



دانشکده کشاورزی

گروه آب و خاک

بررسی آزمایشگاهی افت انرژی در سرریزهای پلکانی لبه‌دار و بدون لبه

دانشجو : وحیده شفیعی پور

اساتید راهنما :

دکتر خلیل اژدری

دکتر صمد امامقلی زاده

استاد مشاور :

دکتر فرزین سلماسی

پایان نامه ارشد جهت اخذ درجه کارشناسی ارشد

بهمن ۱۳۹۲

دانشگاه صنعتی شاهرود

دانشکده : کشاورزی

گروه : آب و خاک

پایان نامه کارشناسی ارشد خانم وحیده شفیعی پور

تحت عنوان: بررسی آزمایشگاهی افت انرژی در سرریزهای پلکانی لبه دار و بدون لبه

در تاریخ ۱۳۹۲/۱۱/۲۶ توسط کمیته تخصصی زیر جهت اخذ مدرک کارشناسی ارشد مورد ارزیابی و با درجه عالی مورد پذیرش قرار گرفت.

امضاء	اساتید مشاور	امضاء	اساتید راهنما
	نام و نام خانوادگی :		نام و نام خانوادگی : خلیل اژدری
	فرزین سلماسی		نام و نام خانوادگی : صمد امامقلی زاده

امضاء	نماینده تحصیلات تکمیلی	امضاء	اساتید داور
	نام و نام خانوادگی :		نام و نام خانوادگی : زهرا گنجی نوروزی
	علی عباسپور		نام و نام خانوادگی : مهدی دلقندی

تقدیم به

ماحصل آموخته هایم را تقدیم می کنم به آنان که مهر آسمانی شان
آرام بخش آلام زمینی ام است
به استوارترین تکیه گاهم، دستان پرمهر پدرم
به سبزترین نگاه زندکیم، چشمان سبز مادرم
که هرچه آموختم در مکتب عشق شما آموختم و هرچه بکوشم قطره ای از
دریای بی کران مهربانیتان را سپاس نتوانم بگویم.
امروز هستی ام به امید شماست و فردا کلید باغ بهشتی رضای شما
ره آوردی گران سنگ تر از این ارزان نداشتم تا به خاک پایتان نثار کنم،
باشد که حاصل تلاشم نسیم گونه غبار خستگیان را بزداید.

بوسه بر دستان پرمهرتان ...

تشکر و قدردانی

با تشکر و سپاس از استادان راهنمای اینجانب

جناب آقایان **دکتر فلیح اژدری** و **دکتر صمد امامقلی زاده** که از منظر پر

فیض تدریسهشان ، بهره‌ها برده‌ام ...

و با امتنان بیکران از مساعدت‌های بی‌شائبه استاد مشاورم

جناب آقای **دکتر فرزین سلماسی**، عضو هیئت علمی دانشگاه تبریز،

که همواره از همکاری و مشورت‌های ایشان بهره بردم، اعلام می‌کنم ...

و با تشکر خالصانه خدمت

پدر و مادر عزیزم و همه کسانی که به نوعی مرا در به انجام رساندن این

مهم یاری نموده اند.

این تمام چیزی است که می توانستیم، نه تمام چیزی که می

فواستیم.

"دکتر علی شریعتی"

تعهد نامه

اینجانب وحیده شفیعی پور دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته مهندسی سازه های آبی دانشکده کشاورزی دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان نامه بررسی آزمایشگاهی افت انرژی در سرریزهای پلکانی لبه دار و بدون لبه تحت راهنمایی دکتر خلیل اژدری متعهد می شوم .

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

تاریخ ۱۳۹۲/۱۱/۲۶

امضای دانشجو

مالکیت نتایج و حق نشر

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

چکیده:

