکه (مثلاً ریز کردن یا درشت کردن شبکه در مرزها و مکان‌های لازم در هندسه) را می‌دهد. این قابلیت باعث می‌شود که نتایج تحلیل در ناحیه‌ای که دارای گرادیان‌های شدید (مثل لایه مرزی و ...) هستند، دقیق‌تر محاسبه شده و زمان لازم برای تولید یک شبکه مناسب نیز به‌طور قابل ملاحظه‌ای کاهش یابد (دهقانی سانچ، ۱۳۹۳). این نرم‌افزار از معادلات

پیوستگی و ناویر استوکس در تحلیل جریان استفاده می‌کند. در صورتی که جریان آشفته باشد در این صورت معادلات حاکم به معادلات رینولدز^۱ (RNS) تغییر ماهیت داده و مدل‌های یک معادله‌ای، دو معادله‌ای، پنج یا شش معادله‌ای برای تعیین لزجت گردابه‌ای استفاده می‌شود که کاربر، نوع مدل موردنظر را معین می‌کند. حل میدان جریان بر اساس انفصال معادلات به روش حجم محدود است و روش‌های مختلف انفصال ترم‌های انتقال معادلات مانند بالادست، بالادست مرتبه‌ی دوم، توانی و کوئیک قابل انتخاب توسط کاربر است. به‌منظور کوپل کردن میدان سرعت و میدان فشار نیز روش‌های سیمپل (SIMPLE)، سیمپل_سی (SIMPLEC)، و پیزو (PISO) در برنامه موجود است (رستمی و همکاران، ۱۳۸۶).



شکل ۳-۵- انفصال سازی ترم‌های معادله انتقال

۳-۹- کالیبراسیون^۲

از مهم‌ترین گام‌ها در انجام یک مطالعه عددی، کالیبراسیون مدل است. بدین معنی که تأثیرات عوامل خارجی را به حداقل رسانده و شرایط مدل را به شرایط واقعی نزدیک‌تر نمود. با توجه به اینکه

¹ Reynolds Number

² calibrate

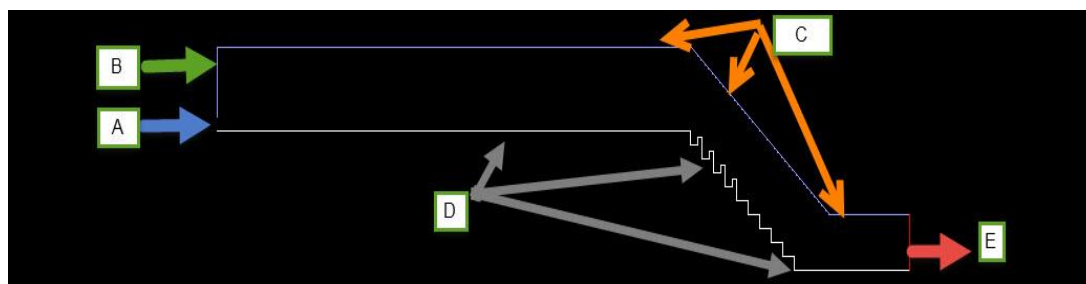
مدل عددی حاضر از روی مدل آزمایشگاهی ایجاد شده است پس با یک مدل کالیبره شده آزمایشگاهی روبرو هستیم. آنچه اینجا مطرح می شود، کالیبره کردن مدل عددی از لحاظ شرایط مرزی و زمان شبیه سازی می باشد.

۱۰-۳- تنظیمات حل

در ابتدا کیفیت مش موردنظر بررسی می شود. در صورتی که مینیمم حجم مش منفی باشد، باید اصلاح شود. حجم منفی بدین معنی است که یک یا چند سلول به صورت نامناسب به یکدیگر متصل شده اند. حل بر اساس فشار و به صورت وابسته به زمان تنظیم و نیروی ثقلی $9/806$ وارد می شود.

۱-۱۰-۳- شرایط مرزی

شرایط مرزی با توجه به فیزیک مسئله، تعیین کننده ی جریان و خاصیت های حرارتی در مرزها می باشد. شرایط مرزی اجزای بسیار مهم و تعیین کننده ای در نرم افزار Fluent می باشد که در شکل (۶-۳) مشاهده می کنید.



شکل ۶-۳- نمایی از شرایط مرزی مدل موردنظر در Gambit

در شکل (۶-۳) همان طور که مشاهده می کنید قسمت A نشان دهنده شرایط مرزی سرعت که ورودی آب به کانال است velocity inlet(water) ، B نشان دهنده شرط مرزی سرعت ورودی به کانال از نوع هوا velocity inlet(air) ، C نشان دهنده ی فشار ورودی Pressure inlet ، D نشان دهنده مرز

دیوار (Wall)، و E نشان دهنده فشار خروجی Pressure outlet است که در قسمت بعدی به اختصار توضیح می دهیم.

۳-۱۰-۱-۱ شرایط مرزی سرعت ورودی (velocity inlet)

شرط مرزی ورودی سرعت (velocity inlet) برای تعریف سرعت جریان، با تمام خاصیت‌های اسکالر جریان، در ورودی‌های جریان به کار می‌رود. در این نوع شرط مرزی، خواص کل (یا سکون) ثابت نیستند، بنابراین این خواص می‌توانند به هر مقداری که برای توصیف توزیع سرعت نیاز باشد افزایش یابند، لذا این شرط مرزی فقط برای جریان‌های غیرقابل تراکم^۱ قابل استفاده است و به کارگیری آن در جریان‌های قابل تراکم باعث پیدایش نتیجه‌های غیر فیزیکی خواهد شد. همچنین باید مرز ورودی سرعت (velocity inlet) را در نزدیکی یک مانع یا گرفتگی قرار نداد چون باعث به هم ریختن و غیریکنواخت شدن خواص سکون ورودی جریان خواهد شد (دهقانی سانچ، ۱۳۹۳). در پنجره شرایط مرزی سرعت همان‌طور که در شکل (۷-۳) نشان داده شده است، سرعت ورودی آب و مشخصه‌های آشفتگی به صورت شدت آشفتگی^۲ و قطر هیدرولیکی به عنوان شرایط ورودی در فاز مختلط نیاز است.

$$V = \frac{Q}{A} \quad \text{سرعت جریان}$$

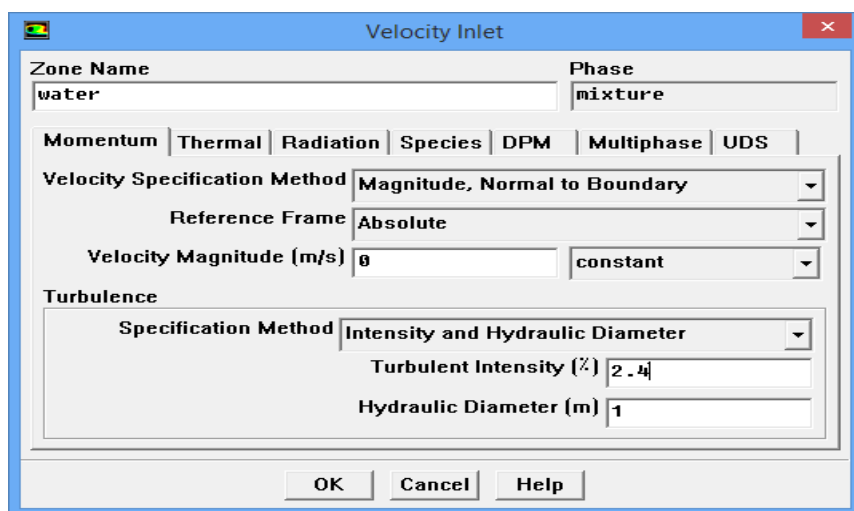
$$D_H = 4R = 4 \frac{by}{b + 2y} \quad \text{قطر هیدرولیکی}$$

$$R_e = \frac{\rho v D}{\mu} \quad \text{رینولدز}$$

$$I = R_e \left(\frac{-1}{8} \right) \quad \text{شدت آشفتگی}$$

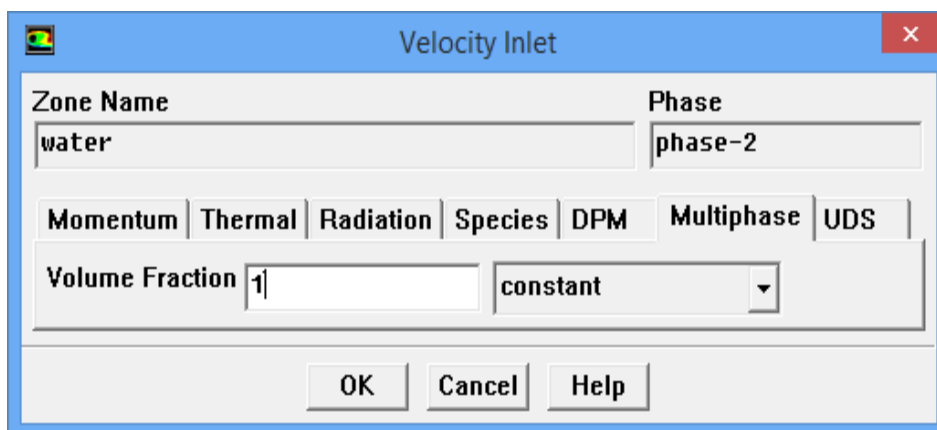
¹ Incompressible flow

² Turbulence intensity



شکل ۳-۷- شرط مرزی سرعت در فاز مختلط

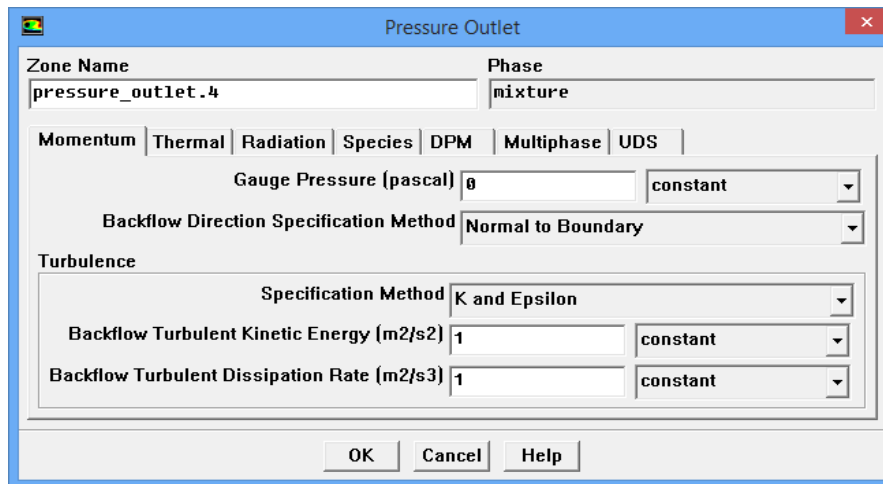
بعد تنظیم فاز مختلط، کسر حجمی فاز یک و فاز دو تعیین می‌شود. در فلوئنت فقط می‌توان کسر حجمی فاز دوم را تغییر داد. بدین ترتیب که اگر در قسمت کسر حجمی فاز دو، مقدار صفر وارد شود به این معنا است که در این ناحیه فاز دوم وجود ندارد. فقط فاز یک موجود است و اگر مقدار یک وارد شود، یعنی کل این ناحیه شامل فاز دوم است. بنابراین چون آب به‌عنوان فاز دوم در نظر گرفته شد، برای ورودی آب، کسر حجمی یک و برای ورودی هوا کسر حجمی صفر وارد می‌شود. در شکل (۳-۸) تنظیمات شرایط مرزی سرعت ورودی بر فاز دوم نشان داده شده است.



شکل ۳-۸- شرط مرزی سرعت ورودی برای فاز دوم

۳-۱۰-۱-۲- شرایط مرزی فشار ورودی و فشار خروجی

شرط مرزی فشار ورودی و خروجی یکسان است. در اینجا باید مقدار فشار در مرز وارد شود. برای مرز خروجی و مرز بالایی مقدار فشار صفر است. کسر حجمی نیز در مرز خروجی و بالایی صفر وارد شده است.



شکل ۳-۹- شرط مرزی فشار برای فاز مختلط

۳-۱۰-۱-۲-۱- شرط مرزی فشار ورودی (pressure inlet)

شرط مرزی pressure inlet برای تعریف فشار سیال در ورودی جریان با تمامی خواص اسکالر جریان، به کار می‌رود. این شرط ورودی برای هر دو نوع جریان قابل تراکم و غیرقابل تراکم مناسب است.

شرط مرزی pressure inlet وقتی که فشار ورودی معلوم باشد اما دبی جریان یا سرعت آن معلوم نیست به کار می‌رود. این شرط مرزی در بسیاری از مسائل علمی مثل جریان‌های نیروی شناوری و تعیین یک مرز آزاد برای جریان‌های غیر محصور و خارجی رخ می‌دهد.

۳-۱۰-۱-۲-۲- شرط مرزی فشار خروجی (pressure outlet)

در شرط مرزی pressure outlet فشار استاتیک به صورت نسبی در مرز خروجی وارد می‌شود و مقدار تعیین شده فشار استاتیک فقط وقتی مورد استفاده قرار می‌گیرد که جریان مادون صوت باشد.

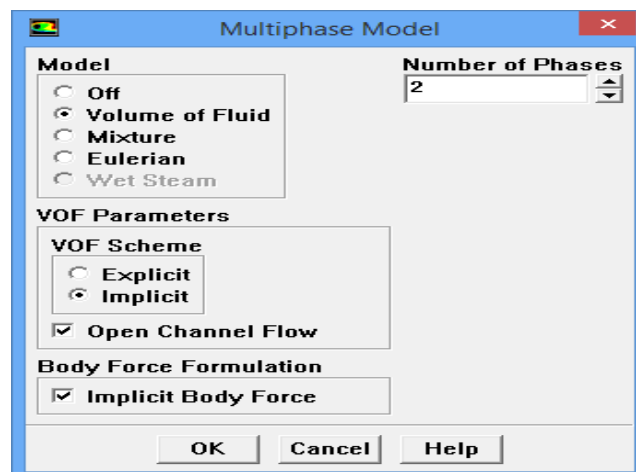
به محض اینکه جریان تا حدودی مافوق صوت شود، فشار استاتیکی که ما تعیین کرده‌ایم مورد استفاده قرار نمی‌گیرد و فشار از جریان داخلی برون‌یابی می‌شود، بقیه کمیت‌های جریان نیز از داخل جریان برون‌یابی می‌شوند.

۳-۱-۱۰-۳ شرط مرزی دیوار (Wall)

شرط مرزی دیوار همان‌طور که از نامش پیدا است برای محصور کردن نواحی سیال و جامد به کار می‌رود. مرز دیوار (کف کانال و تند آبراهه) به صورت ثابت و بدون لغزش تنظیم می‌شود. از آنجا که دیواره سرریز از جنس نوعی چوب به نام فومیزه ساخته شده، مقدار ارتفاع زبری مطلق 0.001 متر منظور گردید.

۳-۱۱- مدل‌های تک فازی یا چند فازی در نرم‌افزار Fluent

در نرم‌افزار Fluent جریان‌ها به دودسته تک فازی و چند فازی تقسیم می‌شوند که برای حالت چند فازی انواع مختلف مدل‌ها وجود دارند که به سه زیرشاخه Volume of Fluid، Mixture و Eulerian تقسیم می‌شوند که بنا به نیاز مسئله از هر کدام استفاده می‌شود.



شکل ۳-۱۰-۳- تعیین فاز مدل

مدل حجم سیال Volume of Fluid توسط Hirt, Nichols در سال ۱۹۸۱ پیشنهاد شد. برای تعیین سطح مشترک دو فاز سیال در بسیاری از مسائل هیدرودینامیکی مطرح بوده است، در پدیده‌های هیدرولیکی نیز سطح آزاد جریان در حل میدان جریان از اهمیت خاصی برخوردار است. روش‌های گوناگونی در تعیین سطح آزاد استفاده می‌شود که نسبت به دیدگاه حاکم بر حل میدان جریان متفاوت است. در روش VOF برای هر جزء حجم سلول یک معادله دیفرانسیلی حل می‌شود که نهایتاً مقدار جزء حجم سیال در هر سلول معین می‌گردد. در میدان جریان با شبکه ثابت، تعیین سطح آزاد بر اساس دیدگاه اولری نسبت به جریان مشخص می‌شود (دهقانی سانچ، ۱۳۹۳).

مدل حجم سیال بر اساس تئوری جریان چند فازی پیشنهاد گردیده است. اما در واقع یک مدل چند سیاله نیست و تنها یک سیال ساده به‌عنوان سیال اصلی به مدل حجم سیال معرفی می‌گردد. بنابراین برای جریان سیالات به‌صورت آب و گاز تنها یک سری از معادلات مومنتم به‌صورت مشترک بین گاز و آب حل گردیده و کسر از حجم هر کدام از سیالات که سلول‌های محاسباتی را اشغال می‌کنند، تعیین می‌گردد. در هر سلول مجموع کسرهای حجمی آب و هوا برابر ۱ است. بنابراین یک متغیر اضافه به نام کسر حجمی آب یا هوا به شرایط مسئله معرفی می‌گردد. اگر α_w کسر حجمی آب را نشان دهد، بنابراین کسر حجمی هوا با α_a توسط رابطه زیر بیان می‌گردد:

$$\alpha_a = 1 - \alpha_w \quad (۱-۳)$$

از آنجایی که کسر حجمی آب و هوا در هر نقطه معلوم می‌باشد، بنابراین مقادیر متغیرها و خصوصیات سیال بین آب و هوا به اشتراک گذاشته می‌شود و در واقع مقادیر متوسط حجمی را نشان می‌دهد. بنابراین مقادیر متغیرها و خصوصیات سیال در هر سیال داده‌شده، به عبارتی شاخصی از آب، هوا و یا مخلوطی از آن دو می‌باشد، که هر کدام از حالات، بستگی به کسر حجمی مربوط دارد. تعیین سطح مشترک بین

آب و هوا از طریق حل معادله پیوستگی به فرم زیر انجام می‌شود، این معادله برای جهت X آورده شده است:

$$\frac{\partial \alpha_w}{\partial t} + u_i \frac{\partial \alpha_w}{\partial x_i} = 0 \quad (2-3)$$

مقدار α_w در یک سلول بیانگر کسر حجمی سلول که توسط آب اشغال شده است می‌باشد. برای مثال مقدار یک برای α_w نشانگر سلولی پر از آب می‌باشد در حالی که $\alpha_w = 0$ نشان‌دهنده سلولی پر از هوا است اگر مقدار α_w بین ۰ و ۱ باشد، بنابراین حتماً می‌بایست یک مرز مشترک بین هوا و آب در سلول مربوطه وجود داشته باشد. بنابراین اطلاعات دقیق در مورد سطح مشترک با توجه به مقدار α_w به دست می‌آید (مرتضوی، ۱۳۹۱).

فرمول‌بندی معادلات بر اساس مدل حجم سیال VOF بر مبنای این حقیقت است که دو یا چند فاز سیال که در کنار هم هستند با یکدیگر مخلوط نمی‌شوند (رسایی و همکاران، ۱۳۸۸).

مدل چند فازی Volume of Fluid هنگامی استفاده می‌شود که هدف اندازه‌گیری و مشاهده مرز بین فازها باشد در حالی که اگر مرز بین فازها چندان اهمیتی نداشته باشد می‌توان از هر کدام از مدل‌های Mixture و Eulerian استفاده کرد. ضمن اینکه اگر جریان چند فاز باشد، دارای یک‌فاز اصلی (primary-phase) و یک یا چند فاز ثانویه (secondary-phase) است.

۱۲-۳- معادلات جریان دو فاز در مدل VOF

۱-۱۲-۳ معادلات جزء حجمی

ردیابی سطح آزاد بین دو فاز به وسیله حل معادله پیوستگی برای جزء حجمی یکی از فازها انجام می‌گیرد. این معادله برای فاز q به صورت زیر است:

$$\frac{1}{\rho q} \left[\frac{\partial}{\partial t} (\alpha_q \rho_q) + \nabla \cdot (\alpha_q \rho_q \vec{v}_q) \right] = \sum_{p=1}^n (\dot{m}_{pq} - \dot{m}_{qp}) \quad (3-3)$$

در این رابطه \dot{m}_{pq} تبادل جرم از فاز p به q و \dot{m}_{qp} تبادل جرم از فاز q به p می‌باشد.

زمانی که دو سیال وجود داشته باشد (مانند سطح آزاد آب) معادله تنها برای یکی از دو سیال حل می‌گردد. برای سیال دوم مقدار نسبت سیال از محدودیت زیر به دست می‌آید. در این رابطه n، تعداد سیال یا فازها می‌باشد:

$$\sum_{i=1}^n \alpha_i = 1 \quad (4-3)$$

خصوصیات معادله انتقال در هر سلول از ترکیب خصوصیات سیال‌های موجود در آن سلول به وجود می‌آید. برای مثال در سیستم دوفازی دانسیته به صورت زیر محاسبه می‌گردد:

$$\rho = \alpha_1 \rho_1 + \alpha_2 \rho_2 = \alpha_1 \rho_1 + (1 - \alpha_1) \rho_2 \quad (5-3)$$

در حالت کلی برای n فاز سیال داریم:

$$\rho = \sum_{i=1}^n \alpha_i \rho_i \quad (6-3)$$

۳-۱۲-۲- معادلات مومنتم

در روش VOF یک معادله مومنتم برای جریان حل می‌شود و میدان سرعت برای فازها مشترک است.

معادله مومنتم به جزء حجمی تمام فازها و خصوصیات فیزیکی آن‌ها (ρ و μ) وابسته است.

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \vec{v}) + \nabla \cdot (\rho \vec{v} \vec{v}) = -\nabla p - \nabla \cdot [\mu (\nabla \vec{v} + \nabla \vec{v}^T)] + \rho \vec{g} + \vec{F} \quad (7-3)$$

در این رابطه P فشار، \vec{V} بردار سرعت می‌باشد μ و ρ ویسکوزیته و چگالی بوده که با توجه به جزء حجمی هر کدام از فازها تعیین می‌شود. \vec{F} بیانگر نیروهای حجمی می‌باشد.

یکی از محدودیت‌های تقریب میدان‌های مشترک در مواردی است که اختلاف سرعت‌های بزرگی بین فازها وجود دارد. در این حالت دقت سرعت‌های محاسبه‌شده در نزدیک سطح مشترک ممکن است تحت تأثیر قرار گیرد.

روش‌های متعددی برای حل این معادله وجود دارد که در این تحقیق از روش بازسازی هندسی (الگوی یانگ) استفاده شده است. این روش به صورت غیر ماندگار بوده و شیب سطح بین آب و هوا در هر سلول جریان به صورت خطی فرض می‌شود.

۳-۱۳- مدل‌های آشفتگی در نرم‌افزار Fluent

نرم‌افزار Fluent برای اجرا و شبیه‌سازی الگوی سه‌بعدی و دوبعدی جریان در حالت دائم (Steady) یا غیر دائم (Unsteady) است. مدل‌های مختلف آشفتگی در این نرم‌افزار وجود دارند که هر یک از این مدل‌ها دارای انشعاباتی می‌باشند.

مدل‌های آشفتگی در نرم‌افزار Fluent به سه بخش k -epsilon، k -omega و Reynolds Stress Model (RSM) تقسیم می‌شوند که در زیر به تفصیل به هر کدام پرداخته خواهد شد.