سرریزهای پلکانی تاریخی چند هزار ساله دارند که معمولاً در سدهای مخزنی به منظور رهاسازی ایمن سیلاب‌ها به کار می‌روند. امروزه استفاده از سرریزهای پلکانی در نقاط مختلف دنیا به علت توانایی فوق‌العاده آنها در استهلاک انرژی جریان، رواج گسترده‌ای یافته است. در تحقیق پیش‌رو، هدف بررسی آزمایشگاهی افت انرژی بر روی سرریز پلکانی لبه‌دار و بدون لبه در رژیم جریان ریزشی می‌باشد. این تحقیق بر روی مدل یک سرریز ۱۰ پله‌ای با شیب ۴۵ درجه انجام شده است. لبه‌های طراحی شده، در ابتدا و وسط پله‌های مشخصی تعبیه گردید و به ازای دبی‌های مختلف میزان افت انرژی جریان محاسبه شد. نتایج این پژوهش نشان داد که در هر دو حالت پله‌های لبه‌دار و بدون لبه با افزایش دبی جریان افت انرژی نسبی کاهش می‌یابد. همچنین افت انرژی در حالت لبه‌دار بودن پله‌ها بیشتر از حالت بدون لبه بود. در حالتی که لبه‌ها به طور جداگانه در ابتدا و وسط پله نصب شدند، لبه با ارتفاع ۱ سانتی‌متری به عنوان لبه مناسب معرفی شد. در حالتی که لبه‌ها همزمان در ابتدا و وسط پله نصب شدند، لبه با ارتفاع ۵ سانتی‌متری به عنوان لبه مناسب معرفی شد. در حالتی که لبه ابتدایی پله ثابت بود و لبه وسط تغییر می‌کرد، با افزایش ارتفاع لبه در وسط پله افت انرژی هم بیشتر شد. همچنین استفاده از عمق آب قبل از پرش هیدرولیکی (در حالت جریان حباب‌دار)، باعث برآورد بیشتر افت انرژی نسبی گردید. همچنین قرارگیری لبه بر روی پله‌های اولیه سرریز باعث کاهش طول حوضچه آرامش شد. همچنین نتایج نشان داد که تأثیر مقیاس مدل در برآورد افت انرژی ناچیز می‌باشد. در مورد محل مناسب برای نصب لبه‌ها نتایج نشان داد که در تمامی حالت‌ها استفاده از لبه با ارتفاع بیشتر مناسب‌تر می‌باشد. در حالت‌هایی که دو لبه مشابه در ابتدا و وسط پله قرار گرفتند، در مورد لبه با ارتفاع ۱ و ۵ سانتی‌متری، قرارگیری لبه در ابتدای پله مناسب‌تر بود ولی برای لبه ۳ سانتی‌متری این مسئله متفاوت بود.

کلمات کلیدی: سرریز پلکانی، افت انرژی، رژیم جریان ریزشی، لبه، پله لبه‌دار.

لیست مقالات مستخرج از پایان نامه

۱- "بررسی آزمایشگاهی افت انرژی در سرریزهای پلکانی لبه‌دار و بدون لبه"

وحیده شفیعی‌پور، خلیل اژدری، صمد امامقلی‌زاده و فرزین سلماسی، اولین همایش ملی آبیاری و بهره‌وری آب، ۱۰ بهمن ۱۳۹۲، دانشگاه فردوسی مشهد.

۲- "بررسی آزمایشگاهی تاثیر لبه‌دار کردن سرریز پلکانی بر استهلاک انرژی و کاهش طول

حوضچه آرامش پایین‌دست"

وحیده شفیعی‌پور، خلیل اژدری، صمد امامقلی‌زاده و فرزین سلماسی، اولین همایش ملی آبیاری و بهره‌وری آب، ۱۰ بهمن ۱۳۹۲، دانشگاه فردوسی مشهد.

فهرست مطالب

<u>صفحه</u>	<u>عنوان مطالب</u>
-------------	--------------------

فصل اول: مقدمه و کلیات

۲	۱-۱- مقدمه
۳	۱-۲- تاریخچه سرریزهای پلکانی
۵	۱-۳- کاربردها و اهمیت
۹	۱-۴- اهداف پایان نامه
۱۰	۱-۵- سازمان دهی فصل های پایان نامه

فصل دوم: مروری بر تحقیقات پیشین

۱۲	۲-۱- مقدمه
۱۲	۲-۲- تشریح انواع جریان روی سرریزهای پلکانی
۱۳	۲-۲-۱- رژیم جریان ریزشی
۱۴	۲-۲-۱-۱- تقسیم بندی رژیم جریان ریزشی
۱۵	۲-۲-۲- رژیم جریان غیرریزشی
۱۸	۲-۲-۲-۱- تقسیم بندی جریان غیرریزشی
۱۹	۲-۲-۳- جریان تبدیلی
۲۰	۲-۳- ورود هوا در سرریزهای پلکانی
۲۲	۲-۳-۱- تاثیر ورود هوا
۲۳	۲-۴- استهلاك انرژی