الف) مدل‌های آشفتگی دو معادله‌ای k -epsilon موجود در نرم‌افزار خود به سه انشعاب Standard، RNG¹ و Realizable تقسیم می‌شود.

مدل RNG که از جدیدترین مدل‌های آشفتگی بر پایه گروه‌های نرمال شده رینولدز است، از بسط و توسعه مدل k -epsilon مبتنی بر روش تجدید نرمال‌سازی گروهی standard به دست آمده است، بصورتی که ثابت‌هایی که به طور تجربی در معادله استاندارد k -epsilon به دست آمده‌اند، به طور صریح در معادله RNG استخراج شده‌اند. عموماً مدل RNG قابلیت اجرایی وسیع‌تری از مدل استاندارد k -epsilon دارد، خصوصاً برای توصیف جریان‌های با شدت تلاطمی کمتر و جریان‌های که نواحی برشی قوی‌تری

¹ Renormalized Group

دارند از دقت بالاتری برخوردار است. مدل RNG در مقایسه با معادله استاندارد k-epsilon دارای یک ترم epsilon اضافی است که به طور معنی داری دقت آن را برای جریان های پیچیده افزایش می دهد (برزگر و همکاران، ۱۳۹۴).

تئوری RNG یک فرمول دیفرانسیلی تحلیلی اشتقاقی را برای ویسکوزیته مؤثر و یک فرمول تحلیلی را برای اعداد پرانتل تلاطمی فراهم می کند. این خصوصیات مدل RNG را دقیق تر می کند و برای کلاس وسیع تری از جریان ها در مقابل مدل استاندارد k-epsilon قابل اعتمادتر می کند. در مدل k-epsilon استاندارد معادلاتی که تلاطم را مدل می کنند شامل دو معادله است. معادله اول که معادله انرژی جنبشی تلاطمی است، به شکل معادله (۸-۳) می باشد:

$$\frac{\partial \rho k}{\partial t} + \frac{\partial (\rho V_x k)}{\partial x} + \frac{\partial (\rho V_y k)}{\partial y} + \frac{\partial (\rho V_z k)}{\partial z} = \quad (8-3)$$

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\mu_t}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\mu_t}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{\mu_t}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial z} \right) + \mu_t - \rho \epsilon$$

معادله (۸-۳) که نرخ افت انرژی تلاطمی نامیده می شود به صورت معادلات (۳-۹) و (۳-۱۰) است. ترم \emptyset موجود در روابط مربوط به تنش برشی بوده و مقادیر پیش فرض در مدل RNG برای ثابت های بکار گرفته شده در معادلات، در جدول (۳-۳) آورده شده است (لاندر و اسپالدینگ، ۱۹۷۴).

$$\frac{\partial \rho \epsilon}{\partial t} + \frac{\partial (\rho V_x \epsilon)}{\partial x} + \frac{\partial (\rho V_y \epsilon)}{\partial y} + \frac{\partial (\rho V_z \epsilon)}{\partial z} = \quad (9-3)$$

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\mu_t}{\sigma_k} \frac{\partial \epsilon}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\mu_t}{\sigma_k} \frac{\partial \epsilon}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{\mu_t}{\sigma_k} \frac{\partial \epsilon}{\partial z} \right) + C_{1\epsilon} \cdot \mu_t \cdot \frac{\epsilon}{k} \cdot \emptyset + C_{2\epsilon} \cdot \rho \cdot \frac{\epsilon^2}{k}$$

$$C_{1\epsilon} = 1/42 - \frac{\eta(1-\frac{\eta}{\eta_\infty})}{1+\beta\eta^3} \quad (10-3)$$

جدول ۳-۳- ضرایب ثابت مدل RNG						
β	C_2	C_μ	σ_k	σ_t	σ_ϵ	η_∞
۰/۱۲	۱/۶۸	۰/۰۸۵	۰/۷۲	۰/۸۵	۰/۷۲	۴/۳۸

ب) مدل‌های آشفتگی دو معادله‌ای k - ω موجود در نرم‌افزار خود به دو انشعاب Standard و SST تقسیم می‌شود.

ج) مدل‌های آشفتگی پنج معادله‌ای تنش رینولدزی Reynolds Stress Model (RSM) یکی دیگر از سری مدل‌های RANS یا متوسط‌گیری زمانی موجود در نرم‌افزار است که به سه انشعاب Linear Pressure-Strain (LPS)، Quadratic Pressure-Strain (QPS) و Low-Re Stress-Omega (LRSO) تقسیم می‌شود.

۳-۱۴- روش حل و گسسته سازی معادلات

۳-۱۴-۱- روش حل عددی

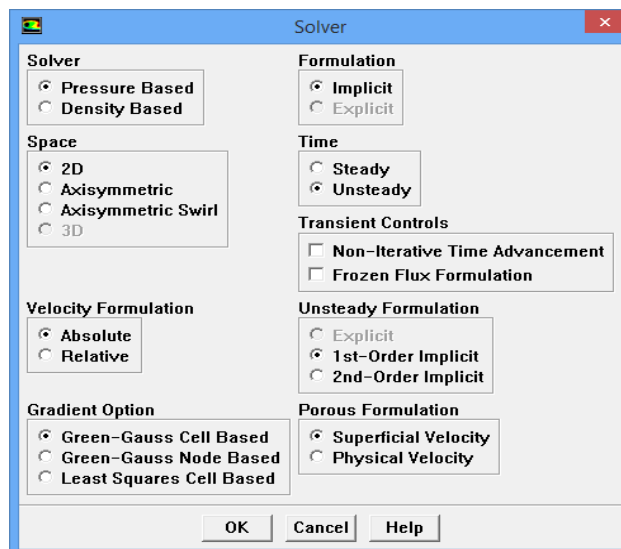
فلوئنت اجازه انتخاب یکی از دو روش عددی زیر را برای حل مسئله می‌دهد.

◀ حل مبتنی بر فشار

◀ حل مبتنی بر چگالی

در گذشته رویکرد مبتنی بر فشار برای جریان تراکم ناپذیر با سرعت کم، توسعه یافته بود. در حالی که رویکرد مبتنی بر چگالی عمدتاً بر جریان تراکم پذیر با سرعت بالا مورد استفاده قرار می‌گرفت. با این حال، به تازگی هر دو روش، توسعه یافته و دوباره برای حل مسئله فرمول‌بندی شده و برای طیف وسیعی از شرایط جریان اعمال می‌شود.

در هر دو روش، میدان سرعت از معادلات حرکت به دست می‌آید. در رویکرد مبتنی بر چگالی، معادله پیوستگی برای به دست آوردن چگالی مورد استفاده قرار می‌گیرد، در حالی که میدان فشار از معادله حالت محاسبه می‌شود. شکل (۳-۱۱) تنظیمات حل مبتنی بر فشار را نشان می‌دهد.



شکل ۳-۱۱- تنظیمات حل

۳-۱۴-۲- روش‌های اعمال شده در مدل

انتخاب روش‌های گسسته سازی معادلات برای حل عددی آن‌ها بسیار مهم است. در ابتدای شبیه‌سازی برای کوپل کردن معادلات فشار و سرعت از طرح SIMPLE استفاده شد. بامطالعه راهنمای نرم‌افزار مشخص شد که طرح PISO برای کوپل کردن معادلات فشار و سرعت حافظه کمتری مصرف می‌کند و سریع‌تر همگرا می‌شود. بنابراین از این طرح برای کوپل کردن معادلات فشار و سرعت استفاده شده است.

انتخاب روش گسسته سازی معادلات، روش VOF بیشترین تأثیر را در دقت نتایج داشته است. زیرا در سرریز پلکانی هوادهی سطح آزاد جریان اتفاق می‌افتد. بنابراین انتخاب روش حل سطح آزاد جریان و گسسته سازی آن بسیار مهم است. در این تحقیق برای گسسته سازی معادلات کسر حجمی (Volume fraction) از تمامی طرح‌های موجود در نرم‌افزار استفاده شد. درنهایت با بررسی نتایج، طرح کوئیک برای این کار انتخاب شد.

برای حل جریان‌های آشفته بهتر است از حالت وابسته به زمان (ناپایدار) استفاده شود تا دقت محاسبات افزایش یابد. در نرم‌افزار فلوئنت، برای گسسته سازی زمانی در حالت ضمنی، دو روش ضمنی

مرتبه اول و مرتبه دوم وجود دارد. در روش ضمنی مرتبه اول می توان گام های زمانی را بزرگ انتخاب نمود ولی با این کار دقت محاسبات کاهش می یابد. در روش ضمنی مرتبه دوم گام زمانی باید کوچک انتخاب شود. انتخاب گام زمانی کوچک باعث افزایش دقت محاسبات می شود، ولی زمان کل حل مسئله را افزایش می دهد. در این تحقیق ترکیبی از دو روش استفاده شده است. ابتدا روش ضمنی مرتبه اول برای حل مسئله استفاده شد و سپس از روش ضمنی مرتبه دوم استفاده شد، با این کار زمان کل حل مسئله کاهش می یابد.

۳-۱۵- شرایط اولیه

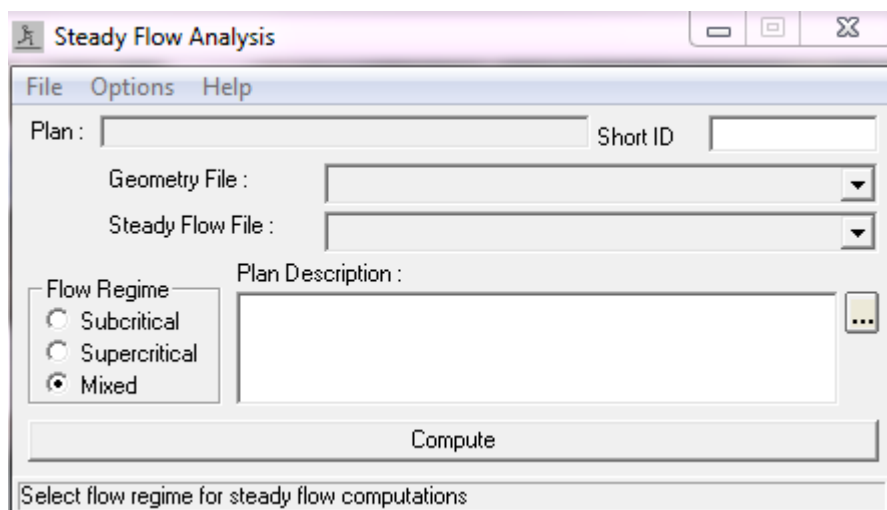
شرایط اولیه برای همگرایی مسئله بسیار مهم است. در این تحقیق در ابتدا شرایط اولیه به صورتی در نظر گرفته می شود که تمام ناحیه حل را فاز اول یعنی هوا تشکیل دهد. بعد از گذشت زمان زیادی از حل مسئله، پنجره خطا در نرم افزار ظاهر شده و حل واگرا شد. برای برطرف کردن خطا باید گام زمانی بسیار کوچک اختیار می شد، اما با این کار زمان کل حل مسئله حتی تا چندین روز به طول می انجامید. در ادامه شرایط اولیه به صورتی در نظر گرفته شد که تمامی ناحیه حل را فاز دوم یعنی آب تشکیل می دهد، با این شرایط اولیه نیز حل مسئله با همان مشکل قبلی مواجه شد. با استفاده از امکانات نرم افزار فلونت مش های بین کف کانال تا ۰/۱ متری بالای کف کانال مارک شده و در هنگام اعمال شرایط اولیه، سرعت مش های مارک شده و کسر حجمی یک اعمال شده است. با این کار مسئله سریع تر همگرا شد و زمان کل حل نیز کاهش چشم گیری یافت.

برای همگرایی بیشتر، ابتدا حل مسئله با گام زمانی $0/001$ آغاز شده که در این گام زمانی از روش ضمنی مرتبه اول برای گسسته سازی زمانی استفاده شده است سپس مقدار گام زمانی به $0/005$ تغییر یافته و در این گام زمانی از روش ضمنی مرتبه دوم برای گسسته سازی زمانی استفاده شده است. نرم افزار از جواب های به دست آمده از گام زمانی اول به عنوان شرایط اولیه برای گام زمانی $0/005$ ثانیه استفاده می کند. در گام زمانی اول باقی مانده ها در حدود 10^{-3} و در گام زمانی دوم 10^{-5} به دست آمد.

۳-۱۶- مدل HEC-RAS

مرکز هیدرولوژی مهندسی ارتش آمریکا (HEC) در سال ۱۹۶۴ تأسیس شد و یکی از شش مرکز مدیریت منابع آب (IWR) و وابسته به مهندس ارتش آمریکا (USACE) می‌باشد. این مرکز در ابتدا نسخه HEC2 را ارائه نمود. اما به دلیل محدودیت‌های این نسخه، نسخه تکمیل‌شده‌ای به نام HEC-RAS را به بازار عرضه کرد. در این برنامه (v 4.1) قابلیت‌های مختلفی از جمله نمایش پلان سیستم رودخانه، مقاطع عرضی، شکل سه بعدی رودخانه و همچنین اجرای توأم فوق بحرانی و زیر بحرانی افزوده شده است. که در نسخه قبلی این قابلیت‌ها وجود نداشتند. سیستم HEC-RAS شامل چهار جزء آنالیز رودخانه در حالت یک بعدی است. این چهار جزء عبارت‌اند از: ۱- محاسبه سطح آب جریان ماندگار ۲- شبیه‌سازی جریان غیر ماندگار ۳- محاسبه انتقال رسوب مرزمتحرک و ۴- آنالیز کیفیت آب. علاوه بر چهار جزء تجزیه و تحلیل رودخانه، سیستم شامل چندین عارضه طراحی هیدرولیکی است که عبارت‌اند از:

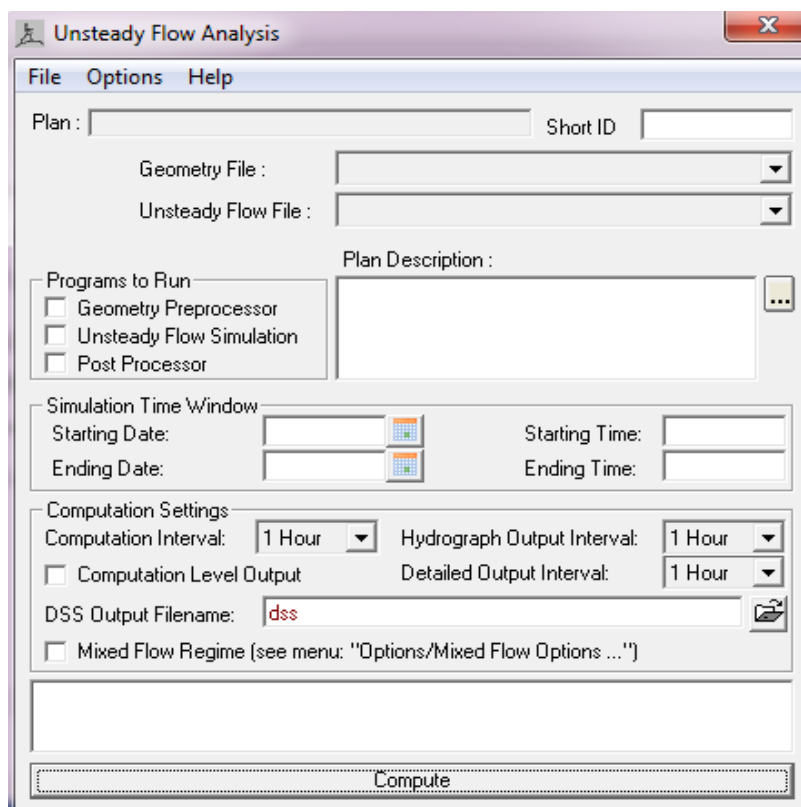
۱- رسم پروفیل سطح جریان ثابت آب. این جزء از سیستم مدل‌سازی برای محاسبه پروفیل سطح آب جریان ثابت متغیر تدریجی در نظر گرفته شده. این سیستم می‌تواند یک شبکه کامل از کانال و یا یک بازه واحد رودخانه را تحت پوشش قرار دهد. همچنین بخش جریان ثابت قادر به مدل‌سازی حالات زیربحرانی، فوق بحرانی، و ترکیب رژیم جریان پروفیل سطح آب است.



شکل ۳-۱۲- شرایط جریان ماندگار در HEC-RAS

روش محاسباتی بر اساس حل معادلات انرژی یک‌بعدی است. این معادله در شرایطی که در آن پروفیل سطح آب به سرعت در حال تغییر است استفاده شود، که این شرایط عبارت‌اند از ترکیب محاسبات رژیم جریان (مثل پرش هیدرولیکی) هیدرولیک پل و ارزیابی پروفیل در تلاقی رودخانه‌ها.

۲- شبیه‌سازی جریان ناپایدار. این جزء از نرم‌افزار قادر به شبیه‌سازی جریان ناپایدار یک‌بعدی از طریق یک شبکه کامل از کانال باز است. بخش جریان ناپایدار در درجه اول برای محاسبه رژیم جریان زیربحرانی توسعه داده شد. اما با توسعه نسخه پیشرفته آن (نسخه ۴,۱) می‌توان رژیم ناپایدار رژیم ترکیبی زیربحرانی، فوق بحرانی، پرش هیدرولیکی و فراز و فرود را تحلیل نماید.



شکل ۳-۱۳- شرایط جریان غیر ماندگار در HEC-RAS

۳- انتقال رسوب محاسبات مرز متحرک. این بخش از سیستم مدل سازی به طور کلی برای شبیه سازی یک بعدی انتقال رسوب محاسبات مرز متحرک آب شستگی و رسوب در دوره های زمانی متوسط در نظر گرفته شده است. پتانسیل انتقال رسوب توسط بخش محاسبات اندازه دانه صورت می پذیرد. در نتیجه این امکان را به شبیه سازی دسته بندی هیدرولیکی می دهد. ویژگی های اصلی آن عبارتند از توانایی مدل سازی یک شبکه کامل از جریان، لای رومی کانال، گزینه های مختلف آب بند و نفوذ و استفاده از چندین معادله مختلف برای انتقال رسوب.

۴- تجزیه و تحلیل کیفیت آب. در این بخش این امکان به کاربر داده شده است تا بتواند تجزیه و تحلیل آب رودخانه را انجام دهد. این کار توسط معادله همرفت پراکندگی با استفاده از روش حجم کنترل انجام می شود. سیستم همچنین به دلیل استفاده از سیستم عامل ویندوز در این برنامه، کلیه منوهای ورودی اطلاعات در اختیار بوده و پیچیدگی تشکیل فایل ورودی را ندارد. اما مراحل ایجاد یک مدل هیدرولوژیکی با HEC-RAS به شرح زیر است:

۱. شروع و ایجاد یک پروژه جدید
۲. وارد کردن داده‌های هندسی
۳. وارد کردن داده‌های جریان و شرایط مرزی
۴. انجام محاسبات هیدرولیکی
۵. مشاهده و چاپ

مطالب فوق تعریفی کلی از این نرم‌افزار و کاربردهای مهم آن می‌باشد.

در این تحقیق ابتداً قرار بود شبیه‌سازی افت انرژی با مدل‌های FLUENT و HEC-RAS صورت پذیرد. پس از بررسی‌های فراوان نتیجه این شد که مدل HEC-RAS توانایی لازم برای این کار را ندارد و لذا در این تحقیق فقط از نتایج حاصل از شبیه‌سازی مدل FLUENT استفاده شده است. یکی از دلایل اصلی که از مدل HEC-RAS استفاده نشد یک بعدی بودن آن بود و عدم توانایی این مدل در شبیه‌سازی افت‌ها بوده است. مدل FLUENT توانایی شبیه‌سازی‌های موردنیاز را به صورت دوبعدی دارا می‌باشد و در این تحقیق بیشتر به دنبال تحلیل دوبعدی موضوع بودیم به همین خاطر از مدل HEC-RAS استفاده نگردید.

فصل چهارم

نتایج و بحث

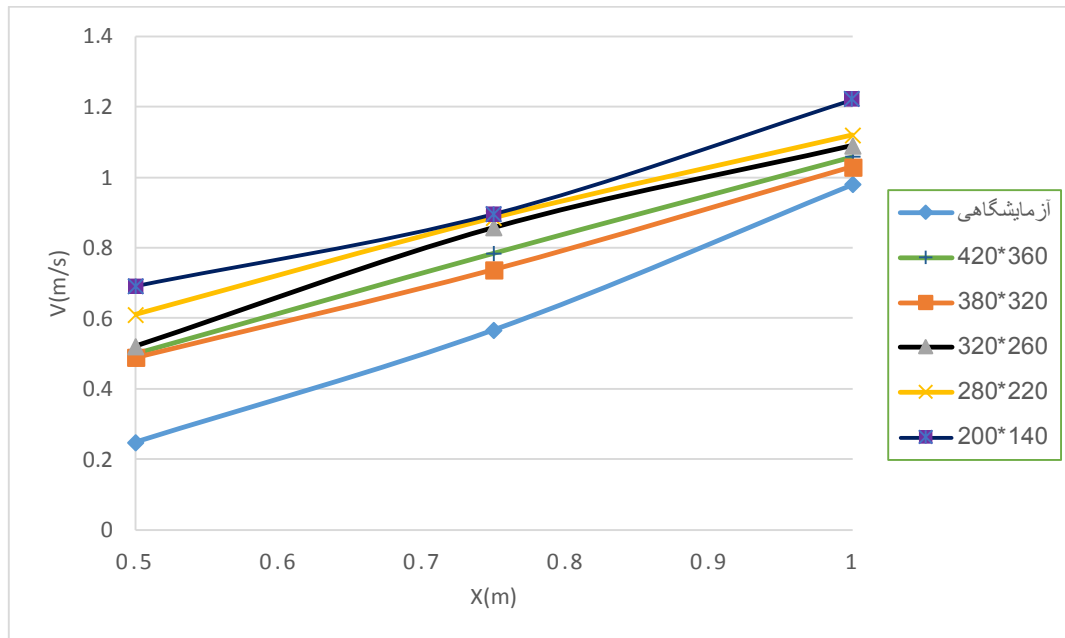
رفتار سرریزهای پلکانی دارای پیچیدگی‌های زیادی می‌باشد. لیکن به دلیل شکل ظاهری متمایز و میزان استهلاک انرژی قابل توجه در طول این سازه‌ها، اکثر تحقیقات صورت گرفته پیرامون آن‌ها صرفاً به بررسی تأثیر عوامل مختلف بر میزان استهلاک انرژی پرداخته‌اند. پس از جمع‌آوری اطلاعات از نتایج عددی، بر روی پارامترهای مختلف موثر بر مدل‌سازی افت انرژی در روی سرریز پلکانی و به‌منظور بررسی اهداف تحقیق، آنالیزهایی انجام شد. در این فصل نتایج مربوط به شبیه‌سازی عددی ارائه‌شده و با نتایج آزمایشگاهی مقایسه شده است و با توجه به قابلیت نرم‌افزار فلوئنت، از آن در شبیه‌سازی جدید استفاده گردید.

۴-۲. کالیبراسیون مدل

از آنجایی که در مدل‌سازی با مدل‌های عددی، مش بندی شبکه محاسباتی می‌تواند روی نتایج مدل تأثیر بگذارد در این قسمت به بررسی تأثیر مش بندی بر نتایج مدل‌سازی پرداخته‌شده است. در این تحقیق ابتدا در شیب صفر درصد ۱۰ نوع مش بندی مختلف استفاده شد که با توجه به نتایج به‌دست‌آمده از مدل‌سازی‌ها، به‌منظور کاهش حجم محاسبات، ۵ نوع مش بندی با تعداد تقسیمات 200×140 ، 280×220 ، 320×260 و 380×320 و 420×360 که به ترتیب از سمت چپ بیانگر تعداد تقسیمات در جهت x و y می‌باشد جهت استفاده در همه مدل‌سازی‌ها به‌منظور بررسی تأثیر مش بندی بر نتایج مدل‌سازی استفاده‌شده است.