عنوان مطالب

صفحه

- ۲-۴-۱ - استهلاک انرژی در رژیم جریان ریزشی ۲۳
- ۲-۵-۵ - شروع رژیم جریان غیرریزشی ۲۶
- ۲-۶-۶ - مروری بر آزمایش‌های انجام گرفته بر روی سرریزهای پلکانی ساده ۲۸
- ۲-۷-۷ - مروری بر آزمایش‌های انجام گرفته بر روی سرریزهای پلکانی شیب‌دار و لبه‌دار ۴۲
- ۲-۸-۸ - مروری بر تحقیقات عددی انجام گرفته بر روی سرریزهای پلکانی ساده ، شیب‌دار و لبه‌دار ۵۶

فصل سوم: مواد و روشها

- ۳-۱-۱ - مقدمه ۶۲
- ۳-۲-۲ - تجهیزات آزمایشگاه هیدرولیک ۶۲
- ۳-۲-۱-۱ - مشخصات فلوم مورد استفاده ۶۳
- ۳-۲-۲-۲ - سرریز پلکانی ساخته شده و مشخصات آن ۶۴
- ۳-۲-۲-۱-۱ - مختصری در رابطه با جنس سرریز ۶۴
- ۳-۳-۳ - روش انجام آزمایش ۶۷
- ۳-۳-۱-۱ - اندازه‌گیری عمق جریان ۶۹
- ۳-۳-۲-۲ - اندازه‌گیری دبی جریان ۷۲
- ۳-۴-۴ - آنالیز ابعادی ۷۳
- ۳-۴-۱-۱ - تحلیل ابعادی پارامترهای موثر بر جریان از روی سرریزهای پلکانی ۷۴
- ۳-۵-۵ - ثبت مشاهدات و محاسبات ۷۸

عنوان مطالب

صفحه

مشاهدات	۳-۵-۱	۷۸
محاسبات	۳-۵-۲	۷۸
استهلاک انرژی در سرریزها	۳-۵-۳	۷۹

فصل چهارم: نتایج و بحث

مقدمه	۴-۱	۸۲
مشاهدات آزمایشگاهی	۴-۲	۸۲
اندازه‌گیری‌ها در سرریز پلکانی بدون لبه	۴-۲-۱	۸۲
تجزیه و تحلیل نتایج بدست آمده	۴-۳	۸۶
بررسی تاثیر لبه‌ها در استهلاک انرژی	۴-۳-۱	۸۶
نمودارهای $\frac{\Delta H}{H_t}$ بر حسب Q	۴-۳-۱-۱	۸۶
نمودارهای $\frac{\Delta H}{H_t}$ بر حسب $\frac{y_c}{h}$	۴-۳-۱-۲	۱۰۱
بررسی تاثیر ورود هوا در اندازه‌گیری عمق اولیه پرش هیدرولیکی	۴-۳-۲	۱۰۳
مقایسه بین استهلاک انرژی نسبی در سرریز پلکانی به عرض	۴-۴	
۲۵، ۵۰ و ۱۰۰ سانتی‌متری به ازای تعداد پله‌های ۱۰ عدد و شیب ۴۵ درجه		۱۰۸
بررسی تاثیر لبه‌دار شدن سرریز پلکانی در کاهش طول	۴-۵	
حوضچه آرامش پایین‌دست		۱۱۱
تعیین مکان مناسب برای قرارگیری لبه‌ها بر روی پله‌های سرریز	۴-۶	۱۱۶
ارایه روابط رگرسیون خطی و غیرخطی برای برآورد محاسبه افت انرژی	۴-۷	۱۱۹

عنوان مطالب

صفحه

فصل پنجم : نتیجه گیری و پیشنهادات

۱-۵- نتایج ۱۲۲

۲-۵- پیشنهادات ۱۲۳

.....

منابع ۱۲۴

فهرست اشکال

صفحه

عنوان اشکال

فصل اول: مقدمه و کلیات

- ۱-۱- سرریز پله‌ای آکارناتیا ۴
- ۱-۲- رژیم‌های جریان از روی سرریز پلکانی: الف- رژیم ریزشی
ب- رژیم تبدیلی ج- رژیم غیرریزشی ۸

فصل دوم: مروری بر تحقیقات پیشین

- ۱-۲- انواع جریان روی سرریز پلکانی ۱۳
- ۲-۲- رژیم جریان ریزشی ۱۴
- ۳-۲- رژیم فرعی NA1 ۱۶
- ۴-۲- رژیم فرعی NA2 ۱۶
- ۵-۲- رژیم فرعی NA3 ۱۶
- ۶-۲- رژیم جریان غیرریزشی ۱۷
- ۷-۲- جریان از روی سرریز پلکانی با رژیم غیرریزشی و تقسیم بندی نواحی جریان ۱۸
- ۸-۲- تقسیم بندی جریان غیرریزشی ۱۹
- ۹-۲- موقعیت نقطه شروع ۲۱
- ۱۰-۲- آبشارهای پلکانی در گذرگاه‌های ناوهای رومی- پلکان آندریاکی ۴۲
- ۱۱-۲- آبشار پلکانی ۵۰
- ۱۲-۲- طراحی آبشار پلکانی ۵۰

عنوان اشکال

صفحه

- ۱۳-۲ - انواع لبه‌های مورد استفاده و حالت‌های قرارگیری آن‌ها ۵۱
- ۱۴-۲ - اشکال مختلف پله‌ها و لبه‌های مورد استفاده ۵۵
- فصل سوم: مواد و روشها**
- ۱-۳ - پلان تجهیزات موجود در آزمایشگاه هیدرولیک ۶۳
- ۲-۳ - مقطع طولی فلوم به عرض ۱۰۰ سانتی‌متر ۶۴
- ۳-۳ - سرریز پلکانی با عرض و ارتفاع یک متر (قبل از نصب) ۶۵
- ۴-۳ - سرریز پلکانی با عرض و ارتفاع یک متر (بعد از نصب) ۶۶
- ۵-۳ - رژیم جریان ریزشی برای دبی ۲۵ لیتر بر ثانیه ۶۶
- ۶-۳ - رژیم جریان ریزشی برای دبی ۲۵ لیتر بر ثانیه و سرریز با لبه ۶۶
- ۵ سانتی‌متری در ابتدا و وسط پله ۶۶
- ۷-۳ - نمایی از لبه‌های مورد استفاده ۶۷
- ۸-۳ - نمایی از محل قرارگیری لبه‌ها بر روی پله‌های مورد آزمایش ۶۸
- ۹-۳ - محل اندازه‌گیری عمق جریان (دید از کنار) ۷۰
- ۱۰-۳ - نمایی از حوضچه آرامش ۷۱
- ۱۱-۳ - نمایی از مدرج کردن دیواره حوضچه آرامش ۷۱
- ۱۲-۳ - نمایی از مدرج کردن دیواره فلوم ۷۱
- ۱۳-۳ - نمایی از جریان‌سنج ۷۳
- ۱۴-۳ - مقطع عرضی سرریز پلکانی ۸۰

فصل چهارم: نتایج و بحث

- ۴-۱ - رژیم جریان ریزشی بر روی سرریز پلکانی بدون لبه ۸۲
- ۴-۲ - مقایسه درصد افت انرژی بر روی سرریز پلکانی
- لبه‌دار (لبه‌ها در ابتدای پله) و بدون لبه ۸۷
- ۴-۳ - مقایسه درصد افت انرژی بر روی سرریز پلکانی
- لبه‌دار (لبه‌ها در وسط پله) و بدون لبه ۹۰
- ۴-۴ - مقایسه درصد افت انرژی بر روی سرریز پلکانی
- لبه‌دار (لبه‌ها در ابتدا و وسط پله) و بدون لبه ۹۲
- ۴-۵ - مقایسه درصد افت انرژی برای لبه ۱ سانتی‌متری در ابتدای پله
- و لبه‌های متغیر در وسط ۹۵
- ۴-۶ - مقایسه درصد افت انرژی برای لبه ۳ سانتی‌متری در ابتدای پله
- و لبه‌های متغیر در وسط ۹۷
- ۴-۷ - مقایسه درصد افت انرژی برای لبه ۵ سانتی‌متری در ابتدای پله
- و لبه‌های متغیر در وسط ۹۹
- ۴-۸ - مقایسه درصد افت انرژی بر روی سرریز پلکانی
- لبه‌دار و بدون لبه ۱۰۱
- ۴-۹ - تاثیر پارامتر بی بعد $\frac{y_c}{h}$ در استهلاک انرژی با لبه در ابتدای پله ۱۰۲
- ۴-۱۰ - تاثیر پارامتر بی بعد $\frac{y_c}{h}$ در استهلاک انرژی با لبه در وسط پله ۱۰۲