آزمایش‌ها در کانالی با شیب صفر درصد با دبی 0.27 مترمکعب بر ثانیه انجام پذیرفته است. به‌منظور بررسی تأثیر مش‌های مورد استفاده بر نتایج حاصل از مدل عددی، سرعت جریان در سه مقطع بافاصله طولی 0.5 متر بعد از سرریز و در زمان ۱۵ ثانیه پس از شروع مدل‌سازی، بافاصله 0.75 متری بعد از سرریز و در زمان ۲۰ ثانیه پس از شروع مدل‌سازی و همچنین بافاصله طولی ۱ متری بعد از سرریز و

در زمان ۲۵ ثانیه پس از شروع مدل سازی، در شکل (۴-۱) نشان داده شده است و با نتایج آزمایشگاهی شفيعی پور و همکاران (۱۳۹۲) مقایسه شده است.



شکل (۴-۱) مقایسه نتایج مدل عددی با مقادیر آزمایشگاهی شفيعی پور و همکاران (۱۳۹۲) با توجه به ابعاد مختلف شبکه مش بندی در شیب صفر درصد همان طور که در شکل (۴-۱) نشان داده شده است مش 380×320 بسیار نزدیک به نتایج شفيعی پور و همکاران (۱۳۹۲) می باشد.

۴-۳. استهلاک انرژی در سرریزها

منظور از استهلاک انرژی عبارت است از اختلاف بین انرژی در بالادست سرریز و انرژی در پایین دست آن (پنجه) در محل تشکیل عمق قبل از پرش هیدرولیکی (عمق اولیه جریان) که به صورت زیر نشان داده می شود:

$$\Delta H = H_t - H_1 = (1.5y_c + H_{dam}) - \left(y_1 + \frac{v_1^2}{2g}\right) \quad (1-4)$$

$$y_c = \sqrt[3]{\frac{q^2}{g}} \quad (2-4)$$

$$q = v_1 y_1 \quad (3-4)$$

$$H_1 = y_1 + \frac{v_1^2}{2g} \quad (4-4)$$

همچنین استهلاک انرژی نسبی ($\frac{\Delta H}{H_t}$) به صورت زیر تعریف می شود:

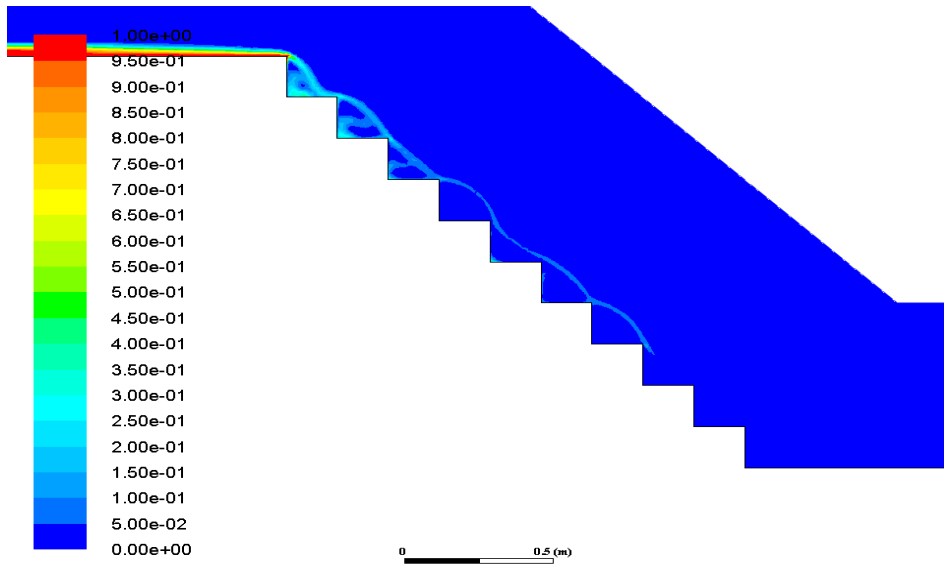
$$\frac{\Delta H}{H_t} = \frac{H_t - H_1}{H_t} \quad (5-4)$$

با در دست بودن دبی و محاسبه عمق اولیه جریان توسط فلوئنت، محاسبات انجام گرفت که در جداولی ارائه شده است.

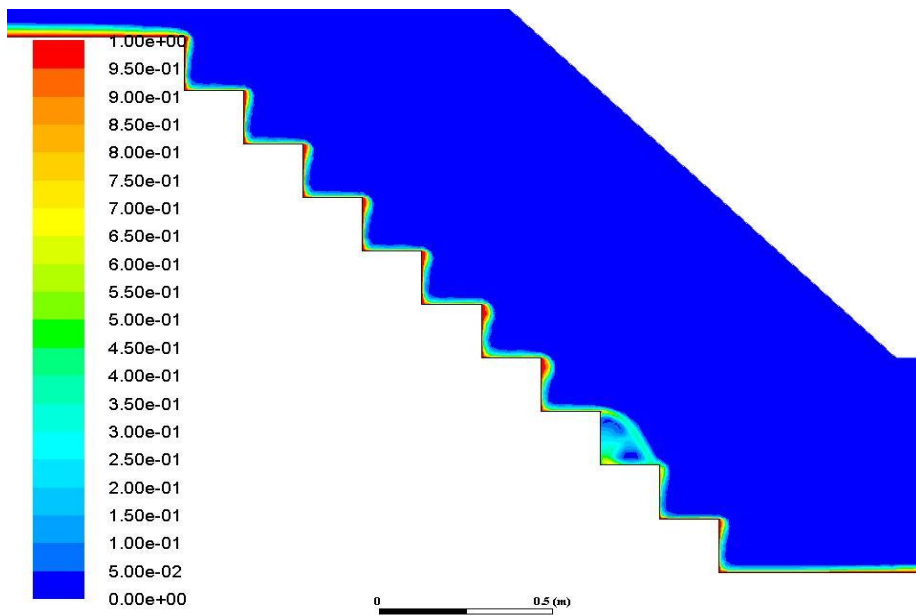
۴-۴. زمان شبیه سازی

برای استخراج مقادیر درست داده های مدل عددی یا آزمایشگاهی، رسیدن حالت جریان به یک شرایط پایدار ضروری می باشد. در مدل حاضر پس از بررسی، زمان مناسب برای اجرا ۲۰ ثانیه در نظر گرفته شد که در شکل (۲-۴) و (۳-۴) می توان نحوه عبور جریان از روی سرریز را در بازه های زمانی مختلف مشاهده کرد که جریان از ثانیه ۲۰ به بعد، حالت پایدار به خود گرفته و تغییراتی در پروفیل سطح آب مشاهده نمی شود.

۰/۵ ثانیه

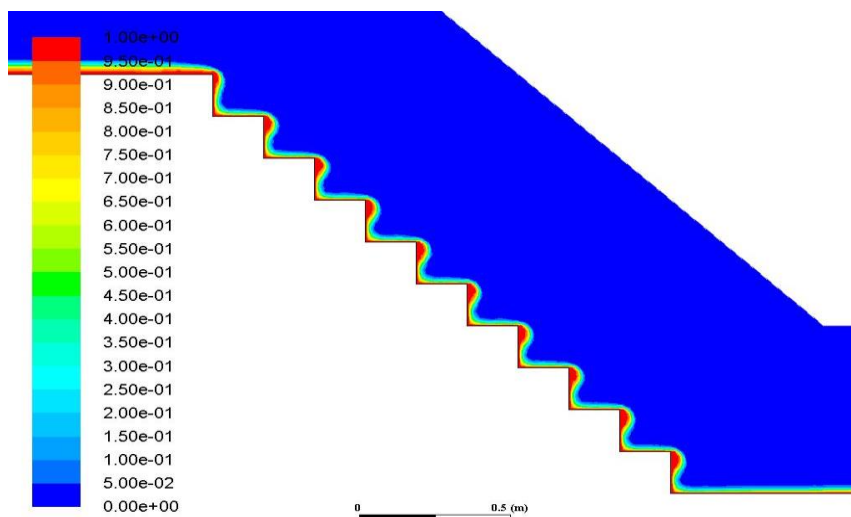


۱۰ ثانیه

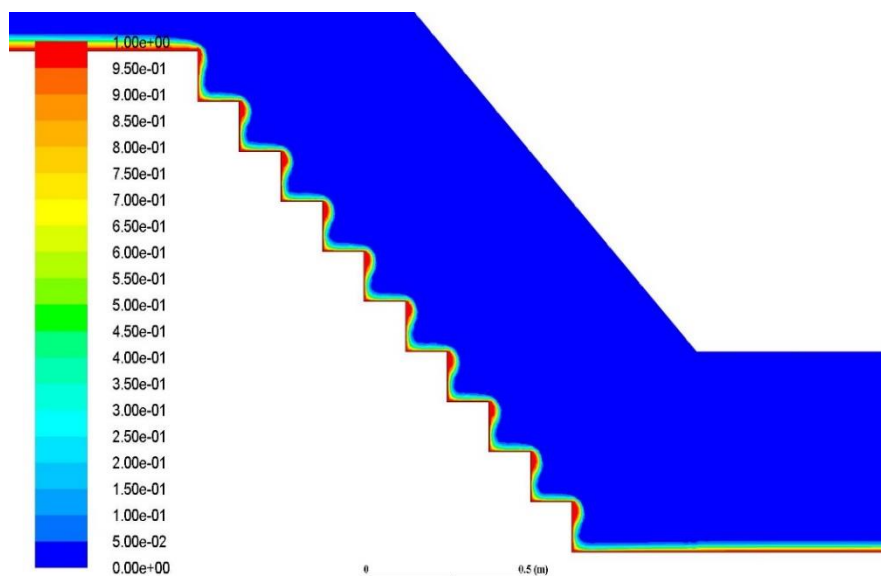


شکل ۴-۲- پروفیل سطح آب در زمان ۰/۵ و ۱۰ ثانیه از اجرای مدل به ازای دبی ۰/۰۰۷۶ مترمکعب بر ثانیه

۱۵ ثانیه

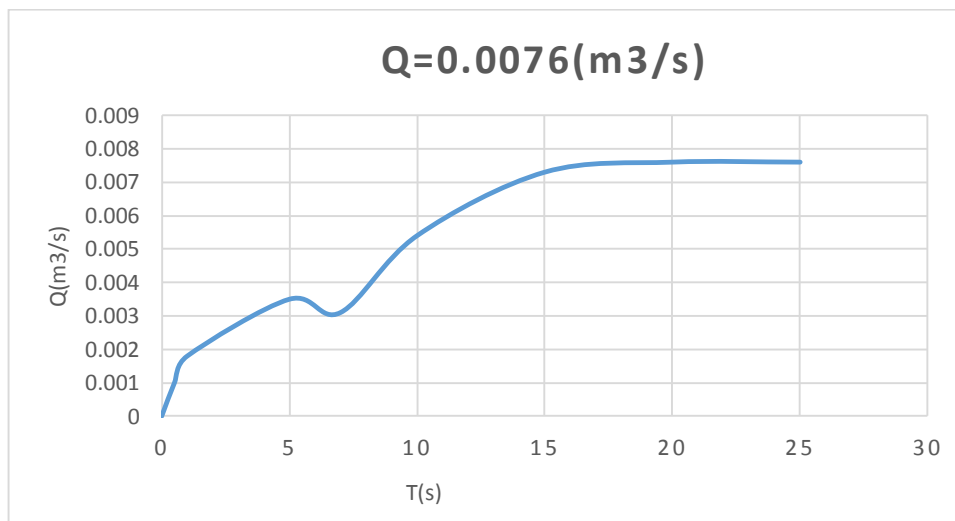


۲۰ ثانیه



شکل ۴-۳- پروفیل سطح آب در زمان ۱۵ و ۲۰ ثانیه از اجرا مدل به ازای دبی 0.0076 مترمکعب بر ثانیه

در شکل (۴-۴) نیز تغییرات دبی خروجی مدل در مقابل زمان نشان داده شده است که در روی این شکل، دبی خروجی تقریباً از ثانیه ۲۰ به بعد ثابت می ماند که نشان دهنده ماندگاری جریان است.



شکل ۴-۴- تغییرات دبی خروجی در برابر زمان

نتایج مربوط به حالت شاهد (سرریز بدون لبه) در جدول (۴-۱) برای پارامترهای مختلف ارائه شده است. در نهایت نتایج $\frac{\Delta H}{H_t}$ مربوط به مدل عددی با نتایج آزمایشگاهی مقایسه شد که میزان خطای مدل عددی کمتر از ۱٪ بود و این نشان دهنده دقت بالای نرم افزار فلونت در شبیه سازی عددی می باشد.

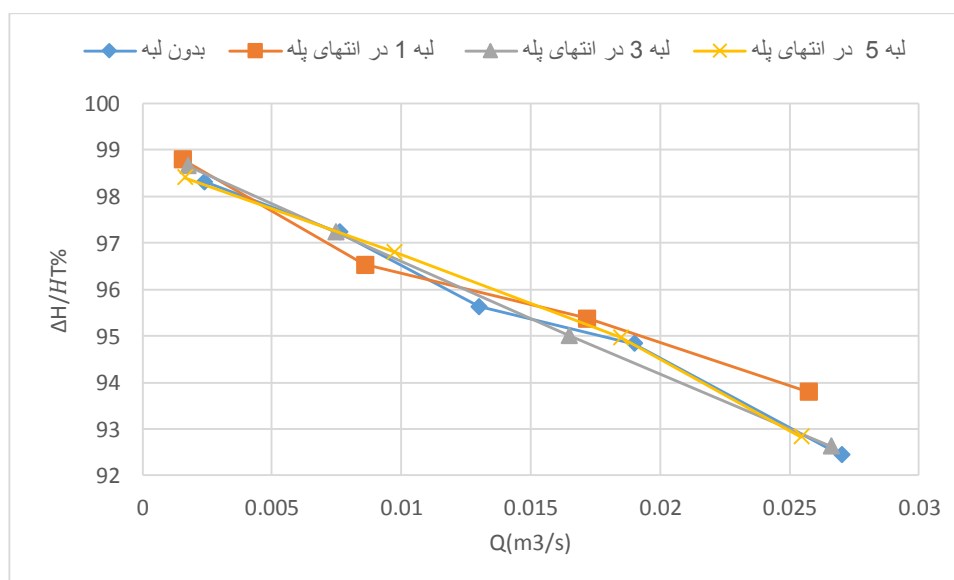
جدول ۴-۱- محاسبه پارامترهای هیدرولیکی برای سرریز پلکانی بدون لبه

ردیف	شماره مشخصات	دبی ۱	دبی ۲	دبی ۳	دبی ۴	دبی ۵
۱	$Q(m^3/s)$	۰/۰۰۲۴	۰/۰۰۷۶	۰/۰۱۳	۰/۰۱۹	۰/۰۲۷
۲	$H_t(m)$	۱/۰۱۲۵	۱/۰۲۷	۱/۰۳۹	۱/۰۵۱	۱/۰۶۳
۳	$q(m^2/s)$	۰/۰۰۲۴	۰/۰۰۷۶	۰/۰۱۳	۰/۰۱۹	۰/۰۲۷
۴	$y_1(m)$	۰/۰۰۴۹	۰/۰۱۴۴	۰/۰۱۷۶	۰/۰۲۵۱	۰/۰۲۶۲
۵	$V_1(m/s)$	۰/۴۸۹۷	۰/۵۲۷۷	۰/۷۳۸۶	۰/۷۵۷	۱/۰۲۰
۶	F_r	۲/۲۹	۱/۴۰	۱/۷۷	۱/۵۲۲	۲/۰۹
۷	$y_c(m)$	۰/۰۰۸۳	۰/۰۱۸۱	۰/۰۲۷	۰/۰۳۴	۰/۰۴۲
۸	y_c/h	۰/۰۸۳	۰/۱۸۱	۰/۲۷	۰/۳۴	۰/۴۲
۹	$H_1(m)$	۰/۰۱۷۱	۰/۰۲۸۵	۰/۰۴۵۴	۰/۰۵۴۳	۰/۰۸۲
۱۰	$\Delta H(m)$	۰/۹۹۵۴	۰/۹۹۸۵	۰/۹۹۳۶	۰/۹۹۶۷	۰/۹۸۲۷
۱۱	$\frac{\Delta H}{H_t}(\%)$ عددی	۹۸/۳۱	۹۷/۲۲	۹۵/۶۳	۹۴/۸۳	۹۲/۴۴
۱۲	$\frac{\Delta H}{H_t}(\%)$ آزمایشگاهی	۹۸/۷۴	۹۷/۳۵	۹۶	۹۴/۵۵	۹۲/۸
۱۳	درصد خطا	۰/۴	۰/۱۳	۰/۳۸	۰/۲۹	۰/۳

۵-۴. بررسی تغییرات $\frac{\Delta H}{H_t}$ در برابر دبی برای پارامترهای مختلف

۴-۵-۱. لبه‌های مختلف در انتهای پله

شکل (۴-۵) تغییرات $\frac{\Delta H}{H_t}$ را در مقابل دبی برای حالتی که لبه‌ها در انتهای پله قرار دارند نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل مشخص است با افزایش دبی مقدار استهلاک نسبی انرژی کاهش می‌یابد، اگرچه با افزایش دبی مقدار ΔH افزایش می‌یابد اما مقدار آن در مقایسه با افزایش H_t کمتر است به همین دلیل $\frac{\Delta H}{H_t}$ با کاهش همراه است. در روی شکل نمودارهای تغییرات استهلاک نسبی انرژی در برابر دبی برای لبه‌های مختلف پله‌ها ترسیم شده است که این نمودارها تقریباً بر یکدیگر منطبق‌اند که دلیل آن احتمالاً مقدار کم دبی جریان می‌باشد. البته از روی شکل می‌توان این استنباط را کرد که بهترین عملکرد در استهلاک انرژی برای پله با لبه ۱ سانتی‌متر بوده که بیشترین استهلاک انرژی نسبی به مقدار ۸/۹۳٪ را نشان داد و در حالت استفاده از لبه ۳ و ۵ سانتی‌متری در انتهای پله مقدار افت انرژی به ترتیب ۶۲/۹۲٪ و ۸۳/۹۲٪ بود. جداول (۴-۲) تا (۴-۴) مربوط به شکل (۴-۵) می‌باشند.



شکل ۴-۵- بررسی تغییرات استهلاک انرژی در برابر دبی برای لبه‌های مختلف در انتهای پله

جدول ۴-۲- محاسبه پارامترهای هیدرولیکی برای سرریز پلکانی با لبه ۱ سانتی متری در انتهای پله

ردیف	شماره مشخصات	دبی ۱	دبی ۲	دبی ۳	دبی ۴
۱	$Q(m^3/s)$	۰/۰۰۱۵۵	۰/۰۰۸۵۸	۰/۰۱۷۱۵	۰/۰۲۵۷۳
۲	$H_t(m)$	۱/۰۰۹۴	۱/۰۲۹۴	۱/۰۴۶۶۵	۱/۰۶۱۱
۳	$q(m^2/s)$	۰/۰۰۱۵۵	۰/۰۰۸۵۸	۰/۰۱۷۱۵	۰/۰۲۵۷۳
۴	$y_1(m)$	۰/۰۰۳۸	۰/۰۱۲۸	۰/۰۲۵۷	۰/۰۳۱۳
۵	$V_1(m/s)$	۰/۴۰۷۸	۰/۶۷۰۳	۰/۶۶۷۳	۰/۸۲۲
۶	F_r	۲/۱۱	۱/۸۹	۱/۳۲	۱/۴۸۳
۷	$y_c(m)$	۰/۰۰۶۲۶	۰/۰۱۹۶	۰/۰۳۱۱	۰/۰۴۰۷۳
۸	y_c/h	۰/۰۶۲۶	۰/۱۹۶	۰/۳۱۱	۰/۴۰۷۳
۹	$H_1(m)$	۰/۰۱۲۲	۰/۰۳۵۷	۰/۰۴۸۳	۰/۰۶۵۷
۱۰	$\Delta H(m)$	۰/۹۹۷۲	۰/۹۹۳۷	۰/۹۹۸۳۵	۰/۹۹۵۴
۱۱	$\Delta H/H_t$ (%) عددی	۹۸/۷۹	۹۶/۵۳	۹۵/۳۸	۹۳/۸۰
۱۲	$\Delta H/H_t$ (%) آزمایشگاهی	۹۹/۰۶۷	۹۶/۹۸	۹۵/۵۳	۹۴/۱۱
۱۳	درصد خطا	۰/۲۷	۰/۴۶	۰/۱۵	۰/۳۲

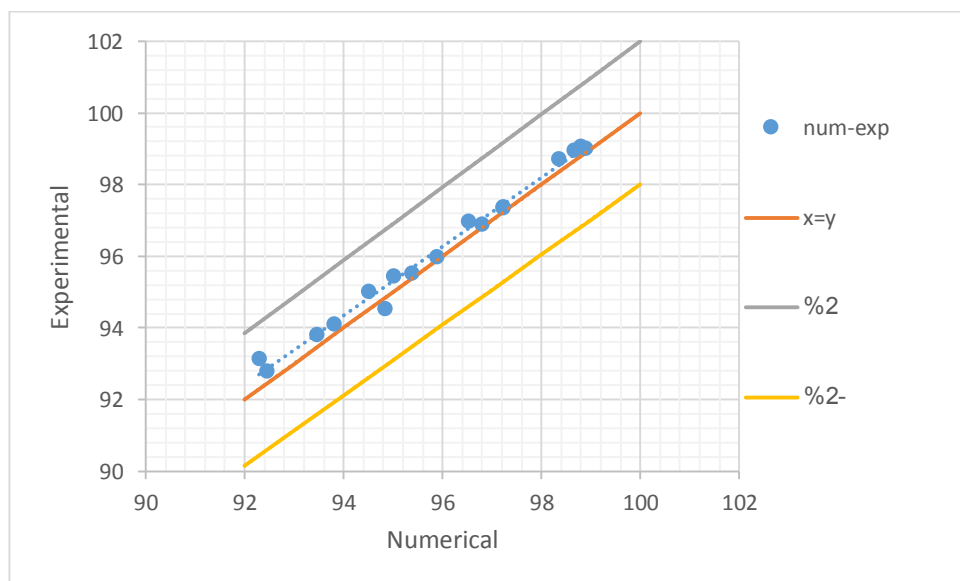
جدول ۴-۳- محاسبه پارامترهای هیدرولیکی برای سرریز پلکانی با لبه ۳ سانتی متری در انتهای پله