عنوان اشکال

صفحه

- ۱۱-۴ - نمودار افت انرژی نسبی نسبت به عمق بحرانی جریان برای پله‌های لبه‌دار ۱۰۳
- ۱۲-۴ - نمایی از اندازه‌گیری عمق اولیه پرش در دو حالت بدون حباب هوا و حباب‌دار ۱۰۴
- ۱۳-۴ - حالت اول ۱۰۵
- ۱۴-۴ - حالت دوم ۱۰۵
- ۱۵-۴ - حالت سوم ۱۰۶
- ۱۶-۴ - حالت چهارم ۱۰۶
- ۱۷-۴ - حالت پنجم ۱۰۷
- ۱۸-۴ - حالت ششم ۱۰۷
- ۱۹-۴ - مقایسه اثر مقیاس در فلوم به عرض‌های ۲۵، ۵۰ و ۱۰۰ سانتی‌متری ۱۱۰
- ۲۰-۴ - نمایی از محل اندازه‌گیری فاصله طولی سقوط آب در حوضچه آرامش ۱۱۱
- ۲۱-۴ - فاصله طولی سقوط آب برای لبه ۱ سانتی‌متری ابتدا و وسط پله ۱۱۲
- ۲۲-۴ - فاصله طولی سقوط آب برای لبه ۱ سانتی‌متری ابتدا و
لبه ۳ سانتی‌متری وسط پله ۱۱۲
- ۲۳-۴ - فاصله طولی سقوط آب برای لبه ۱ سانتی‌متری ابتدا و
لبه ۵ سانتی‌متری وسط پله ۱۱۳
- ۲۴-۴ - فاصله طولی سقوط آب برای لبه ۳ سانتی‌متری ابتدا و
لبه ۱ سانتی‌متری وسط پله ۱۱۳
- ۲۵-۴ - فاصله طولی سقوط آب برای لبه ۳ سانتی‌متری ابتدا و وسط پله ۱۱۴

عنوان اشکال

صفحه

- ۲۶-۴ - فاصله طولی سقوط آب برای لبه ۳ سانتی متری ابتدا و
لبه ۵ سانتی متری وسط پله ۱۱۴
- ۲۷-۴ - فاصله طولی سقوط آب برای لبه ۵ سانتی متری ابتدا و
لبه ۱ سانتی متری وسط پله ۱۱۵
- ۲۸-۴ - فاصله طولی سقوط آب برای لبه ۵ سانتی متری ابتدا و
لبه ۳ سانتی متری وسط پله ۱۱۵
- ۲۹-۴ - فاصله طولی سقوط آب برای لبه ۵ سانتی متری در ابتدا و وسط پله ۱۱۶
- ۳۰-۴ - نمودار پراکندگی و ضریب تعیین برای تمامی داده‌های آزمایشگاهی ۱۱۹

فهرست جداول

صفحه

عنوان جداول

فصل سوم: مواد و روشها

- ۱-۳- مشخصات مدل فیزیکی سرریز پلکانی مورد آزمایش ۶۵
- ۲-۳- حالت‌های مختلف قرارگیری لبه‌ها بر روی پله‌های ۲، ۳، ۴ و ۵ ۶۸
- ۳-۳- ابعاد پارامترهای مورد استفاده ۷۵

فصل چهارم: نتایج و بحث

- ۱-۴- محاسبه پارامترهای هیدرولیکی برای سرریز پلکانی بدون لبه ۸۵
- ۲-۴- محاسبه پارامترهای هیدرولیکی برای سرریز پلکانی با لبه ۱ سانتی‌متری در ابتدای پله ۸۸
- ۳-۴- محاسبه پارامترهای هیدرولیکی برای سرریز پلکانی با لبه ۳ سانتی‌متری در ابتدای پله ۸۹
- ۴-۴- محاسبه پارامترهای هیدرولیکی برای سرریز پلکانی با لبه ۵ سانتی‌متری در ابتدای پله ۸۹
- ۵-۴- محاسبه پارامترهای هیدرولیکی برای سرریز پلکانی با لبه ۱ سانتی‌متری در وسط پله ۹۱
- ۶-۴- اندازه‌گیری و محاسبه پارامترهای هیدرولیکی برای سرریز پلکانی با لبه ۳ سانتی‌متری در وسط پله ۹۱

عنوان جداول

صفحه

- ۷-۴ - محاسبه پارامترهای هیدرولیکی برای سرریز پلکانی با لبه ۵ سانتی متری در وسط پله ۹۲
- ۸-۴ - محاسبه پارامترهای هیدرولیکی برای سرریز پلکانی با لبه ۱ سانتی متری در ابتدا و وسط پله ۹۳
- ۹-۴ - محاسبه پارامترهای هیدرولیکی برای سرریز پلکانی با لبه ۳ سانتی متری در ابتدا و وسط پله ۹۴
- ۱۰-۴ - محاسبه پارامترهای هیدرولیکی برای سرریز پلکانی با لبه ۵ سانتی متری در ابتدا و وسط پله ۹۴
- ۱۱-۴ - محاسبه پارامترهای هیدرولیکی برای سرریز پلکانی با لبه ۱ سانتی متری در ابتدا و لبه ۳ سانتی متری در وسط پله ۹۶
- ۱۲-۴ - محاسبه پارامترهای هیدرولیکی برای سرریز پلکانی با لبه ۱ سانتی متری در ابتدا و لبه ۵ سانتی متری در وسط پله ۹۶
- ۱۳-۴ - محاسبه پارامترهای هیدرولیکی برای سرریز پلکانی با لبه ۳ سانتی متری در ابتدا و لبه ۱ سانتی متری در وسط پله ۹۸
- ۱۴-۴ - محاسبه پارامترهای هیدرولیکی برای سرریز پلکانی با لبه ۳ سانتی متری در ابتدا و لبه ۵ سانتی متری در وسط پله ۹۸
- ۱۵-۴ - محاسبه پارامترهای هیدرولیکی برای سرریز پلکانی با لبه ۵ سانتی متری در ابتدا و لبه ۱ سانتی متری در وسط پله ۱۰۰

عنوان جداول

صفحه

- ۱۶-۴ - محاسبه پارامترهای هیدرولیکی برای سرریز پلکانی با
لبه ۵ سانتی‌متری در ابتدا و لبه ۳ سانتی‌متری در وسط پله ۱۰۰
- ۱۷-۴ - داده‌های سلماسی برای سرریز با عرض ۲۵ سانتی‌متر ۱۰۹
- ۱۸-۴ - داده‌های سلماسی برای سرریز با عرض ۵۰ سانتی‌متر ۱۰۹
- ۱۹-۴ - پارامترهای اندازه‌گیری برای سرریز با عرض ۱۰۰ سانتی‌متر ۱۱۰
- ۲۰-۴ - مقایسه سرریز با لبه ۵ در ابتدا و وسط پله با سرریز با لبه ۳ در ابتدا و وسط پله ۱۱۷
- ۲۱-۴ - مقایسه سرریز با لبه ۵ در ابتدا و وسط پله با سرریز با لبه ۱ در ابتدا و وسط پله ۱۱۷
- ۲۲-۴ - مقایسه سرریز با لبه ۵ در ابتدای پله و سرریز با لبه ۵ در وسط پله ۱۱۷
- ۲۳-۴ - مقایسه سرریز با لبه ۳ در ابتدای پله و سرریز با لبه ۳ در وسط پله ۱۱۸
- ۲۴-۴ - مقایسه سرریز با لبه ۱ در ابتدای پله و سرریز با لبه ۱ در وسط پله ۱۱۸

علائم و اختصارات

$$y_c = \text{عمق بحرانی (m)}$$

$$h = \text{ارتفاع هر پله (m)}$$

$$l = \text{طول افقی هر پله (m)}$$

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

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

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

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

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

$$N = \text{تعداد کل پله‌ها}$$

$$\Delta H = \text{افت انرژی (m)}$$

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

$$g = \text{شتاب ثقل (N/m}^3\text{)}$$

$$b_s = \text{عرض لبه (m)}$$

$$h_s = \text{ارتفاع لبه (m)}$$

$$l_s = \text{طول لبه (m)}$$

$$x_1 = \text{محل قرارگیری لبه در وسط پله (m)}$$

$$x_2 = \text{محل قرارگیری لبه در ابتدای پله (m)}$$

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

F_{r1} = عدد فرود (بدون بعد)

q = دبی در واحد عرض (m^2/s)