ردیف	شماره مشخصات	دبی ۱	دبی ۲	دبی ۳	دبی ۴
۱	$Q(m^3/s)$	۰/۰۰۱۷۶۸	۰/۰۰۷۴۶۹	۰/۰۱۶۴۸	۰/۰۲۶۶۲
۲	$H_t(m)$	۱/۰۱۰۲	۱/۰۲۶۷۸	۱/۰۴۵۳۹	۱/۰۶۲۴۹
۳	$q(m^2/s)$	۰/۰۰۱۷۶۸	۰/۰۰۷۴۶۹	۰/۰۱۶۴۸	۰/۰۲۶۶۲
۴	$y_1(m)$	۰/۰۰۴۱	۰/۰۱۳۹۸	۰/۰۲۱۱	۰/۰۲۶۳
۵	$V_1(m/s)$	۰/۴۳۱۲	۰/۵۳۴	۰/۷۸۱	۱/۰۱۲
۶	F_r	۲/۱۵	۱/۴۴	۱/۷۱۶	۱/۹۲
۷	$y_c(m)$	۰/۰۰۶۸۳	۰/۰۱۷۸۵	۰/۰۳۰۲۶	۰/۰۴۱۶۶
۸	y_c/h	۰/۰۶۸۳	۰/۱۷۸۵	۰/۳۰۲۶	۰/۴۱۶۶
۹	$H_1(m)$	۰/۰۱۳۵۷	۰/۰۲۸۵	۰/۰۵۲۱	۰/۰۷۸۴
۱۰	$\Delta H(m)$	۰/۹۹۶۶۳	۰/۹۹۸۲۸	۰/۹۹۳۲۹	۰/۹۸۴۰۹
۱۱	$\Delta H/H_t$ (%) عددی	۹۸/۶۵	۹۷/۲۲	۹۵/۰۱	۹۲/۶۲
۱۲	$\Delta H/H_t$ (%) آزمایشگاهی	۹۸/۹۸	۹۷/۳۸	۹۵/۴۶	۹۳/۱۶
۱۳	درصد خطا	۰/۳۳	۰/۱۶	۰/۴۵	۰/۵۵

جدول ۴-۴- محاسبه پارامترهای هیدرولیکی برای سرریز پلکانی با لبه ۵ سانتی متری در انتهای پله

ردیف	شماره مشخصات	دبی ۱	دبی ۲	دبی ۳	دبی ۴
۱	$Q(m^3/s)$	۰/۰۰۱۶۳۹۵	۰/۰۰۹۷۲۱	۰/۰۱۸۴۷	۰/۰۲۵۴۵
۲	$H_t(m)$	۱/۰۰۹۷۵	۱/۰۳۱۹۳	۱/۰۴۸۹۷	۱/۰۶۰۶۴
۳	$q(m^2/s)$	۰/۰۰۱۶۳۹۵	۰/۰۰۹۷۲۱	۰/۰۱۸۴۷	۰/۰۲۵۴۵
۴	$y_1(m)$	۰/۰۰۴۵	۰/۰۱۷۸	۰/۰۲۲۱	۰/۰۲۸۴
۵	$V_1(m/s)$	۰/۳۶۴۲	۰/۵۴۶۱	۰/۸۳۵۷	۰/۸۹۶۱
۶	F_r	۱/۷۳	۱/۳۰	۱/۷۹	۱/۶۹
۷	$y_c(m)$	۰/۰۰۶۵	۰/۰۲۱۲۸	۰/۰۳۲۶۵	۰/۰۴۰۴۳
۸	y_c/h	۰/۰۶۵	۰/۲۱۲۸	۰/۳۲۶۵	۰/۴۰۴۳
۹	$H_1(m)$	۰/۰۱۱۲	۰/۰۳۳	۰/۰۵۷۶	۰/۰۶۹۳
۱۰	$\Delta H(m)$	۰/۹۹۸۵۵	۰/۹۹۸۹۳	۰/۹۹۱۳۷	۰/۹۹۱۳۴
۱۱	$\frac{\Delta H}{H_t}(\%)$ عددی	۹۸/۸۹	۹۶/۸۰	۹۴/۵۰	۹۳/۴۶
۱۲	$\frac{\Delta H}{H_t}(\%)$ آزمایشگاهی	۹۹/۰۲۲	۹۶/۹۱	۹۵/۰۳	۹۳/۸۳
۱۳	درصد خطا	۰/۱۳	۰/۱۱	۰/۵۵	۰/۳۹

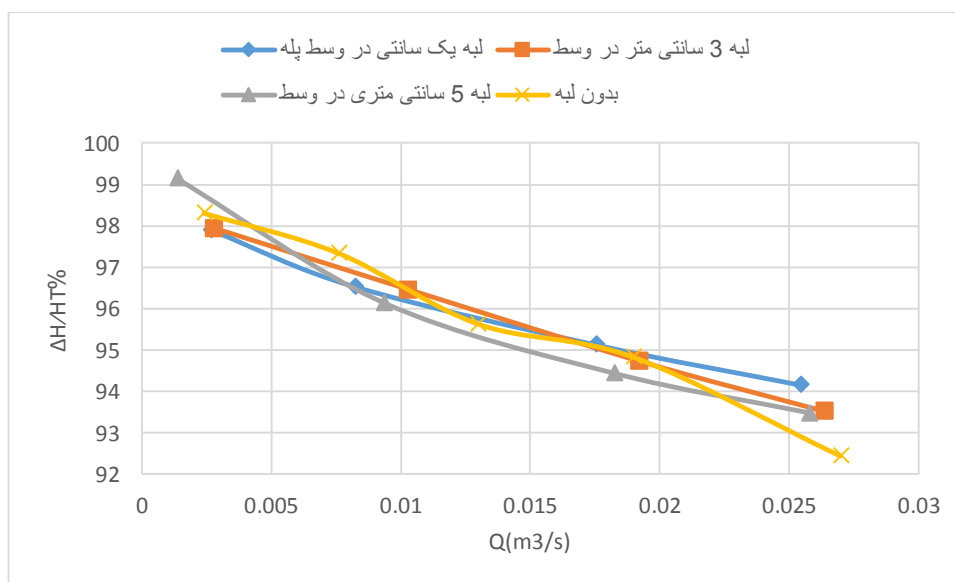
به منظور ارزیابی دقت مدل، نتایج به دست آمده از مدل عددی با نتایج آزمایشگاهی مقایسه شد. بررسی نتایج نشان داد که میزان خطای مدل عددی در شبیه سازی $\pm 2\%$ است. شکل (۴-۶) مقایسه نتایج آزمایشگاهی و عددی برای لبه های مختلف را نشان می دهد.



شکل ۴-۶- مقایسه خطای عددی و آزمایشگاهی

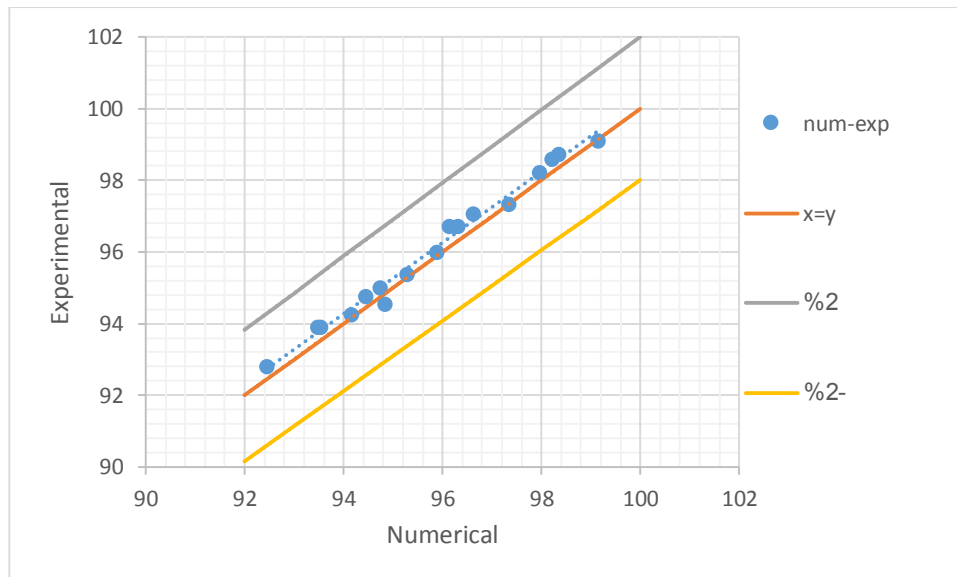
۲-۳-۴. لبه‌ها در وسط پله

شکل (۷-۴) تغییرات درصد استهلاک انرژی جریان عبوری از روی سرریز در حالتی که لبه‌هایی با ارتفاع متفاوت در وسط پله نصب می‌شوند را برای دبی‌های مختلف نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل مشخص است در کلیه حالت‌ها با افزایش دبی جریان، نسبت استهلاک انرژی کاهش می‌یابد. اگرچه با افزایش دبی، استهلاک انرژی جریان افزایش می‌یابد، اما با توجه به مقدار افزایش بیشتر H_t نسبت به ΔH ، نسبت $\frac{\Delta H}{H_t}$ با کاهش همراه خواهد بود. لبه‌دار کردن پله نیز در مقایسه با سرریز پلکانی بدون لبه باعث افزایش استهلاک انرژی شده است که مقدار آن برای لبه ۱ سانتی‌متری بیشتر از لبه ۳ و ۵ سانتی‌متری است. در واقع افزایش ارتفاع لبه تا حدودی سبب افزایش افت انرژی شده اما برای لبه‌های ۳ و ۵ سانتی‌متری شکل لبه، الگوی جریان بر روی پله‌ها را تغییر داده، افت انرژی کاهش می‌یابد. در این شرایط در واقع جریان به صورت جت از روی پله‌ها عبور می‌کند که نتیجه‌ی آن کاهش افت انرژی است.



شکل ۷-۴- بررسی تغییرات استهلاک انرژی به ازای دبی‌های مختلف برای لبه در وسط پله

در این حالت نیز دقت مدل عددی، با مقایسه نتایج مدل عددی و آزمایشگاهی ارزیابی شد. بررسی نتایج نشان داد که میزان خطای مدل عددی در شبیه‌سازی $\pm 2\% \leq$ بود. شکل (۴-۸) مقایسه نتایج آزمایشگاهی و عددی را برای حالت‌های مختلف لبه در وسط پله نشان می‌دهد.



شکل ۴-۸- مقایسه خطای عددی و آزمایشگاهی

جدول (۴-۵) تا (۴-۷) مقادیر پارامترهای مختلف شبیه‌سازی شده را برای مدل‌های مختلف نشان می‌دهد. همان‌طور که مشخص است کمترین خطاها در شبیه‌سازی مربوط به مدل با ارتفاع ۵ سانتی-متری است که شاید دلیل آن اختلاط کمتر آب و هوا در این حالت نسبت به حالت‌های دیگر می‌باشد که دقت شبیه‌سازی را بالا می‌برد.

جدول ۴-۵- محاسبه پارامترهای هیدرولیکی برای سرریز با لبه ۱ سانتی متری در وسط پله

ردیف	شماره مشخصات	دبی ۱	دبی ۲	دبی ۳	دبی ۴
۱	$Q(m^3/s)$	۰/۰۰۲۶۸۴	۰/۰۰۸۲۲۲	۰/۰۱۷۵۳	۰/۰۲۵۴۴
۲	$H_t(m)$	۱/۰۱۳۵۴	۱/۰۲۸۵۵	۱/۰۴۷۳	۱/۰۶۰۶۲
۳	$q(m^2/s)$	۰/۰۰۲۶۸۴	۰/۰۰۸۲۲۲	۰/۰۱۷۵۳	۰/۰۲۵۴۴
۴	$y_1(m)$	۰/۰۰۴۷	۰/۰۱۲۱	۰/۰۲۴۱	۰/۰۳۶۲۵
۵	$V_1(m/s)$	۰/۵۷۱	۰/۶۷۹۵	۰/۷۲۷۳	۰/۷۰۱۷
۶	F_r	۲/۶۵	۱/۹۷	۱/۴۹	۱/۲۳
۷	$y_c(m)$	۰/۰۰۹۰۲۵	۰/۰۱۹۰۴	۰/۰۳۱۵۳	۰/۰۴۰۴۲
۸	y_c/h	۰/۰۹۰۲۵	۰/۱۹۰۴	۰/۳۱۵۳	۰/۴۰۴۲
۹	$H_1(m)$	۰/۰۲۱۳	۰/۰۳۵۶	۰/۰۵۱	۰/۰۶۱۹
۱۰	$\Delta H(m)$	۰/۹۹۲۲۴	۰/۹۹۲۹۵	۰/۹۹۶۳	۰/۹۹۸۷
۱۱	$\Delta H/H_t$ (%) عددی	۹۷/۸۹	۹۶/۵۳	۹۵/۱۳	۹۴/۱۶
۱۲	$\Delta H/H_t$ (%) آزمایشگاهی	۹۸/۶	۹۷/۰۶	۹۵/۳۷	۹۴/۲۶
۱۳	درصد خطا	۰/۷۲	۰/۵۳	۰/۲۴	۰/۱

جدول ۴-۶- محاسبه پارامترهای هیدرولیکی برای سرریز با لبه ۳ سانتی متری در وسط پله

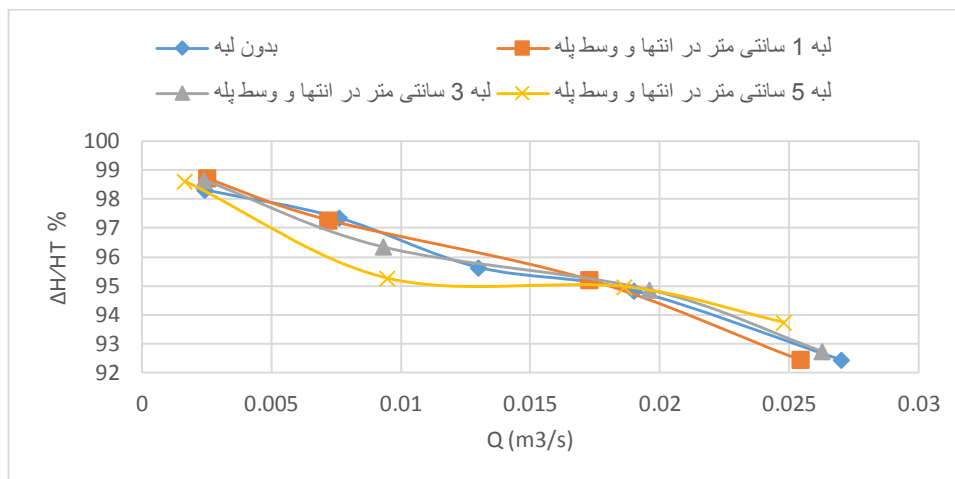
ردیف	شماره مشخصات	دبی ۱	دبی ۲	دبی ۳	دبی ۴
۱	$Q(m^3/s)$	۰/۰۰۲۷۳۸	۰/۰۱۰۲۵۱	۰/۰۱۹۱۸	۰/۰۲۶۳۲۱
۲	$H_t(m)$	۱/۰۱۳۷	۱/۰۳۳۱	۱/۰۵۰۲۳	۱/۰۶۲
۳	$q(m^2/s)$	۰/۰۰۲۷۳۸	۰/۰۱۰۲۵۱	۰/۰۱۹۱۸	۰/۰۲۶۳۲۱
۴	$y_1(m)$	۰/۰۰۴۹	۰/۰۱۶۳	۰/۰۲۴۸	۰/۰۲۹۴
۵	$V_1(m/s)$	۰/۵۵۸	۰/۶۲۸۸	۰/۷۷۳	۰/۸۷۷
۶	F_r	۲/۵۴	۱/۵۷	۱/۵۶۷	۱/۶۳
۷	$y_c(m)$	۰/۰۰۹۱۴۶	۰/۰۲۲۰۵	۰/۰۳۳۴۸	۰/۰۴۱۳
۸	y_c/h	۰/۰۹۱۴۶	۰/۲۲۰۵	۰/۳۳۴۸	۰/۴۱۳
۹	$H_1(m)$	۰/۰۲۰۷	۰/۰۳۶۴	۰/۰۵۵۲	۰/۰۶۸۶
۱۰	$\Delta H(m)$	۰/۹۹۳	۰/۹۹۶۷	۰/۹۹۵۰۳	۰/۹۹۲۶
۱۱	$\Delta H/H_t$ (%) عددی	۹۷/۹۵	۹۶/۴۷	۹۴/۷۴	۹۳/۵۳
۱۲	$\Delta H/H_t$ (%) آزمایشگاهی	۹۸/۳۱	۹۶/۷۳	۹۵	۹۳/۹۰
۱۳	درصد خطا	۰/۲۶	۰/۴۳	۰/۲۷	۰/۳۹

جدول ۴-۷- محاسبه پارامترهای هیدرولیکی برای سرریز با لبه ۵ سانتی متری در وسط پله

ردیف	شماره مشخصات	دبی ۱	دبی ۲	دبی ۳	دبی ۴
۱	$Q(m^3/s)$	۰/۰۰۱۳۵۸	۰/۰۰۹۳۶۲	۰/۰۱۸۲۴	۰/۰۲۵۷۹
۲	$H_t(m)$	۱/۰۰۸۶	۱/۰۳۱۱	۱/۰۴۸۶	۱/۰۶۱۲
۳	$q(m^2/s)$	۰/۰۰۱۳۵۸	۰/۰۰۹۳۶۲	۰/۰۱۸۲۴	۰/۰۲۵۷۹
۴	$y_1(m)$	۰/۰۰۵۸	۰/۰۱۲۹	۰/۰۲۱۴۳	۰/۰۲۹۱
۵	$V_1(m/s)$	۰/۲۳۴	۰/۷۲۵۷	۰/۸۵۱	۰/۸۸۶
۶	F_r	۰/۹۸۳	۲/۰۳۹	۱/۸۵۶	۱/۶۵
۷	$y_c(m)$	۰/۰۰۵۷۳	۰/۰۲۱	۰/۰۳۲۴	۰/۰۴۱
۸	y_c/h	۰/۰۵۷۳	۰/۲۱	۰/۳۲۴	۰/۴۱
۹	$H_1(m)$	۰/۰۰۸۵۹	۰/۰۳۹۷	۰/۰۵۸۳	۰/۰۶۹۱
۱۰	$\Delta H(m)$	۱/۰۰۰۱	۰/۹۹۱۴	۰/۹۹۰۳	۰/۹۹۲۱
۱۱	$\frac{\Delta H}{H_t}(\%)$ عددی	۹۹/۱۵	۹۶/۱۴	۹۴/۴۴	۹۳/۴۸
۱۲	$\frac{\Delta H}{H_t}(\%)$ آزمایشگاهی	۹۹/۱۲	۹۶/۷۱	۹۴/۷۷	۹۳/۹۰
۱۳	درصد خطا	۰/۰۳	۰/۵۸	۰/۳۴	۰/۴۴

۴-۵-۳. لبه در انتها و وسط پله

شکل (۴-۹) تغییرات درصد استهلاک نسبی انرژی جریان عبوری را از روی سرریز در حالتی که لبه‌ها در انتها و وسط پله نصب می‌شوند برای دبی‌های مختلف نشان می‌دهد. با توجه به شکل برای کلیه حالت‌ها با افزایش دبی جریان عبوری از روی سرریز استهلاک انرژی جریان کاهش داشته است، که دلیل آن احتمالاً کاهش عملکرد برآمدگی‌ها بواسطه حرکت جت مانند جریان است. البته از روی شکل می‌توان این استنباط را کرد که بهترین عملکرد در استهلاک انرژی برای پله با لبه ۵ سانتی‌متر بوده که بیشترین استهلاک انرژی نسبی به مقدار ۹۳/۷۴٪ را دارا می‌باشد.



شکل ۴-۹- تغییرات نسبت افت انرژی در برابر جریان در سرریز با لبه در انتها و وسط

در جدول (۴-۸) تا (۴-۱۰) نیز مقادیر پارامترهای مختلف شبیه‌سازی شده ارائه شده و صحت نتایج فوق را تصدیق می‌کنند. با توجه به ابعاد مدل و مقادیر دبی، اصولاً بیشترین تاثیر مربوط به ارتفاع لبه می‌باشد که در واقع سبب چرخش جریان در ناحیه‌ی روی پله شده و استهلاک بیشتر انرژی را به دنبال دارد

جدول ۴-۸. محاسبه پارامترهای هیدرولیکی سرریز با لبه ۱ سانتی‌متر در انتها و وسط پله

ردیف	شماره مشخصات	دبی ۱	دبی ۲	دبی ۳	دبی ۴
۱	$Q(m^3/s)$	۰/۰۰۲۴۷۶	۰/۰۰۷۱۸	۰/۰۱۷۲۵	۰/۰۲۵۴
۲	$H_t(m)$	۱/۰۱۲۸۳	۱/۰۲۶۱	۱/۰۴۶۸	۱/۰۶۰۶
۳	$q(m^2/s)$	۰/۰۰۲۴۷۶	۰/۰۰۷۱۸	۰/۰۱۷۲۵	۰/۰۲۵۴
۴	$y_1(m)$	۰/۰۰۹	۰/۰۱۳۶۴	۰/۰۲۴۳۶	۰/۰۲۴۳
۵	$V_1(m/s)$	۰/۳۷۵۱	۰/۵۲۶۳	۰/۷۰۸۱	۱/۰۴۵
۶	F_r	۰/۹۲۵۸	۱/۴۳۸	۱/۴۴۸	۲/۱۴
۷	$y_c(m)$	۰/۰۰۸۵۵	۰/۰۱۷۳۹	۰/۰۳۱۲	۰/۰۴۰۴
۸	y_c/h	۰/۰۸۵۵	۰/۱۷۳۹	۰/۳۱۲	۰/۴۰۴
۹	$H_1(m)$	۰/۰۱۲۸۵	۰/۰۲۷۷۵	۰/۰۴۹۹۱	۰/۰۷۹۹
۱۰	$\Delta H(m)$	۰/۹۹۹۹۸	۰/۹۹۸۳۵	۰/۹۹۶۸۹	۰/۹۸۰۷
۱۱	$\Delta H/H_t$ (%) عددی	۹۸/۷۳	۹۷/۳۹	۹۵/۳۳	۹۲/۴۶
۱۲	$\Delta H/H_t$ (%) آزمایشگاهی	۹۸/۵۳	۹۷/۴۱	۹۵/۵۲	۹۴/۰۶۸
۱۳	درصد خطا	۰/۲۰	۰/۱۲	۰/۳	۰/۵۹

جدول ۴-۹. محاسبه پارامترهای هیدرولیکی سرریز با لبه ۳ سانتی متری در انتها و وسط پله

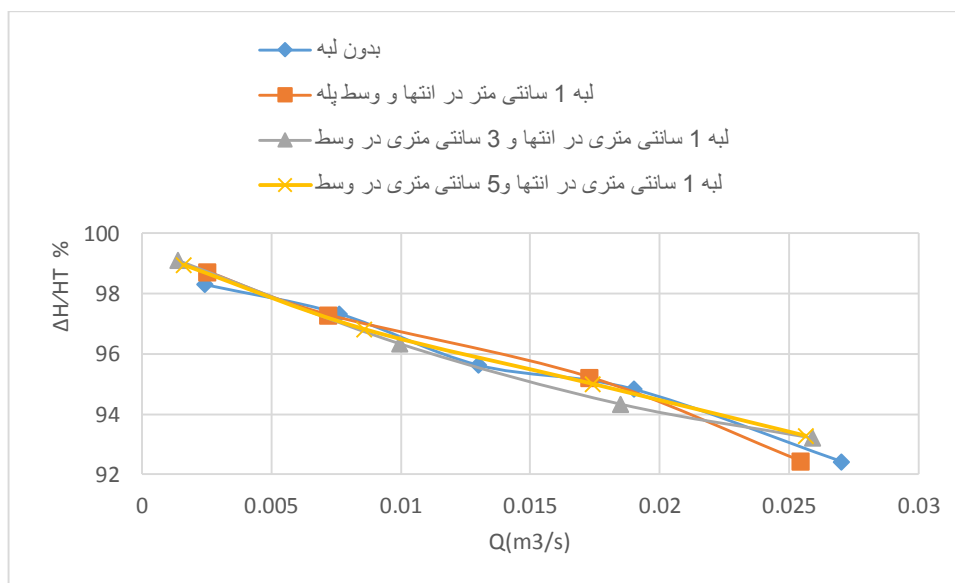
ردیف	شماره مشخصات	دبی ۱	دبی ۲	دبی ۳	دبی ۴
۱	$Q(m^3/s)$	۰/۰۰۲۳۹۱	۰/۰۰۹۳۱	۰/۰۱۹۶	۰/۰۲۶۲۶
۲	$H_t(m)$	۱/۰۱۲۵۳	۱/۰۲۴۶	۱/۰۵۰۹۵	۱/۰۶۱۹۲
۳	$q(m^2/s)$	۰/۰۰۲۳۹۱	۰/۰۰۹۳۱	۰/۰۱۹۶	۰/۰۲۶۲۶
۴	$y_1(m)$	۰/۰۰۶۳	۰/۰۱۳۶	۰/۰۲۶۹۱	۰/۰۲۶۹۱
۵	$V_1(m/s)$	۰/۳۷۹۵	۰/۶۸۴۵	۰/۷۲۸۳	۱/۰۰۰۶
۶	F_r	۱/۵۲۶	۱/۸۷۳	۱/۴۱۷	۱/۹۸
۷	$y_c(m)$	۰/۰۰۸۳۵۵	۰/۰۱۶۴۱	۰/۰۳۳۹۷	۰/۰۴۱۲۸
۸	y_c/h	۰/۰۸۳۵۵	۰/۱۶۴۱	۰/۳۳۹۷	۰/۴۱۲۸
۹	$H_1(m)$	۰/۰۱۳۶	۰/۰۳۷۴۸	۰/۰۵۳۹۴	۰/۰۷۷
۱۰	$\Delta H(m)$	۰/۹۹۸۹۳	۰/۹۸۷۱۲	۰/۹۹۷۰۱	۰/۹۸۴۹۲
۱۱	$\Delta H/H_t$ (%) عددی	۹۸/۶۵	۹۶/۳۴	۹۴/۸۶	۹۲/۷۴
۱۲	$\Delta H/H_t$ (%) آزمایشگاهی	۹۸/۷۳	۹۶/۴۸	۹۴/۹۷	۹۳/۶۳
۱۳	درصد خطا	۰/۰۸	۰/۱۴	۰/۱۱	۰/۹۵

جدول ۴-۱۰. محاسبه پارامترهای هیدرولیکی سرریز با لبه ۵ سانتی متری در انتها و وسط پله

ردیف	شماره مشخصات	دبی ۱	دبی ۲	دبی ۳	دبی ۴
۱	$Q(m^3/s)$	۰/۰۰۱۶۴	۰/۰۰۹۴۷	۰/۰۱۸۶۱	۰/۰۲۴۷۹
۲	$H_t(m)$	۱/۰۰۰۹۸	۱/۰۳۱۳۵	۱/۰۴۹۲	۱/۰۵۹۵۹
۳	$q(m^2/s)$	۰/۰۰۱۶۴	۰/۰۰۹۴۷	۰/۰۱۸۶۱	۰/۰۲۴۷۹
۴	$y_1(m)$	۰/۰۰۳۶۴	۰/۰۱۰۹۸	۰/۰۲۵۴	۰/۰۳۱۳
۵	$V_1(m/s)$	۰/۴۵۱	۰/۸۶۲۴	۰/۷۳۲۶	۰/۷۹۲
۶	F_r	۲/۳۸	۲/۶۲	۱/۴۶۷	۱/۴۲
۷	$y_c(m)$	۰/۰۰۶۵۰۷	۰/۰۲۰۹	۰/۰۳۲۸	۰/۰۳۹۷
۸	y_c/h	۰/۰۶۵۰۷	۰/۲۰۹	۰/۳۲۸	۰/۳۹۷
۹	$H_1(m)$	۰/۰۱۴۰	۰/۰۴۸۸	۰/۰۵۲۷	۰/۰۶۳۲
۱۰	$\Delta H(m)$	۰/۹۹۵۸	۰/۹۸۲۵۵	۰/۹۹۶۵	۰/۹۴۶۶
۱۱	$\Delta H/H_t$ (%) عددی	۹۸/۶۱	۹۵/۲۶	۹۴/۹۷	۹۳/۷۴
۱۲	$\Delta H/H_t$ (%) آزمایشگاهی	۹۹	۹۶/۳۰	۹۵/۳۰	۹۴/۲۵
۱۳	درصد خطا	۰/۳۹	۱/۰۷	۰/۳۴	۰/۵۴

۴-۵-۴- لبه ۱ سانتی متری در انتهای پله ثابت و لبه‌های وسط متغیر

شکل (۴-۱۰) نشان می‌دهد که در کلیه حالت‌ها با افزایش دبی جریان استهلاک انرژی کاهش می‌یابد و همچنین طبق نمودار می‌توان گفت که با افزایش ارتفاع در وسط پله استهلاک انرژی کاهش داشته است و بهترین عملکرد را لبه با ارتفاع ۱ سانتی متر در انتهای پله و ۵ سانتی متری در وسط داشته که با افزایش دبی، مقدار افت انرژی بیشتری داشته است. اصولاً افزایش ارتفاع انتهای پله‌ها، با توجه به تغییر الگوی ریزشی جریان، مقدار استهلاک انرژی را کاهش می‌دهد. اما افزایش ارتفاع لبه‌های میانی در شرایط جریان ریزشی، با توجه به شکل الگوی جریان میزان استهلاک را افزایش می‌دهد.



شکل ۴-۱۰- تغییرات دبی و افت انرژی جریان برای لبه ۱ سانتی متری در انتهای پله ثابت و لبه‌های وسط متغیر

جدول ۴-۱۱- محاسبه پارامترهای هیدرولیکی سرریز پلکانی با لبه ۱ سانتی‌متری در انتهای پله و ۳ سانتی‌متری در وسط

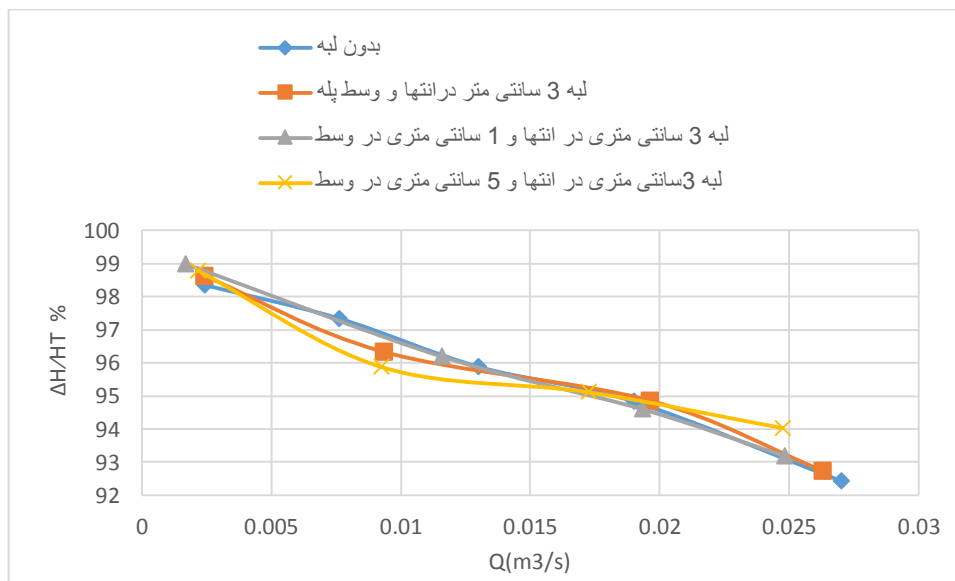
ردیف	شماره مشخصات	دبی ۱	دبی ۲	دبی ۳	دبی ۴
۱	$Q(m^3/s)$	۰/۰۰۱۳۹۲	۰/۰۰۹۹۳	۰/۰۱۸۴۶	۰/۰۲۵۹
۲	$H_t(m)$	۱/۰۰۸۷	۱/۰۳۲۴	۱/۰۴۸۹۶	۱/۰۶۱۴
۳	$q(m^2/s)$	۰/۰۰۱۳۹۲	۰/۰۰۹۹۳	۰/۰۱۸۴۶	۰/۰۲۵۹
۴	$y_1(m)$	۰/۰۰۶۸	۰/۰۱۴۸	۰/۰۲۱۳۹	۰/۰۲۷۸
۵	$V_1(m/s)$	۰/۲۰۴۷	۰/۶۷۰	۰/۸۶۳	۰/۹۳۱۶
۶	F_r	۰/۷۹۲۰	۱/۷۵۸	۱/۸۸۳	۱/۷۸۳
۷	$y_c(m)$	۰/۰۰۵۸۲۶	۰/۰۲۱۶	۰/۰۳۲۶۴	۰/۰۴۰۹
۸	y_c/h	۰/۰۵۸۲۶	۰/۲۱۶	۰/۳۲۶۴	۰/۴۰۹
۹	$H_1(m)$	۰/۰۰۸۹۳	۰/۰۳۷۶	۰/۰۵۹۳۴	۰/۰۷۲۰
۱۰	$\Delta H(m)$	۰/۹۹۹۷۷	۰/۹۹۴۸	۰/۹۸۹۶۳	۰/۹۸۹۹۴
۱۱	$\Delta H/H_t$ (%) عددی	۹۹/۱۱	۹۶/۳۵	۹۴/۳۴	۹۳/۲۱
۱۲	$\Delta H/H_t$ (%) آزمایشگاهی	۹۹/۲۶	۹۶/۶۶	۹۴/۸۸	۹۳/۶۵

جدول ۴-۱۲- محاسبه پارامترهای هیدرولیکی سرریز پلکانی با لبه ۱ سانتی‌متری در انتهای پله و ۵ سانتی‌متری در وسط

ردیف	شماره مشخصات	دبی ۱	دبی ۲	دبی ۳	دبی ۴
۱	$Q(m^3/s)$	۰/۰۰۱۶۰۹	۰/۰۰۸۵۷	۰/۰۱۷۳۹	۰/۰۲۵۶۵
۲	$H_t(m)$	۱/۰۰۹۶	۱/۰۲۹۳۵	۱/۰۴۷۱	۱/۰۶۰۹۶
۳	$q(m^2/s)$	۰/۰۰۱۶۰۹	۰/۰۰۸۵۷	۰/۰۱۷۳۹	۰/۰۲۵۶۵
۴	$y_1(m)$	۰/۰۰۴۸۶	۰/۰۱۴۳۱	۰/۰۲۲۹۴	۰/۰۲۷۷۵
۵	$V_1(m/s)$	۰/۳۳۱	۰/۵۹۸۸	۰/۷۵۸	۰/۹۳۴۳
۶	F_r	۱/۵۱۵	۱/۵۹۸	۱/۵۹۷	۱/۷۷
۷	$y_c(m)$	۰/۰۰۶۴۲	۰/۰۱۹۵۷	۰/۰۳۱۳۷	۰/۰۴۰۶۴
۸	y_c/h	۰/۰۶۴۲	۰/۱۹۵۷	۰/۳۱۳۷	۰/۴۰۶۴
۹	$H_1(m)$	۰/۰۱۰۴۴	۰/۰۳۲۵۸	۰/۰۵۲۲	۰/۰۷۱۲
۱۰	$\Delta H(m)$	۰/۹۹۹۱۶	۰/۹۹۶۷۷	۰/۹۹۴۹	۰/۹۸۹۷۶
۱۱	$\Delta H/H_t$ (%) عددی	۹۸/۹۶	۹۶/۸۳	۹۵/۰۱	۹۳/۲۸
۱۲	$\Delta H/H_t$ (%) آزمایشگاهی	۹۹/۰۵	۹۷/۰۲	۹۵/۲۷	۹۳/۶۷

۴-۵-۵. لبه ۳ سانتی متری در انتهای پله ثابت و لبه‌های دیگر متغیر

شکل (۴-۱۱) نشان می‌دهد که با افزایش دبی در کلیه حالت‌های قرارگیری لبه در پله‌های سرریز، از میزان استهلاک انرژی جریان کاسته می‌شود. همچنین طبق نمودار با افزایش ارتفاع لبه در انتهای پله و نیز افزایش ارتفاع لبه در وسط پله استهلاک انرژی در مقایسه با سایر لبه‌ها افزایش داشته است که لبه با ارتفاع ۳ سانتی متر در انتها و لبه ۵ سانتی متر در وسط بیشترین استهلاک انرژی را داشت.



شکل ۴-۱۱- تغییرات دبی و درصد افت انرژی جریان در سرریز با لبه ۳ سانتی متری در انتها و لبه‌های متغیر در وسط

جدول (۴-۱۳) و (۴-۱۴) نتایج پارامترهای شبیه‌سازی شده را برای لبه‌های انتهایی ۳ سانتی متری و لبه‌های میانی ۱ و ۵ سانتی متری نشان می‌دهد.

جدول ۴-۱۳- محاسبه پارامترهای هیدرولیکی سرریز پلکانی با لبه ۳ سانتی متری در انتها و لبه ۱ سانتی متری در وسط

ردیف	شماره مشخصات	دبی ۱	دبی ۲	دبی ۳	دبی ۴
۱	$Q(m^3/s)$	۰/۰۰۱۶۶	۰/۰۱۱۵۷۸	۰/۰۱۹۳۱	۰/۰۲۴۸۲
۲	$H_t(m)$	۱/۰۰۹۸۴	۱/۰۳۵۹	۱/۰۵۰۴	۱/۰۵۹۷
۳	$q(m^2/s)$	۰/۰۰۱۶۶	۰/۰۱۱۵۷۸	۰/۰۱۹۳۱	۰/۰۲۴۸۲
۴	$y_1(m)$	۰/۰۰۵۹۸	۰/۰۱۷۸۳	۰/۰۲۴۱۸	۰/۰۲۶۱۱
۵	$V_1(m/s)$	۰/۲۷۸۳	۰/۶۴۹۳	۰/۷۹۸۵	۰/۹۵۰۵
۶	F_r	۱/۱۴	۱/۵۵۲	۱/۶۳	۱/۸۷
۷	$y_c(m)$	۰/۰۰۶۵۶۳	۰/۰۲۳۹	۰/۰۳۳۶۳	۰/۰۳۹۸
۸	y_c/h	۰/۰۶۵۶۳	۰/۲۳۹	۰/۳۳۶۳	۰/۳۹۸
۹	$H_1(m)$	۰/۰۰۹۹۲	۰/۰۳۹۳	۰/۰۵۶۶	۰/۰۷۲۱
۱۰	$\Delta H(m)$	۰/۹۹۹۹۲	۰/۹۹۶۶	۰/۹۹۳۸	۰/۹۸۷۶
۱۱	$\Delta H/H_t$ (%) عددی	۹۹/۰۱	۹۶/۲۰	۹۴/۶۱	۹۳/۱۹
۱۲	$\Delta H/H_t$ (%) آزمایشگاهی	۹۸/۹۸	۹۶/۴۵	۹۴/۹۴	۹۳/۷۱

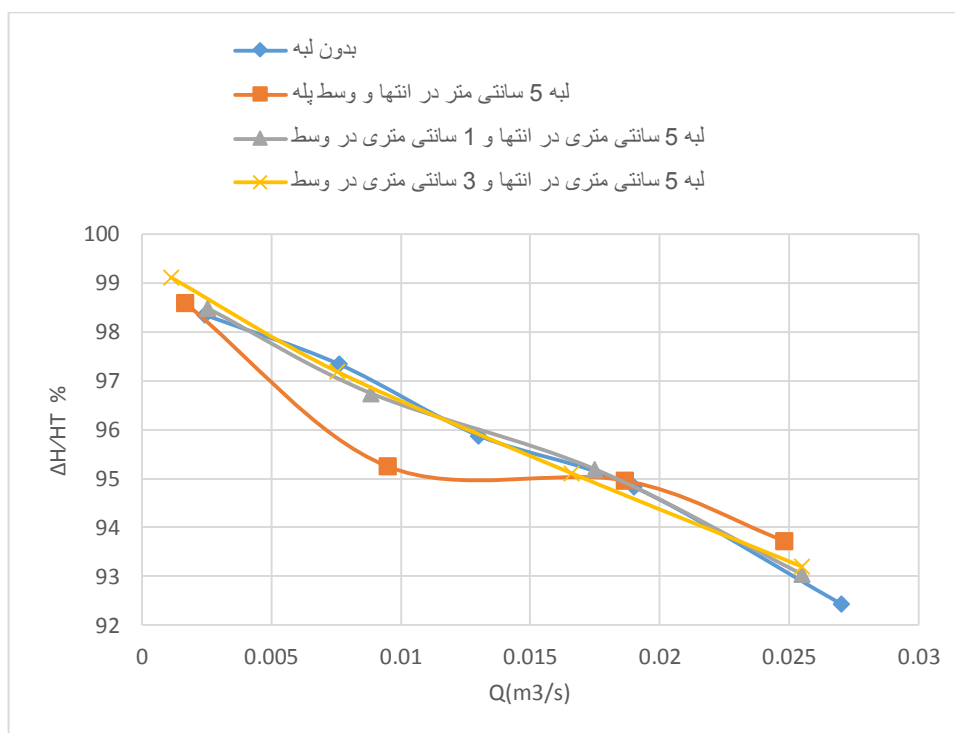
جدول ۴-۱۴- محاسبه پارامترهای هیدرولیکی سرریز پلکانی برای لبه ۳ سانتی متری در انتها و ۵ سانتی متری در وسط

ردیف	شماره مشخصات	دبی ۱	دبی ۲	دبی ۳	دبی ۴
۱	$Q(m^3/s)$	۰/۰۰۲۱۴۱	۰/۰۰۹۲۳۶	۰/۰۱۷۲۵	۰/۰۲۴۷۵
۲	$H_t(m)$	۱/۰۱۱۶۵	۱/۰۳۰۹	۱/۰۴۶۸	۱/۰۵۹۵۴
۳	$q(m^2/s)$	۰/۰۰۲۱۴۱	۰/۰۰۹۲۳۶	۰/۰۱۷۲۵	۰/۰۲۴۷۵
۴	$y_1(m)$	۰/۰۰۶۱	۰/۰۱۱۹۴	۰/۰۲۳۴	۰/۰۳۱۲۸
۵	$V_1(m/s)$	۰/۳۵۰۹	۰/۷۷۳۵	۰/۷۳۷۱	۰/۷۹۱
۶	F_r	۱/۴۳	۲/۲۶	۱/۵۳	۱/۴۲
۷	$y_c(m)$	۰/۰۰۷۷۶۳	۰/۰۲۰۶	۰/۰۳۱۲	۰/۰۳۹۶۹
۸	y_c/h	۰/۰۷۷۶۳	۰/۲۰۶	۰/۳۱۲	۰/۳۹۶۹
۹	$H_1(m)$	۰/۰۱۲۳	۰/۰۴۲۴	۰/۰۵۱	۰/۰۶۳۱
۱۰	$\Delta H(m)$	۰/۹۹۹۳۵	۰/۹۸۸۵	۰/۹۹۵۸	۰/۹۹۶۴۴
۱۱	$\Delta H/H_t$ (%) عددی	۹۸/۷۸	۹۵/۸۸	۹۵/۱۲	۹۴/۰۴
۱۲	$\Delta H/H_t$ (%) آزمایشگاهی	۹۸/۸۴	۹۶/۴۳	۹۵/۳۹	۹۴/۲۳

۴-۵-۶. بررسی تغییرات $\frac{\Delta H}{H_t}$ به ازای دبی‌های مختلف وقتی لبه ۵ سانتی‌متری در انتهای پله

ثابت و لبه‌های متغییر در وسط باشند

شکل (۴-۱۲) نشان می‌دهد که با افزایش دبی جریان، استهلاک انرژی جریان کاهش داشته است. طبق نمودار با افزایش ارتفاع لبه در وسط پله استهلاک انرژی جریان افزایش داشته است و بهترین لبه از لحاظ افت انرژی را لبه ۵ سانتی‌متری در انتها و وسط پله داشته است ولی در حالتی که لبه انتهایی پله دارای ارتفاع کمتری باشد، افزایش ارتفاع لبه در وسط پله تاثیر ناچیزی بر میزان افت انرژی داشت.



شکل ۴-۱۲- تغییرات دبی و درصد افت انرژی جریان با لبه ۵ سانتی‌متری در انتها و لبه‌های متغییر در وسط

نتایج شبیه‌سازی پارامترهای هیدرولیکی برای این مدل‌ها در جداول (۴-۱۵) و (۴-۱۶) گزارش شده است.