فصل اول

مقدمه و هدف

سرریزهای پلکانی به دلیل سادگی ساخت و طراحی ساده از حدود ۳۵۰۰ سال پیش، مورد استفاده قرار می‌گرفته‌اند [۱]. در طول قرن نوزدهم و اوایل قرن بیستم تعداد قابل ملاحظه‌ای از سدهای ساخته شده به سرریز پلکانی مجهز شدند. ولی بعدها به علت پیشرفت‌های حاصله در زمینه طراحی و ساخت حوضچه آرامش پرش هیدرولیکی، استفاده از این سرریزها منسوخ شد. در چند دهه اخیر شناخت تکنولوژی جدید ساخت سدها با استفاده از مصالح بتن غلتکی^۱ و گابیونی، موجب رونق دوباره استفاده از این سرریزها در سدسازی شده است [۲]. در واقع این روش ساخت باعث بالا رفتن میزان انرژی مستهلک شده در طول سرریز شده و باعث می‌شود که بخش اعظمی از انرژی جریان عبوری از روی سد قبل از رسیدن به پنجه سد مستهلک شود. وجود پله‌ها به عنوان زبری، هد از دست رفته در طول شیب را افزایش می‌دهد، از طرفی نقطه ورود هوا را به نزدیکی تاج سد انتقال داده و از این رو خطر کاویتاسیون را تا حد بسیاری کاهش می‌دهد [۳]. به‌طور کلی می‌توان گفت ساخت سرریزهای پلکانی با این نوع تکنولوژی به علت اقتصادی بودن و سهولت در ساخت سازگاری مناسبی داشته و همچنین به عنوان مستهلک کننده انرژی بسیار قوی حتی نسبت به سایر مستهلک کننده‌های انرژی مورد توجه و اهمیت بیشتری قرار گرفته‌اند [۴].

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 سیلاب‌های PMF^۲ از روی تاج سد، می‌باشد. به عبارت دیگر، سرریزهای پلکانی برای اولین بار در سدهای بتنی به کار رفتند و سپس در سدهای خاکی توسعه یافتند [۲]. شوت‌ها و سرریزها برای عبور دادن دبی‌های زیاد از روی یک سازه هیدرولیکی (مثلا سد، لبریز انحرافی) به گونه‌ای طراحی

^۱ Roller Compacted Concrete

^۲ probable maximum flood

می‌شوند که هیچ‌گونه صدمه عمده‌ای 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 می‌شود و لازم است مقداری از انرژی آن به خاطر جلوگیری 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 [۱]. مجموعه عوامل فوق افزایش نقش شوت‌ها و سرریزهای پلکانی را در سازه‌های آبی سبب شده است. در بخش‌های بعدی این فصل به بیان تاریخچه سرریزهای پلکانی، کاربردها و اهمیت موضوع، اهداف انجام تحقیق و مروری بر فصل‌های بعدی پرداخته شده است.

۱-۲- تاریخچه سرریزهای پلکانی

شوت‌ها و سرریزهای پلکانی دارای سابقه‌ای طولانی معادل با ۳۵۰۰ سال هستند. قدیمی‌ترین سرریز پله‌ای جهان احتمالاً سرریز پله‌ای آکارناتیا^۱ در یونان می‌باشد که در حدود ۱۳۰۰ سال قبل از میلاد مسیح ساخته شده 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 [۵]. در شکل (۱-۱) نمایی از این سرریز نشان داده شده است.