جدول ۴-۱۵- محاسبه پارامترهای هیدرولیکی سرریزهای پلکانی با لبه ۵ سانتی‌متر در انتها و ۱ سانتی‌متر در وسط

ردیف	شماره مشخصات	دبی ۱	دبی ۲	دبی ۳	دبی ۴
۱	$Q(m^3/s)$	۰/۰۰۲۵۱۹	۰/۰۰۸۳۳	۰/۰۱۷۴۷	۰/۰۲۵۴۸
۲	$H_1(m)$	۱/۰۱۲۹۶	۱/۰۲۸۸	۱/۰۴۷۲	۱/۰۶۰۷
۳	$q(m^2/s)$	۰/۰۰۲۵۱۹	۰/۰۰۸۳۳	۰/۰۱۷۴۷	۰/۰۲۵۴۸
۴	$y_1(m)$	۰/۰۰۵۸۳	۰/۰۱۳۲	۰/۰۲۴۵۶	۰/۰۲۶۴۱
۵	$V_1(m/s)$	۰/۴۳۲	۰/۶۳۱۲	۰/۷۱۱۳	۰/۹۶۴۷
۶	F_r	۱/۸۰	۱/۷۵	۱/۴۴	۱/۸۹
۷	$y_c(m)$	۰/۰۰۸۶۵	۰/۰۱۹۲۱	۰/۰۳۱۴۶	۰/۰۴۰۴۶
۸	y_c/h	۰/۰۰۸۶۵	۰/۰۱۹۲۱	۰/۳۱۴۶	۰/۴۰۴۶
۹	$H_1(m)$	۰/۰۱۵۳	۰/۰۳۳۵	۰/۰۵۰۳	۰/۰۷۳۸
۱۰	$\Delta H(m)$	۰/۹۹۷۶۶	۰/۹۹۵۳	۰/۹۹۶۹	۰/۹۸۶۹
۱۱	$\Delta H/H_1$ (%) عددی	۹۸/۴۸	۹۶/۷۴	۹۵/۱۹	۹۳/۰۴
۱۲	$\Delta H/H_1$ (%) آزمایشگاهی	۹۸/۶۳	۹۷/۰۹	۹۵/۳۷	۹۴/۰۱۲

جدول ۴-۱۶- محاسبه پارامترهای هیدرولیکی سرریزپلکانی با لبه ۵ سانتی‌متری در انتها و ۳ سانتی‌متری در وسط

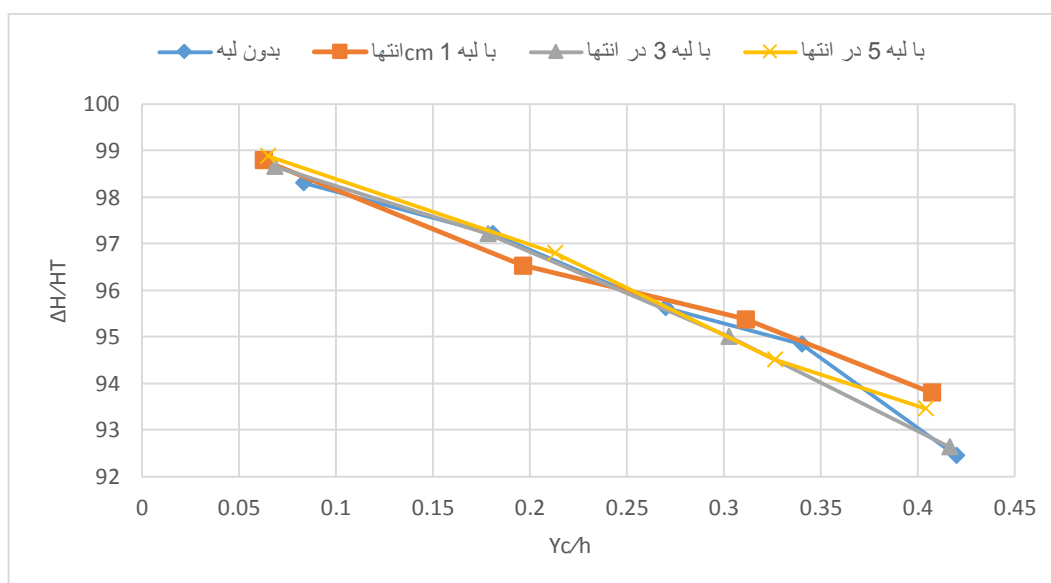
ردیف	شماره مشخصات	دبی ۱	دبی ۲	دبی ۳	دبی ۴
۱	$Q(m^3/s)$	۰/۰۰۱۰۹۹	۰/۰۰۷۵۴	۰/۰۱۶۵۷	۰/۰۲۵۴۸
۲	$H_1(m)$	۱/۰۰۷۴۶۴	۱/۰۲۶۹	۱/۰۴۵۶	۱/۰۶۱
۳	$q(m^2/s)$	۰/۰۰۱۰۹۹	۰/۰۰۷۵۴	۰/۰۱۶۵۷	۰/۰۲۵۴۸
۴	$y_1(m)$	۰/۰۰۳۸	۰/۰۱۳۸۴	۰/۰۲۱۸۶	۰/۰۲۷۱
۵	$V_1(m/s)$	۰/۲۸۹۲	۰/۵۴۴۷	۰/۷۵۸	۰/۹۴۰
۶	F_r	۱/۴۶	۱/۴۷۸	۱/۶۳	۱/۸۲۳
۷	$y_c(m)$	۰/۰۰۴۹۷۶	۰/۰۱۷۹۷	۰/۰۳۰۴	۰/۰۴۰۵
۸	y_c/h	۰/۰۴۹۷۶	۰/۱۷۹۷	۰/۳۰۴	۰/۴۰۵
۹	$H_1(m)$	۰/۰۰۸۶	۰/۰۲۸۹	۰/۰۵۱۱	۰/۰۷۲۱
۱۰	$\Delta H(m)$	۰/۹۹۸۸	۰/۹۹۸	۰/۹۹۴۵	۰/۹۸۸۹
۱۱	$\Delta H/H_1$ (%) عددی	۹۹/۱۱	۹۷/۱۸	۹۵/۱۱	۹۳/۲۰
۱۲	$\Delta H/H_1$ (%) آزمایشگاهی	۹۹/۲۳	۹۷/۳	۹۵/۲۶	۹۳/۴۲

۶-۴. تغییرات $\frac{\Delta H}{H_t}$ نسبت به $\frac{y_c}{h}$

به منظور ارزیابی تاثیر پارامتر بی بعد $\frac{y_c}{h}$ (نسبت عمق بحرانی به ارتفاع پلکان) در میزان استهلاک انرژی نیز از نتایج حاصل از مدل عددی و آزمایشگاهی استفاده گردید که مورد بررسی قرار می‌گیرد.

۶-۴-۱. حالتی که لبه‌ها در انتهای پله قرار گرفتند

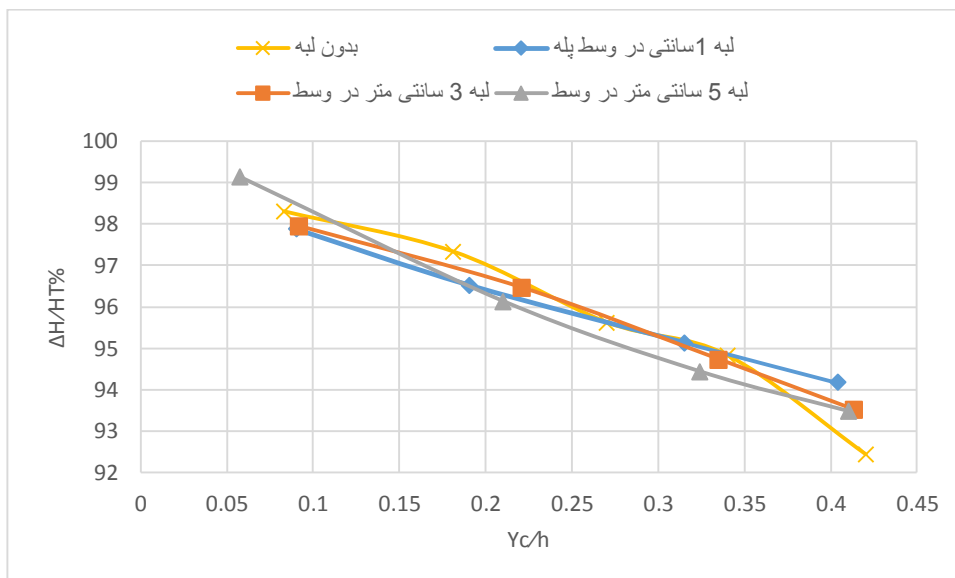
با توجه به شکل (۴-۱۳) مشاهده می‌شود که با افزایش نسبت عمق بحرانی به ارتفاع پله، استهلاک انرژی روند نزولی دارد. افزایش نسبت عمق بحرانی با افزایش دبی اتفاق می‌افتد که نتیجه‌ی تغییر الگوی ریزشی جریان و کاهش استهلاک انرژی است.



شکل ۴-۱۳- تاثیر پارامتر بی بعد $\frac{y_c}{h}$ در افت انرژی با لبه در انتهای پله

۶-۴-۲. حالتی که لبه‌ها در وسط پله قرار گرفتند

شکل (۴-۱۴) نشان می‌دهد که با افزایش نسبت عمق بحرانی به ارتفاع پله، میزان افت نسبی انرژی کاهش می‌یابد. این امر به دلیل افزایش دبی جریان و در نتیجه افزایش ضخامت جریان (عمق جریان) بر روی پلکان‌ها و تغییر الگوی جریان است.

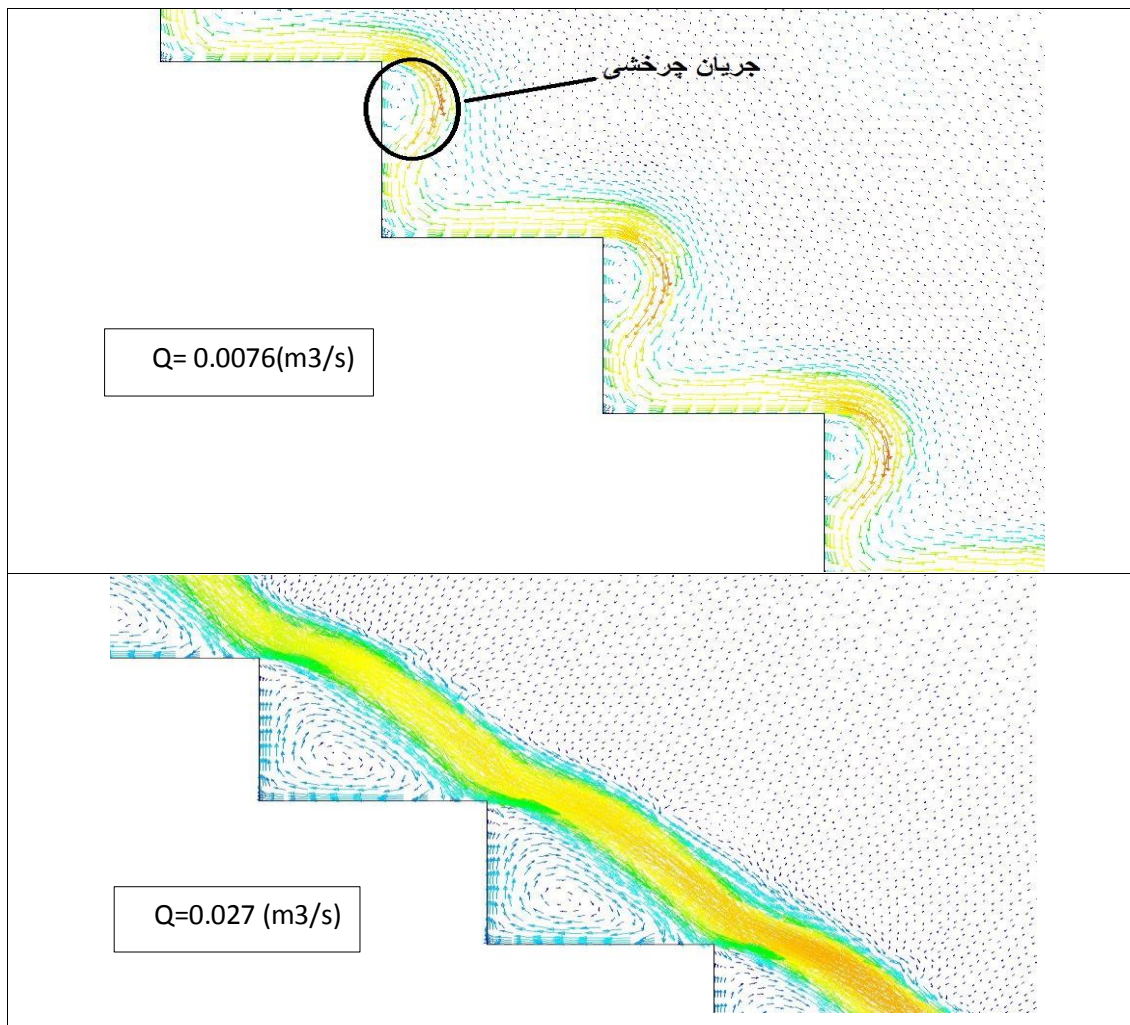


شکل ۴-۱۴- تاثیر پارامتر بی بعد $\frac{\gamma_c}{h}$ در افت انرژی با لیه در وسط پله

۴-۷. بررسی الگوی جریان در روی پله‌ها

۴-۷-۱. تاثیر دبی بر روی الگوی جریان

همان‌طور که در شکل (۴-۱۵) مشخص است در دبی‌های پایین جریان به حالت ریزشی که با افت انرژی بیشتری همراه است در مقایسه با دبی‌های بالا که جریان به صورت جت مانند از روی پله‌ها عبور می‌کند الگوی جریان‌های چرخشی در روی پله‌ها نمایان است.



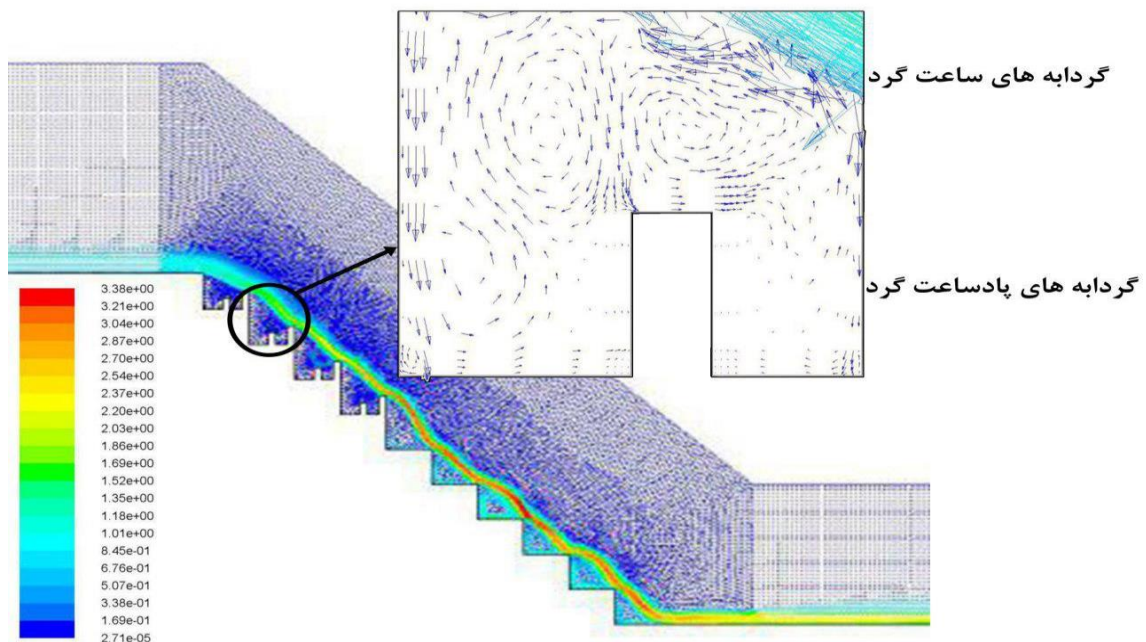
شکل ۴-۱۵- بردار های سرعت در سرریز پلکانی ساده

۴-۷-۲. تاثیر لبه‌دار کردن پله‌ها بر روی الگوی جریان

با توجه به تحلیل عددی به‌طور کلی علت افزایش افت انرژی در سرریز با لبه‌دار کردن آن را می‌توان در دو مطلب بیان نمود:

الف) اضافه شدن لبه به نوک هر پله، در واقع هر پله را در اصطلاح رودخانه‌ای به یک گوداب تبدیل می‌کند که با ایجاد گردابه‌های چرخشی در این گوداب، پراکنش انرژی جریان انجام می‌شود. با شروع جریان بر روی سرریز پلکانی به‌طور معمول گردابه‌های ساعت‌گرد در محل‌های پاشنه پله ایجاد می‌گردند در حالی که با لبه‌دار کردن پله‌ی سرریز گردابه‌های پادساعت‌گرد درون گوداب‌ها هم تشکیل می‌شوند که

در شکل (۴-۱۶) نشان داده شده است. اندازه این گردابه‌ها هم با افزایش ضخامت لبه پله‌ها افزایش می‌یابد. این گردابه‌ها در آزمایشگاه قابل دیدن نیست و با حل معادلات جریان به دست آمده‌اند. گردابه‌های پادساعت‌گرد به دست آمده از حل عددی نقش مؤثری در افزایش افت انرژی سرریز با افزایش ضخامت لبه سرریز دارند بطوریکه با لبه‌دار کردن سرریز این گردابه‌ها به وجود آمده و با افزایش ضخامت لبه سرریز ابعاد این گردابه‌ها بزرگ‌تر می‌شود. با تشکیل گردابه‌های پادساعت‌گرد و برخورد این گردابه‌ها با بخشی از جریان عبوری از روی پله‌ها، استهلاک انرژی بیشتری در مقایسه با پله‌های بدون لبه ایجاد می‌گردد.



شکل ۴-۱۶- نمایش بردارهای سرعت در سرریز پلکانی لبه‌دار برای دبی $0.27 \text{ m}^3/\text{s}$ مترمکعب بر ثانیه

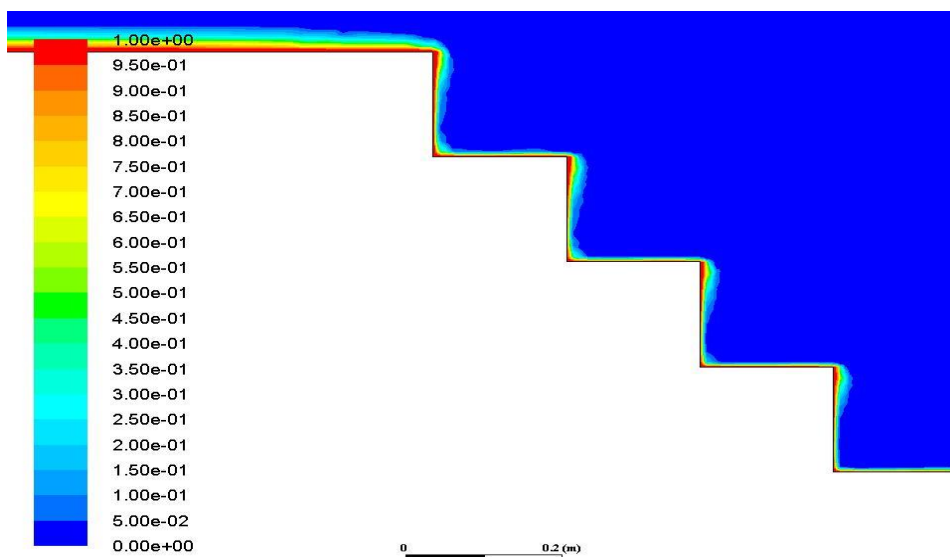
ب) رفتار جریان بر روی سرریز پلکانی توسط محققین مختلف به دودسته تقسیم‌بندی شده است: جریان ریزشی (دبی پایین و جریان کم عمق) و جریان شبه آرام (دبی بالا و جریان عمیق‌تر)، از طرف دیگر همان‌طور که ذکر گردید با لبه‌دار نمودن سرریز در واقع یک گوداب شکل گرفته است. با توجه به دو موضوع مذکور می‌توان نتیجه گرفت با لبه‌دار نمودن سرریز در قیاس با سرریز بدون لبه، ایجاد جریان شبه آرام به تعویق می‌افتد و از طرف دیگر هم با ایجاد جریان‌های توربولانس درون گوداب‌ها هواگیری

جریان زودتر اتفاق می افتد که در شکل (۴-۲۰) می توان مشاهده کرد. در نتیجه درصد افت انرژی افزایش می یابد.

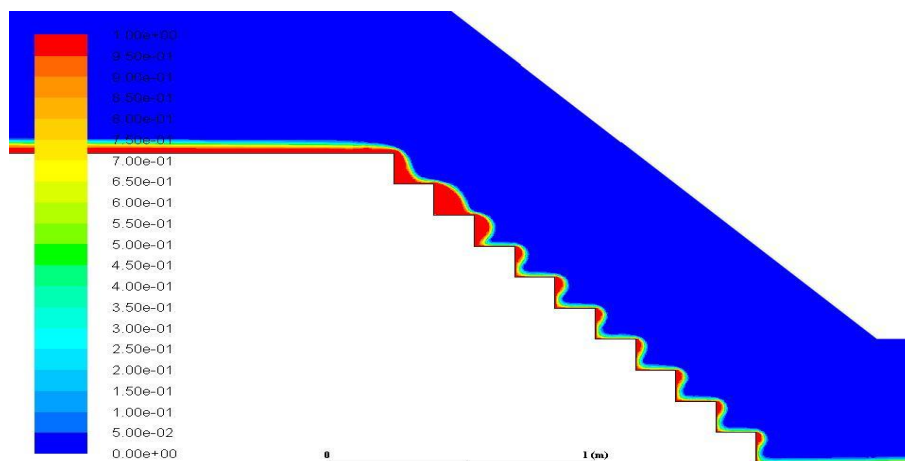
۴-۸. بررسی پروفیل آب در روی پله ها

۴-۸-۱. تاثیر دبی بر پروفیل سطح آب در روی پله ها

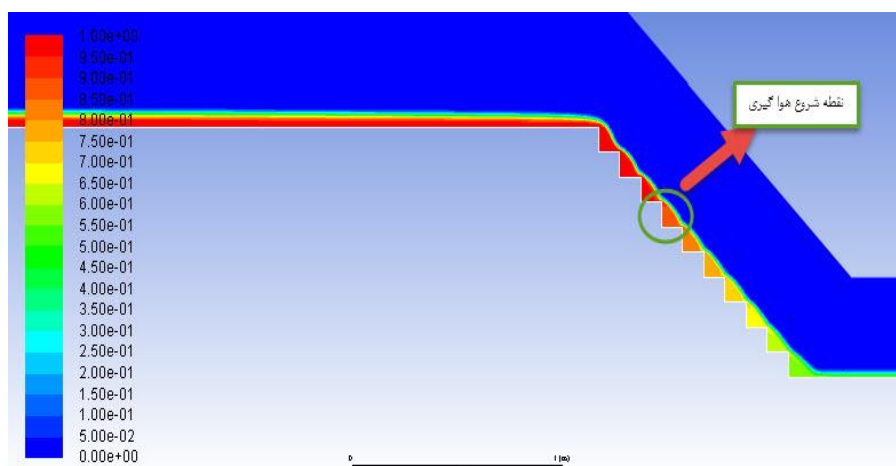
در شکل های (۴-۱۷) تا (۴-۱۹)، نتایج گرافیکی نرم افزار فلونت در محاسبه ی کسر حجمی بر روی سطح سرریز برای دبی های مختلف ارائه شده است. این شکل ها شامل یک نمایش رنگی از کسر حجمی آب در یک مقطع طولی (برش در طول سرریز) می باشد. شایان ذکر است در معادلات کسر حجمی، آب به عنوان فاز یک معرفی گردیده است و در این اشکال به رنگ قرمز و هوا به عنوان فاز دو به رنگ آبی می باشد. مقدار کسر حجمی برای هر نقطه از سیال بین یک (برای سلول های فقط شامل آب) و صفر (برای سلول های فقط شامل هوا) می باشد. در نقطه ای که هوا وارد جریان آب می شود، کانتور تغییر رنگ داده و متناسب با میزان غلظت هوای محلول در آب بین رنگ قرمز تا آبی متغیر می گردد. هرچه میزان غلظت هوای محلول در آب بیشتر شود این تغییر رنگ به سمت رنگ آبی که رنگ اختصاص یافته به فاز هوا می باشد، متمایل می گردد.



شکل ۴-۱۷- پروفیل سطح آب برای سرریز بدون لبه با دبی ۰/۰۰۲۴ متر مکعب بر ثانیه



شکل ۴-۱۸- پروفیل سطح آب برای سرریز پلکانی بدون لبه با دبی ۰/۰۱۳ متر مکعب بر ثانیه

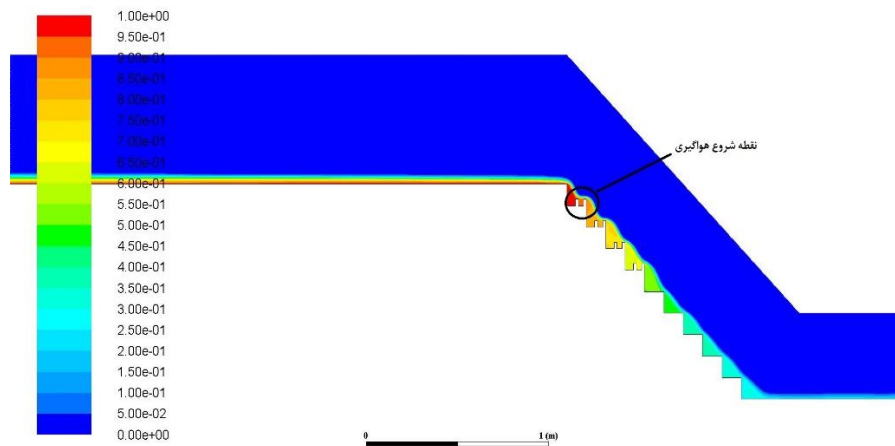


شکل ۴-۱۹- پروفیل سطح آب برای سرریز پلکانی بدون لبه با دبی ۰/۰۲۷ متر مکعب بر ثانیه

همان‌طور که در شکل‌ها مشخص است با افزایش دبی جریان، رژیم جریان از حالت ریزشی، که در آن تیغهی پایینی جریان بر کف پله‌ها مماس است به حالت متلاطم که تیغهی پایینی جریان از پله‌ها فاصله می‌گیرد تبدیل می‌شود که در دبی‌های بالاتر قالب جریان به حالت جت مانند از روی پله‌ها عبور می‌کند.

۴-۸-۲. تاثیر لبه‌دار کردن بر روی پروفیل سطح آب

با بررسی شکل (۴-۲۰) می‌توان مشاهده نمود که با لبه‌دار کردن سرریز، هواگیری جریان زودتر اتفاق می‌افتد و اختلاط هوا با آب باعث خواهد شد درصد افت انرژی به‌طور قابل توجهی افزایش یابد. همچنین با افزایش ضخامت لبه سرریز، هواگیری جریان هم سریع‌تر اتفاق می‌افتد.



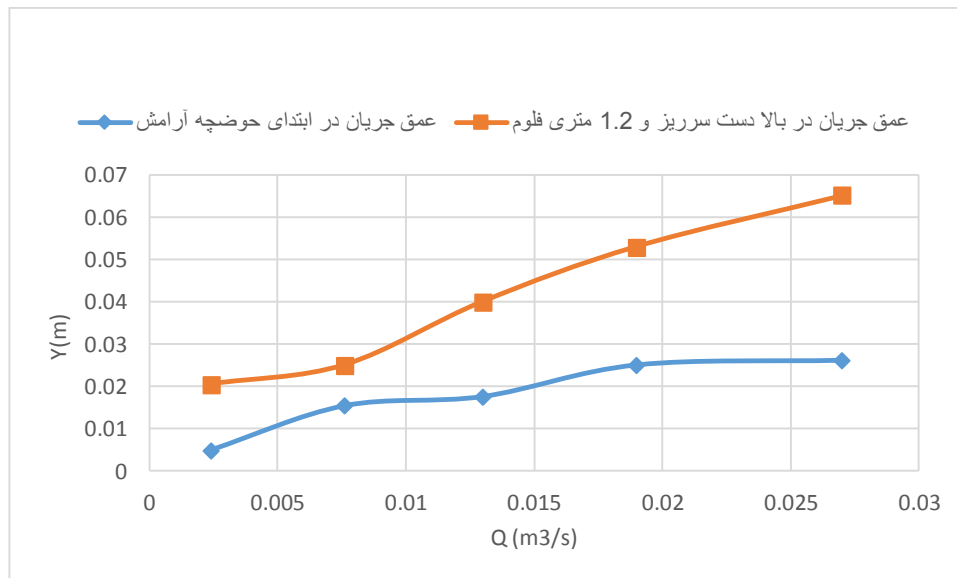
شکل ۴-۲۰- پروفیل سطح آب در سرریز با لبه ۳ سانتی‌متر

۴-۹. تغییرات عمق جریان در ابتدای حوضچه آرامش یا انتهای پله

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 (ابتدای حوضچه آرامش) است. البته روند نسبی کاهش عمق با حرکت جریان در راستای سرریز و افزایش سرعت تا قبل از رسیدن به پایاب قابل پیش بینی می‌باشد.

۴-۹-۱. تاثیر دبي بر روی عمق جریان در ابتدای حوضچه آرامش

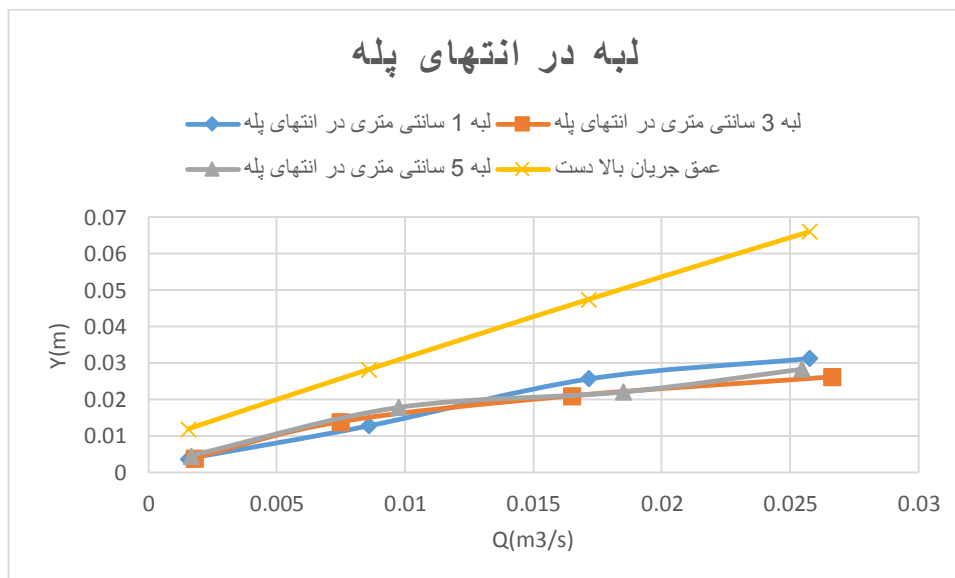
با افزایش دبي جریان عبوری با توجه به ثابت بودن عرض مقطع و شرایط هندسی، افزایش حجم را خواهیم دید که نتیجهی آن، افزایش عمق جریان است. شکل (۴-۲۱) روند تغییرات عمق جریان در ابتدای پله‌ها و ابتدای حوضچه‌ی آرامش را نشان می‌دهد.



شکل ۴-۲۱- تاثیر دبي بر روی عمق جریان پایین دست در سرریز پلکانی ساده

۴-۹-۲. تاثیر لبه دار کردن پله بر روی عمق جریان در ابتدای حوضچه آرامش

در این حالت نیز روند تغییرات عمق جریان مشابه حالت بدون لبه است. می‌توان شکل‌های مربوط به این دو قسمت را با هم ادغام کرد.



شکل ۴-۲۲- تاثیر دبی بر عمق جریان پایین دست در سرریز پلکانی لبه‌دار

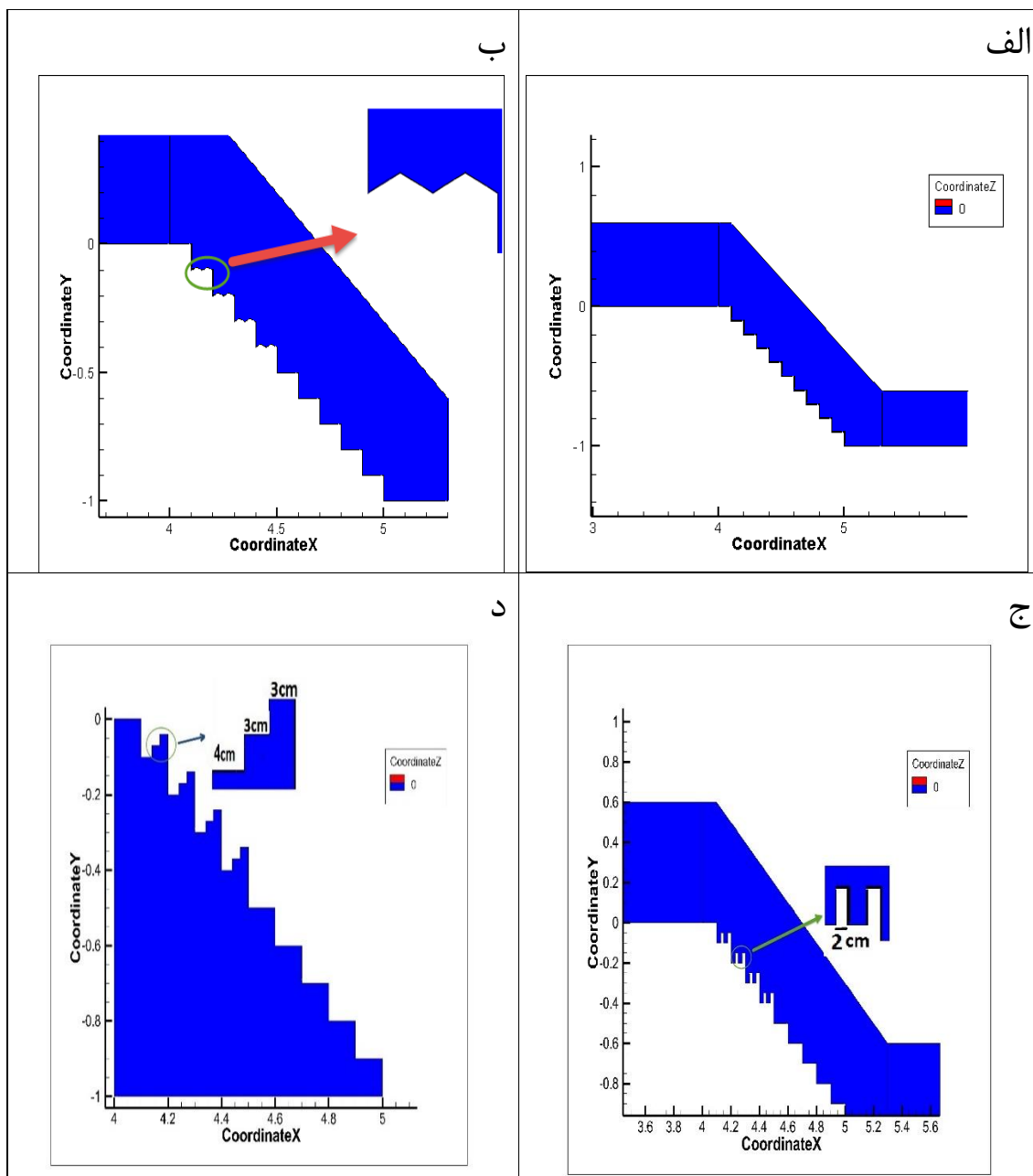
۴-۱۰. نوآوری‌های مربوط به مدل عددی

با توجه به نتایج تحقیق حاضر و قابلیت مدل در شبیه‌سازی، در این قسمت به بررسی راه‌کارهایی دیگر به منظور افزایش استهلاک انرژی پرداخته شد.

۴-۱۰-۱. بررسی تاثیر شیب (منفی؛ مثبت) و همچنین ضخامت لبه پله بر روی مشخصات

جریان

در این تحقیق، چهار حالت سرریزهای پلکانی ساده، لبه‌دار (۱/۵ و ۲ سانتی‌متر)، شیب‌دار و پلکانی معکوس مورد بررسی قرار گرفته است. مدل عددی ساخته شده همانند سرریز پلکانی ساده دارای ۱۰ پله است که پله‌های ۲، ۳، ۴ و ۵ آن دارای اشکال هندسی متفاوتی می‌باشند. این چهار گروه از سرریز پلکانی برای سه دبی ۰/۰۲۴، ۰/۰۱۳ و ۰/۰۲۷ متر مکعب بر ثانیه مورد تحلیل قرار گرفته است.

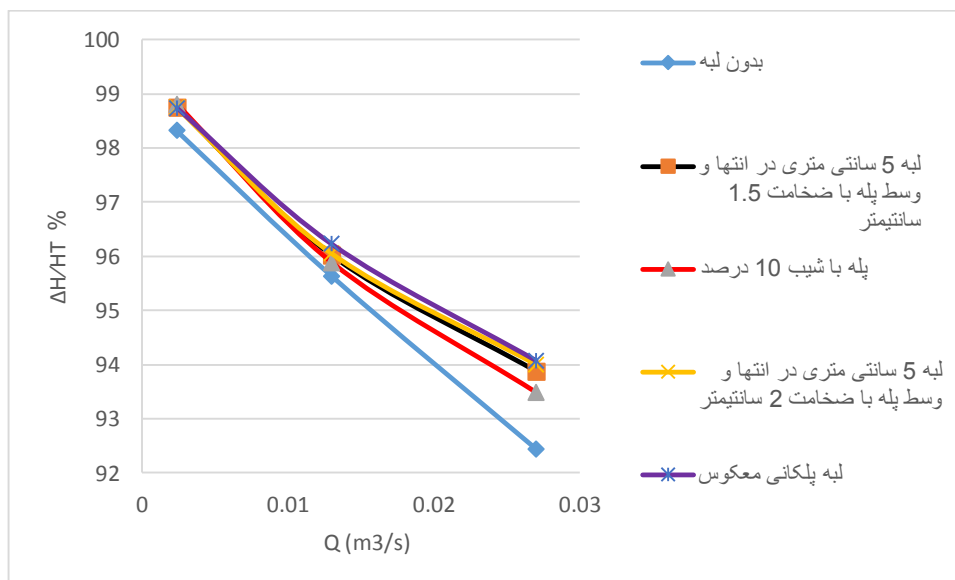


شکل ۴-۲۳- شماتیکی از پله‌ها بر روی سرریزپلکانی (الف) ساده (ب) شیب‌دار (ج) لبه‌دار (د) پلکانی معکوس

۴-۱۰-۱-۱. تاثیر دبی بر روی $\frac{\Delta H}{H_t}$ (استهلاک نسبی انرژی)

در شکل (۴-۲۴) به بررسی تاثیر دبی بر تغییرات استهلاک انرژی در حالت‌های مختلف جانمایی پله پرداخته شده است که نشان می‌دهد با افزایش دبی جریان از میزان استهلاک نسبی انرژی در سرریز پلکانی کاسته می‌شود. همانطور که در شکل مشاهده می‌گردد از نظر جانمایی پله‌ها، تاثیر لبه‌دار کردن

پله و همچنین افزایش ضخامت پله در افزایش استهلاک انرژی در دبی‌های بالا بیشتر بود. تاثیر لبه پلکانی معکوس در استهلاک انرژی نسبت به دیگر هندسه‌ها بیشتر بود و لبه با ضخامت ۱/۵ و ۲ سانتی‌متر و پله شیب‌دار به ترتیب ۹۳/۸۷، ۹۴ و ۹۳/۴۸٪ استهلاک انرژی را داشتند. در دبی‌های پایین با توجه به رژیم جریان ریزشی و تشکیل گرداب، استهلاک انرژی بالا بوده و مقادیر آن برای مدل مختلف تقریباً با هم برابر است، اما در دبی‌های بالا با توجه به تغییر رژیم جریان که از تاثیر در استهلاک انرژی روی پله‌ها می‌کاهد در این شرایط مدل پلکانی با شیب معکوس که علی‌رغم شرایط جریان سبب ایجاد ناحیه گردابی روی پله شده و استهلاک انرژی را نسبت به مدل‌های دیگر افزایش می‌دهد.



شکل ۴-۲۴- بررسی تغییرات دبی و استهلاک انرژی

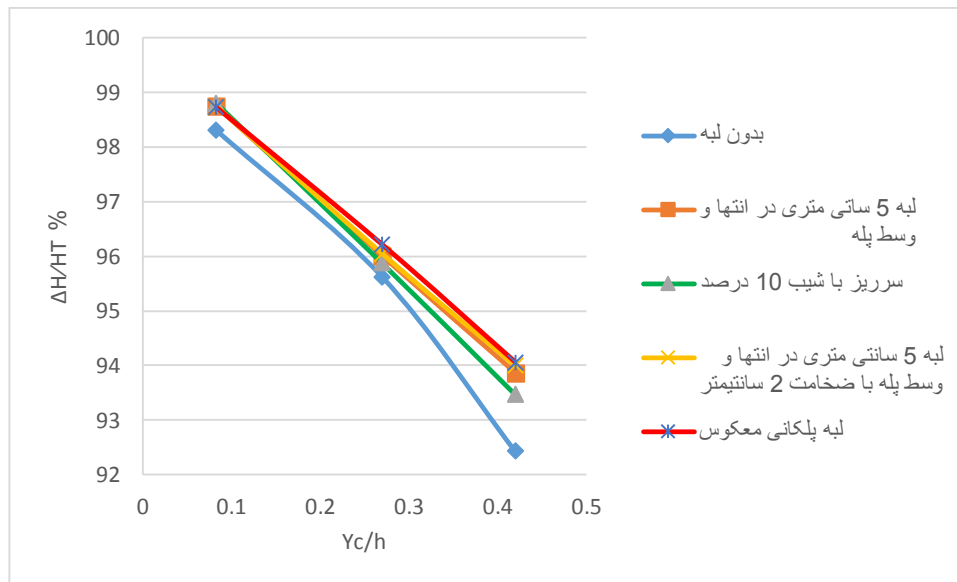
۴-۱۰-۱-۲. تاثیر $\frac{y_c}{h}$ (نسبت بی بعد عمق بحرانی به ارتفاع پله) بر روی $\frac{\Delta H}{H_t}$ (استهلاک نسبی

انرژی)

شکل (۴-۲۵) نشان می‌دهد که با افزایش نسبت بی بعد عمق بحرانی به ارتفاع پله از میزان استهلاک

نسبی انرژی جریان کاسته شده است. همانطور که در این شکل مشاهده می‌شود سرریز پلکانی با پله

معکوس بیشترین استهلاک انرژی را داشته است. در این حالت نیز با توجه به اینکه افزایش دبی با افزایش y_c رابطه‌ی مستقیم دارد، عملکرد مدل‌ها مشابه با حالت قبل است.



شکل ۴-۲۵- تاثیر پارامتر بی بعد $\frac{y_c}{h}$ در افت انرژی

در جدول (۴-۱۷) تا (۴-۲۰) نیز مقادیر پارامترهای مختلف شبیه‌سازی ارائه شده است. با توجه به ابعاد مدل و مقادیر دبی، اصولاً بیشترین تاثیر مربوط به پلکانی معکوس می‌باشد.

جدول ۴-۱۷- محاسبه پارامترهای هیدرولیکی برای لبه ۵ سانتی متری در وسط و انتها

ردیف	شماره مشخصات	۱	۲	۳
۱	$Q (m^3/s)$	۰/۰۰۲۴	۰/۰۱۳	۰/۰۲۷
۲	$H_t (m)$	۱/۰۱۲۵	۱/۰۳۹	۱/۰۶۳
۳	$q (m^2/s)$	۰/۰۰۲۴	۰/۰۱۳	۰/۰۲۷
۴	$y_1 (m)$	۰/۰۰۸۶	۰/۰۲۰۱	۰/۰۳۵۲
۵	$V_1 (m/s)$	۰/۲۸۵۷	۰/۶۴۶۷	۰/۷۶۷
۶	F_r	۰/۹۹۵۲	۱/۴۵	۱/۳۰
۷	$y_c (m)$	۰/۰۰۸۳	۰/۰۲۷	۰/۰۴۲
۸	y_c/h	۰/۰۸۳	۰/۲۷	۰/۴۲
۹	$H_1 (m)$	۰/۰۱۲۵۶	۰/۰۴۱۴	۰/۰۶۵۱
۱۰	$\Delta H (m)$	۰/۹۹۹۹	۰/۹۹۷۶	۰/۹۹۷۹
۱۱	$\Delta H/H_t (\%)$ عددی	۹۸/۷۵	۹۶/۰۱	۹۳/۸۷

جدول ۴-۱۸- محاسبه پارامترهای هیدرولیکی برای پله شیب‌دار

ردیف	شماره مشخصات	دبی ۱	دبی ۲	دبی ۳
۱	$Q(m^3/s)$	۰/۰۰۲۴	۰/۰۱۳	۰/۰۲۷
۲	$H_t(m)$	۱/۰۱۲۵	۱/۰۳۹	۱/۰۶۳
۳	$q(m^2/s)$	۰/۰۰۲۴	۰/۰۱۳	۰/۰۲۷
۴	$y_1(m)$	۰/۰۰۶۸	۰/۰۱۹	۰/۰۳۱۲
۵	$V_1(m/s)$	۰/۳۵۲۹	۰/۶۸۴	۰/۸۶۵
۶	F_r	۱/۳۶	۱/۵۸۷	۱/۵۶
۷	$y_c(m)$	۰/۰۰۸۳	۰/۰۲۷	۰/۰۴۲
۸	y_c/h	۰/۰۸۳	۰/۲۷	۰/۴۲
۹	$H_1(m)$	۰/۰۱۳۱	۰/۰۴۲۸	۰/۰۶۹۳
۱۰	$\Delta H(m)$	۰/۹۹۹۴	۰/۹۹۶۲	۰/۹۹۳۷
۱۱	$\Delta H/H_t$ (%) عددی	۹۸/۸۰	۹۵/۸۸	۹۳/۴۸

جدول ۴-۱۹- محاسبه پارامترهای هیدرولیکی برای لبه ۵ سانتی‌متری با ضخامت ۲ سانتی‌متری در انتها و وسط

ردیف	شماره مشخصات	دبی ۱	دبی ۲	دبی ۳
۱	$Q(m^3/s)$	۰/۰۰۲۴	۰/۰۱۳	۰/۰۲۷
۲	$H_t(m)$	۱/۰۱۲۵	۱/۰۳۹	۱/۰۶۳
۳	$q(m^2/s)$	۰/۰۰۲۴	۰/۰۱۳	۰/۰۲۷
۴	$y_1(m)$	۰/۰۰۹۲	۰/۰۲۰۴	۰/۰۳۷۸
۵	$V_1(m/s)$	۰/۲۶۰۸	۰/۶۳۷۲	۰/۷۱۴
۶	F_r	۰/۸۶۸	۱/۴۲	۱/۱۷
۷	$y_c(m)$	۰/۰۰۸۳	۰/۰۲۷	۰/۰۴۲
۸	y_c/h	۰/۰۸۳	۰/۲۷	۰/۴۲
۹	$H_1(m)$	۰/۰۱۲۶۶	۰/۰۴۱	۰/۰۶۳۷
۱۰	$\Delta H(m)$	۰/۹۹۹۸۴	۰/۹۹۸	۰/۹۹۹۳
۱۱	$\Delta H/H_t$ (%) عددی	۹۸/۷۴	۹۶/۰۵	۹۴

جدول ۴-۲۰- محاسبه پارامترهای هیدرولیکی برای سرریز پلکانی پله معکوس

ردیف	شماره مشخصات	دبی ۱	دبی ۲	دبی ۳
۱	$Q (m^3/s)$	۰/۰۰۲۴	۰/۰۱۳	۰/۰۲۷
۲	$H_t (m)$	۱/۰۱۲۵	۱/۰۳۹	۱/۰۶۳
۳	$q (m^2/s)$	۰/۰۰۲۴	۰/۰۱۳	۰/۰۲۷
۴	$y_1 (m)$	۰/۰۰۹۷	۰/۰۲۳۱	۰/۰۴۲
۵	$V_1 (m/s)$	۰/۲۴۷۴	۰/۵۶۲۷	۰/۶۴۲۸
۶	F_r	۰/۸۰۲	۱/۱۸	۱/۰۰۱
۷	$y_c (m)$	۰/۰۰۸۳	۰/۰۲۷	۰/۰۴۲
۸	y_c/h	۰/۰۸۳	۰/۲۷	۰/۴۲
۹	$H_1 (m)$	۰/۰۱۲۸	۰/۰۳۹۲	۰/۰۶۳
۱۰	$\Delta H (m)$	۰/۹۹۹۷	۰/۹۹۹۸	۱
۱۱	$\Delta H/H_t$ (%) عددی	۹۸/۷۳	۹۶/۲۲	۹۴/۰۷

فصل پنجم

نتایج و پیشنهادات

۵-۱- مقدمه

در این تحقیق مدل سازی عددی افت انرژی جریان در روی سرریزهای پلکانی به صورت دوبعدی انجام شده و نتایج حاصل از آن مورد بررسی قرار گرفت. مدل سازی عددی فلوئنت نشان داد که فاکتورهای انتخاب شده و میزان تخمین آن‌ها برای مدل سازی عددی با تقریب خوبی بدست آمده است. به طوری که استهلاک انرژی نسبی بدست آمده با مدل عددی فلوئنت بسیار نزدیک به استهلاک انرژی نسبی در مدل آزمایشگاهی می باشد.

۵-۲- نتیجه گیری

تحقیق حاضر بر روی سرریز پلکانی ساده و لبه دار انجام گرفت که نتایج حاصل از تحقیق به صورت زیر می باشد.

۱- روند مشابه میان نتایج حاصله از شبیه سازی عددی و داده های موجود (آزمایشگاهی) و وجود اختلاف قابل قبول بین این مقادیر و نیز مشاهده الگوی جریان تشکیل شده بر روی سرریز (حاصل از نرم افزار) نشان می دهد در صورتی که شرایط مرزی و هندسی بطور صحیح به مدل اعمال شود، FLUENT می تواند میدان جریان را بر روی سرریز پلکانی به خوبی مدل نماید.

۲- افزایش دبی باعث کاهش نرخ استهلاک انرژی و همچنین کاهش احتمال وقوع کاویتاسیون می گردد.

۳- ایجاد لبه در انتهای پله سبب افزایش استهلاک انرژی می شود که بیشترین میزان استهلاک انرژی مربوط به پله ۱ سانتی متری در انتهای پله است.

۴- علاوه بر لبه ی انتهایی، لبه ی میانی نیز می تواند سبب افزایش استهلاک انرژی گردد که بهترین نتیجه مربوط به مدل لبه ۱ سانتی متری در انتها و ۵ سانتی متری در وسط است.

۵- استهلاک انرژی جریان از روی سرریزهای پلکانی با لبه در ابتدا و وسط پله و همچنین در حالت بدون لبه با دبی جریان یا عمق بحرانی نسبت عکس دارد.

۵-۳- پیشنهادات

- ۱- بررسی مدل‌های فیزیکی جدید در استهلاک انرژی
- ۲- کاربرد مدل فلونت در ارزیابی مدل‌های جدید در استهلاک انرژی
- ۳- شبیه‌سازی جریان در حوضچه‌ی آرامش به کمک فلونت
- ۴- اجرای مدل فیزیکی پله‌های معکوس و تاثیر آن در استهلاک انرژی
- ۵- اجرای مدل فیزیکی بستر موج‌دار و تاثیر آن در استهلاک انرژی
- ۶- 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 این رو انجام مطالعات همه جانبه در هنگام طراحی سازه توصیه می‌گردد.

۱. افراسیابی، ش.، طباطبایی، س.م.، رستمی راوری، ا.، ۱۳۹۳. ارزیابی تلفات انرژی نسبی در سرریز پلکانی ساده و مثلثی (نصف پله معمولی) در رژیم جریان ریزشی. اولین کنفرانس ملی عمران و توسعه پایدار ایران. مرکز راهکارهای دستیابی به توسعه پایدار. تهران
۲. آصفی، م.، ضیائی، ع.، ۱۳۹۰، شبیه سازی عددی دو بعدی پرش هیدرولیکی روی سطوح شیبدار معکوس همراه با پله در انتها با نرم افزار FLUENT، ششمین کنگره ملی مهندسی عمران، دانشگاه سمنان
۳. یرزگر کلیجی، م.، (۱۳۹۴)، پایان نامه ارشد: "شبیه سازی جریان غلیظ با استفاده از مدل عددی" دانشکده کشاورزی، دانشگاه صنعتی شاهرود
۴. بهشتی، مر.، خسروجردی، ا.، صدقی، ح.، ۱۳۹۴، ارزیابی آزمایشگاهی توزیع پارامترهای آشفتنگی جریان دو فازی آب و هوا بر روی سرریزهای پلکانی، نشریه دانش آب و خاک، جلد ۲۵، شماره ۱، ص ۵۳ تا ۶۵
۵. بهشتی، مر.، خسروجردی، ا.، صدقی، ح.، برقی، س.م.، ۱۳۹۱، توزیع سرعت و آشفتنگی جریان دو فازی آب و هوا در کانال های سیلاب روی پلکانی، نشریه حفاظت منابع آب و خاک، سال دوم، شماره دوم، ص ۴۹ تا ۶۳
۶. جعفری نیا، ر.، موسوی جهرمی، ح.، ۱۳۸۴، ارزیابی تلفات انرژی در سرریزهای پلکانی در رژیم ریزشی و غیر ریزشی. دومین کنفرانس سراسری آبخیزداری و مدیریت منابع آب و خاک. دانشگاه شهید باهنر. کرمان
۷. جوان، م.، صادق فام، س.، اقبال زاده، ا.، ۱۳۹۳، مقایسه روش های اختلاطی و حجم سیال برای شبیه سازی عددی اختلاط آب و هوا در جریان غیرریزشی روی سرریزهای پلکانی، نشریه پژوهش های آب و خاک، جلد بیستم، شماره چهارم، ص ۷۵ تا ۹۷، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان.
۸. حاجی عزیزی، س.، صمدی، آ.، سلماسی، ف.، ۱۳۹۵، بررسی عددی جریان در سرریزهای پلکانی و مقایسه با نتایج آزمایشگاهی، نشریه دانش آب و خاک، جلد ۲۶ شماره ۲/۱ ص ۱۵۵ تا ۱۶۵
۹. حیدرزاده، م.، بنی هاشمی، م.ع.، (۱۳۸۴)، "بررسی تحلیلی از سرریزهای پلکانی در ساخت سدهای کشور"، دومین کنگره ملی مهندسی عمران، تهران
۱۰. دهقانی ثانیچ، م.، (۱۳۹۳)، "شبیه سازی عددی با نرم افزار FLUENT 6.3"
۱۱. رسائی، م.، شیر افروس، علی.، نادری راد، ا.، ۱۳۸۸، حل عددی الگوی جریان عبوری از سرریزهای پلکانی به منظور حداکثر نمودن استهلاك انرژی با استفاده از نرم افزار FLUENT، همایش ملی علوم آب، خاک و مکانیزاسیون کشاورزی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد دزفول
۱۲. رسائی، م.، شیر افروس، ع.، نادری راد، ا.، (۱۳۸۹)، "مقایسه میزان استهلاك انرژی قبل و بعد از پرش هیدرولیکی در سرریزهای پلکانی با استفاده از مدل آزمایشگاهی"، همایش ملی علوم آب، خاک، گیاه و مکانیزاسیون کشاورزی، دزفول
۱۳. رستمی راوری، ا.، ۱۳۸۵، بررسی افت نسبی انرژی در مدل سرریزهای پلکانی، هفتمین سمینار بین المللی مهندسی رودخانه، اهواز، سازمان آب و برق خوزستان، دانشگاه شهید چمران اهواز
۱۴. رستمی، م.، افسوس، م.، مصباحی، ج.، نلخابلو، م.، ۱۳۸۶، بررسی میزان افت انرژی و الگوی جریان بر روی سرریز پلکانی با استفاده از نرم افزار FLUENT، ششمین کنفرانس هیدرولیک ایران، دانشگاه شهرکرد
۱۵. رضائی، م.ج.، طالب بیدختی، ن.، ۱۳۹۰، مدل سازی عددی و بررسی تاثیرات مقیاس بر روی جریان دو فازی انواع سرریزهای پلکانی، ششمین کنگره ملی مهندسی عمران، دانشگاه سمنان

۱۶. رفیع وحید، م.ص، جلال‌الدینی کرکی، س.م، جعفری نیا، ر، شیرازیان، س، ۱۳۹۰، مقایسه تاثیر لبه دار کردن سرریز پلکانی با سرریز بدون لبه در پراکنش انرژی با استفاده از مدل عددی FLOW3D، پنجمین کنفرانس سراسری آبخیز داری و مدیریت منابع آب و خاک کشور، کرمان، انجمن مهندسی آبیاری و آب ایران
۱۷. سلماسی، ف، بینا، م، موسوی، ح، ۱۳۸۲، بررسی آزمایشگاهی افت انرژی جریان از روی سرریزهای پلکانی، ششمین کنفرانس بین‌المللی مهندسی عمران، اصفهان، دانشگاه صنعتی اصفهان
۱۸. سوری، ن، مجتهدی، ع، نورانی، و، ۱۳۹۳، ارزیابی الگوی جریان عبوری بر روی سرریز پلکانی با استفاده از مدل فیزیکی، سیزدهمین کنفرانس هیدرولیک ایران، دانشگاه تبریز
۱۹. شجاع، ف، سلماسی، ف، فرسادی زاده، د، ناظمی، ام، اشرف صدرالدینی، ع، ۱۳۹۱، طراحی بهینه سرریزهای پلکانی جهت حداکثر سازی استهلاك انرژی با استفاده از الگوریتم ژنتیک، **نشریه دانش آب و خاک**، جلد شماره ۲۲ شماره ۴، ص ۷۰ تا ۸۳
۲۰. شجاعیان، م.ر، بررسی مدل عددی دو فازی افت انرژی بر روی سرریزهای پلکانی، همایش ملی مهندسی عمران و توسعه پایدار، استهبان، دانشگاه آزاد اسلامی واحد استهبان
۲۱. شفیعی پور، و، (۱۳۹۲)، پایان نامه ارشد: "بررسی آزمایشگاهی افت انرژی در سرریزهای پلکانی لبه‌دار و بدون لبه"، دانشکده کشاورزی، دانشگاه صنعتی شاهرود.

۲۲. صدریان زاده، م، محمودیان شوشتری، م، فتحی، ا، ۱۳۹۳، مدل سازی سه بعدی جریان دوفازی آب- هوا در سرریزهای پلکانی در جریان غیرریشی با مدل عددی فلوئنت و مقایسه با نتایج آزمایشگاهی، پانزدهمین کنفرانس دانشجویان عمران سراسر کشور، دانشگاه ارومیه
۲۳. صفری، آ، ۱۳۹۳، بررسی استهلاك انرژی در سرریز پلکانی با ترکیب حوضچه آرامش_ پلکان با استفاده از مدل عددی FLUENT، همایش ملی مهندسی عمران کاربردی و دستاوردهای نوین
۲۴. صفریان، م، سعید پناه، ا، توانا، م، ۱۳۹۴، ارزیابی دبی عبوری و بررسی میزان افت انرژی در مدخل خروجی از سرریزهای نیلوفری ساده و پلکانی در حالت کنترل روزنه، دهمین کنگره بین‌المللی مهندسی عمران، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تبریز
۲۵. طاهر شمسی، ا، مجدزاده طباطبائی، م.ر، جمعه‌گی، ع، ۱۳۸۸، بررسی تاثیر لبه دار کردن سرریزهای پلکانی در پراکنش انرژی سرریز با روش عددی، هشتمین کنفرانس هیدرولیک ایران، دانشگاه تهران
۲۶. عزیزیان، ا، صمدی، ا، آغاز، م، (۱۳۹۳)، "آموزش کاربردی مدلسازی جریان و رسوب در

HEC-RAS

۲۷. عطار زاده، ع، زرانی، ا، شانه ساز زاده، ا، ۱۳۹۱، وضعیت جریان در محل تغییر شیب ناگهانی سرریزها، **مجله علمی_ پژوهشی عمران مدرس**، دوره دوازدهم، شماره ۱، بهار ۱۳۹۱، ص ۱۰۷ تا ۱۳۴
۲۸. عنایتی چادگانی، آ، خسروجردی، ا، ۱۳۹۱، آنالیز هیدرولیک جریان بر روی سرریز پلکانی با استفاده از نرم افزار FLOW3D، نهمین سمینار بین‌المللی مهندسی رودخانه، دانشگاه شهید چمران، اهواز
۲۹. فتحی، ا، بینا، م، موسوی جهرمی، ح، (۱۳۸۸)، "بررسی تاثیر شیب تنداب پایین دست تاج بر محل هواگیری طبیعی در جریان غیرریشی در سرریز پلکانی"، **نشریه آب و خاک (علوم و صنایع کشاورزی)**، شماره ۳، ص ۱۵۶ تا ۱۶۷
۳۰. فدائی کرمانی، ا، بارانی، غ، ۱۳۹۰، کاهش خطر پدیده کلویتاسیون در سرریز سدها با کنترل شاخص کلویتاسیون، اولین کنفرانس ملی عمران و توسعه، زیبا کنار، رشت، دانشگاه آزاد اسلامی واحد لشت نشا
۳۱. فولادی پناه، م، جعفری نیا، ر، (۱۳۹۰)، "تاثیر شیب معکوس پله‌ها بر روی افت انرژی در سرریز پلکانی"،

- اولین کنفرانس بین المللی و سومین کنفرانس ملی سد و نیروگاه‌های برق آبی، تهران
۳۲. کاویانپور، مر.، معصومی، حر.، ۱۳۸۶، بررسی افت کلی انرژی در سرریزهای پلکانی، ششمین کنفرانس هیدرولیک ایران، دانشگاه شهرکرد
۳۳. کشاورزبان، م.، نادری راد، ا.، شاملو، ج.، (۱۳۹۱)، "بررسی عددی احتمال کاویتاسیون در انواع سرریزهای پلکانی"، دومین کنفرانس ملی سازه- زلزله- ژئوتکنیک، مازندران
۳۴. گلزار، ا.، قائینی حصاروئی، م.، ۱۳۹۲، شبیه سازی دو بعدی جریان دو حالتی بر روی سرریزهای پلکانی، **مجله مهندسی منابع آب**، سال ششم، تابستان ۱۳۹۲، ص ۷۹-۸۸
۳۵. مرتضوی، س.ا.، سجادی، س.م.، نظری، س.، ۱۳۹۲، بررسی تاثیر شیب در استهلاک انرژی سرریز پلکانی به کمک نرم افزار FLUENT، هفتمین کنگره ملی مهندسی عمران، دانشکده مهندسی شهید نیکبخت، دانشگاه سیستان و بلوچستان، زاهدان
۳۶. مرتضوی، س.ا.، سجادی، س.م.، نظری، س.، ۱۳۹۲، بررسی تاثیر نسبت عمق بحرانی به ارتفاع پله در استهلاک انرژی سرریز پلکانی به کمک نرم افزار FLUENT، هفتمین کنگره ملی مهندسی عمران، دانشکده مهندسی شهید نیکبخت، دانشگاه سیستان و بلوچستان، زاهدان
۳۷. مرتضوی، س.ا.، سجادی، س.م.، نظری، س.، اصغری پری، س.ا.، ۱۳۹۱، بررسی تاثیر دبی جریان بر استهلاک انرژی در سرریزهای پلکانی با استفاده از مدل ریاضی، نهمین سمینار بین المللی مهندسی رودخانه، دانشگاه شهید چمران اهواز
۳۸. مرتضوی، س.ا.، سجادی، س.م.، نظری، س.، مومن، م.، ۱۳۹۲، بررسی تاثیر تعداد پله در استهلاک انرژی سرریز پلکانی به کمک نرم افزار FLUENT، هفتمین کنگره ملی مهندسی عمران، دانشکده مهندسی شهید نیکبخت، دانشگاه سیستان و بلوچستان، زاهدان
۳۹. مروتی خ، سوری ن، اقبال زاده، سوری ص، ۱۳۹۵، بررسی ارتفاع لبه و حفره‌های آبرو روی الگوی جریان عبوری در سرریز پلکانی، دومین کنفرانس بین المللی یافته‌های نوین پژوهشی در مهندسی عمران، معماری و مدیریت شهری، تهران، دانشگاه جامع علمی کاربردی
۴۰. معیری، م.، حسین زاده دلیر، ع.، سلماسی، ف.، فرسادی زاده، د.، اشرف صدرالدینی، س.، ۱۳۹۲، شبیه سازی دوبعدی جریان در سرریزهای پلکانی با استفاده از مدل های آشفتگی و مقایسه نتایج با مدل فیزیکی، **نشریه دانش آب و خاک**، جلد ۲۳ شماره ۱، ص ۱ تا ۱۴
۴۱. مقدم، ا.، کمان بدست، اع.، ۱۳۹۲، شبیه سازی هندسه سرریز پلکانی سد تنظیمی آریوبرزن با استفاده از نرم‌افزار FLUENT، همایش ملی مهندسی و مدیریت کشاورزی، محیط زیست و منابع طبیعی پایدار، دانشکده شهید مفتاح، همدان
۴۲. منصوری، ع.، پیرستانی، م.، خضرائی علیزاده، ک.، ۱۳۸۹، بررسی استهلاک انرژی بر روی سرریزهای پلکانی لبه‌دار با استفاده از مدل عددی فلوئنت، نهمین کنفرانس هیدرولیک ایران، دانشگاه تربیت مدرس
۴۳. منصوری، ع.، میرزایی، س.ا.، ظهیر وند، ع.، ۱۳۹۲، آنالیز جریان بر روی سرریز پلکانی سد سیاه بیشه بالا توسط مدل ریاضی FLOW3D، هفتمین کنگره ملی مهندسی عمران، دانشکده مهندسی شهید نیکبخت، دانشگاه سیستان و بلوچستان، زاهدان
۴۴. نادری راد، ا.، طالب بیدختی، ن.، نیک سرشت، ا.، ۱۳۸۸، بررسی استهلاک انرژی در انواع سرریز پلکانی ساده شیب‌دار و لبه دار با استفاده از مدل عددی، **فصلنامه مهندسی عمران و محیط زیست دانشگاه تبریز**
۴۵. ناعمی، ع.، خسروجردی، ا.، شهریاری، م.، ۱۳۹۳، بررسی استهلاک انرژی در سرریز پلکانی با استفاده از شبیه سازی عددی جریان دو فازی آب-هوا، هشتمین کنگره ملی مهندسی عمران، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل

۴۶. ورجاوند، پ.، خسروی نیا، پ.، سلماسی، ف.، ۱۳۸۷، بررسی استهلاک انرژی در سرریز پلکانی با استفاده از مدل عددی FLUENT، چهارمین کنگره ملی مهندسی عمران، دانشگاه تهران

۴۷. یزدی، ج.، سرکرده، ح.، خدائشناس، س. ر.، ۱۳۸۸، شبیه‌سازی سه بعدی جریان بر روی سرریزهای پلکانی، هشتمین کنگره بین‌المللی مهندسی عمران، دانشگاه شیراز

48. Al-shukur A. and Al-khalaf S. Ishraq M. Al-sharifi A.(2014)" Flow Characteristics and Energy Dissipation Losses in Different Configurations of Steps of Stepped Spillway" **journal of Innovative Research Science.**, pp8823-8832
49. Anant I. Dhattrak, Sandip p.Tatewar.(2014)" Air Entrainment and Pressure Fields over Stepped spillway in Skimming Flow Regime" **Journal of Power and Energy Engineering**, pp 53-57
50. Chamani M.R. and Rajaratnam N. (1994) "Jet Flow on Stepped Spillways" **J. Hydr. Engrg.**, 120, 2, pp 254-259.
51. Chamani M.R. and Rajaratnam N. (1999) " Characteristics of skimming flow over stepped spillways" **J. Hydr. Engrg.**, 125, 4, PP 361-368.
52. Chamani M.R. and Rajaratnam N. (1999) "Onset of Skimming Flow on Stepped Spillway" **J. Hydr. Engrg.**, 125, pp 969-971.
53. Chanson H. (1994a) "Comparison of energy dissipation between nappe and skimming flow regimes on stepped chutes" **J. Hydr. Res.**, 32, 2, pp 213-218.
54. Chanson H. (2000) "Forum article, Hydraulic of Stepped Spillways : Current Status" **J. Hydr. Engrg.**, 126, pp 636-637.
55. Chanson H. and Toombes L. (2001) "Experimental Investigation of Entrainment in Transition and Skimming Flows down a Stepped Chute Application to Embankment Overflow Stepped Spillways" REPORT NO.CE158, Dept of civil Engineering.
56. Chanson H. and Toombes L. (2002) "Energy Dissipation and Air Entrainment in Stepped Storm Waterway: Experimental Study" **ASCE.**, pp 305-315.
57. Chinnarasri Ch. (2002) "Assessing Flow Resistance of Skimming Flow on the Stepped Spillways" **Journal of Dam Engineering.**, 7, 7, pp 303-321.
58. Khatsuria. R.M. (2005) "Hydraulics of Spillways and Energy Dissipators" Civil and Environmental Engineering; Dept of civil Engineering
59. Ohtsu I. Yasuda Y. and Takahashi M. (2004) "Flow Characteristics of

- Skimming Flows in Stepped Channels" **J. Hydr. Engrg.**, 130, pp 860-869.
60. Rajaratnam N. (1990) "Skimming Flow in Stepped Spillway" **J. Hydr. Engrg.**, 116, pp 587-591.
61. Rassaei M , and Rahbar S.(2014)." Numerical flow model stepped spillways in order to maximize energy dissipation using FLUENT software". **IOSR Jornal of Engineering**. Pp 17-25
62. Rezaei M.J. and Talebbeydokhti. N.(2012)" Numerical Investigation OF Energy Dissipation over various steeped spillway" International congress on civil engineerivng
63. Safari A. and Alibeygi A.(2015)" A Survey on dissipation energy in a stepped spillway combined with stilling basin- step using Fluent numerical model. Water engineering conference & exhibition .

Abstract

Stepped spillway is considered as an important structure in energy dissipating along chute dam engineers. In order to investigate energy loss, a stepped spillway was modeled in two situations non-edged step and edged step with 1.5 cm thickness and 1, 3, 5 cm height. It was simulated by two-dimensional fluent software. Simulation of the two-phase flow carried out by pattern of open channel fluid volume and flow was simulated by $k - \epsilon$ turbulence RNG model. Results of numerical model showed good agreement with experiment results. Results showed that in two situations, non-edged step and edged step as increasing of discharge, relative energy loss decreased. Also energy loss was more in the case of edged steps than non-edged steps. In the case of installation edged at first end at mid of the step separately on edged with 1 cm height was considered as the proper one. Energy dissipation for 1 cm height edge at the mid of the step was about 94.16% which compared to 1 cm height edge at the end of the step showed 1.86% increase related to non-edged step. When the edges at the same time installed at the first and at the middle of edge with 5 cm showed the best results. In situation which edged simultaneously installed at the first and mid of the step the best model was, edge with 3 cm height at the end and 5 cm height the mid end compared to other models energy loss was about 94.04% which increased energy dissipation 1.73% related to non-edged model. In the case that the first edge was constant and the middle edge was changeable as increasing of edge height at the middle of the edge, energy loss was increased.

Keywords: Stepped Spillway, Fluent Numerical Modeling, Two-phase Flow, Energy Dissipation, Nappe Flow Regime



Shahrood University of Technology

Faculty of Agriculture

M.Sc. Thesis in Water Structures Engineering

**Numerical investigation of energy dissipation in stepped spillways with
FLUENT and HEC-RAS models**

By: Serajaddin Tatar

Supervisor:

Dr. Khalil Azhdary

Advisers:

Dr. Seied Hosein Hoseini

Dr. Zahra Ganji Norouzi

June 2017