¹ Akarnania



شکل ۱-۱- سرریز پله‌ای آکارناتیا [۵]

در پی آن رومیان نیز اقدام به ساخت این گونه سرریزها کردند. به عنوان مثال می‌توان به سدهای روگذر^۱ در سوریه و تونس اشاره نمود که آثار و بقایای آن هنوز پا برجاست. پس از سقوط پادشاهی روم، مهندسين عمران مسلمان تجربه‌هایی را از رومی‌ها و سابین‌ها^۲ کسب نمودند. سرریزهای پلکانی ساخت مسلمانان در کشورهای عراق و اسپانیا یافت می‌شوند. بعد از غلبه اسپانیا، مهندسين اسپانیایی از تجربه رومی‌ها و مسلمانان در سرریزهای پلکانی استفاده نمودند. تخصص مهندسين اسپانیایی بین سال‌های ۱۴۰۰ و ۱۸۵۰ میلادی در سدسازی در مقایسه با استانداردهای جهانی استثنایی و جالب بوده است. به عنوان مثال می‌توان از آلمانسا^۳ بین آلیکنت^۴ و مادرید نام برد. در سال ۱۷۹۱ اسپانیایی‌ها بزرگ‌ترین سد با سرریز پلکانی را ساختند که نام آن پونتزه^۵ بود و این سد پس از آسیب شالوده در سال ۱۸۰۲ تخریب گردید. سرریز سد نیوکروتون^۶ در آمریکا در سال ۱۹۰۶ احتمالاً

¹ Overflow dams

² Sabians

³ Almansa

⁴ Alicante

⁵ Puentes

⁶ New Croton

اولین سرسره پلکانی جهت هدف استهلاک انرژی بوده است. در خلال قرون هجدهم و نوزدهم سدهای سرریز شونده پله‌ای متعددی در مکزیک ساخته شد [۳ و ۶].

۱-۳- کاربردها و اهمیت

پیشرفت‌های اخیر در تکنولوژی امکانات گسترده‌ای را برای ساخت سدهای بزرگ، مخازن و کانال‌ها به وجود آورده است. این پیشرفت‌ها لزوم توسعه طراحی و روش‌های ساخت را به خصوص برای سیستم‌هایی که بتوانند سیلاب کافی را تخلیه کنند ایجاب می‌نماید [۱].

سرریز پلکانی سازه‌ای مجهز به تعدادی پله است که این پله‌ها در مقابل جریان مقاومت نموده و باعث استهلاک فراوان انرژی می‌شوند. در نتیجه این عمل، اندازه سازه مستهلک کننده انرژی در پنجه چنین سرریزهایی بسیار کاهش می‌یابد. در سال‌های اخیر، به لحاظ برتری‌های سازه‌ای و هیدرولیکی، ساخت این سرریزها بیش از گذشته مورد توجه قرار گرفته و تحقیقات وسیعی در حال انجام است [۷]. مطالعات انجام گرفته و در دست انجام در زمینه سرریزهای پلکانی عموماً بر روی سه موضوع متمرکز بوده است که عبارتند از استهلاک انرژی در سرریزهای پلکانی، بررسی انواع راهکارها جهت افزایش استهلاک انرژی جریان، بررسی انواع رژیم‌های جریان تشکیل شده بر روی سرریزهای پلکانی، تعیین معیارهای تشخیص انواع جریان اعم از ریزشی، تبدیلی و غیرریزشی 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 ابتدا و وسط پله می‌باشد. استهلاک انرژی جریان آب از روی سرریز سدها معمولاً به یکی از سه صورت زیر اتفاق می‌افتد:

۱- 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 می کند (برای مثال سد کاستانگ^۱ در فرانسه).

۲- 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 طرح های دفتر اصلاح خاک آمریکا^۲).

۳- تعبیه تعدادی پله روی سرریز برای کمک به استهلاک انرژی (برای مثال سد گریک گلد استرالیا^۳) [۱].

استهلاک بالای انرژی از جمله مهم ترین ویژگی سرریز پلکانی به شمار می رود، به طوری که بخش عظیمی از انرژی جنبشی جریان حین عبور از روی پله های متوالی به پایین دست سرریز کاهش می یابد. سرریزهای پلکانی با استفاده از پله پله 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 پله ها مستهلک می گردد. در واقع، این نوع سرریزها مشابه آبراهه با زبری زیاد محسوب می شوند. در این صورت چنانچه بتوان با افزایش زبری، بخشی از انرژی جریان را در ضمن عبور از روی سرریز و تندآب مستهلک نمود، ابعاد سازه کاهنده انرژی در پایاب کاهش می یابد [۱ و ۸]. مثال هایی از کاربرد سرریزهای پلکانی در زیر ارایه شده است [۱ و ۶]:

۱- در انگلستان یک آبگیر پله ای برای سرریز نیلوفری انتخاب گردیده است. این آبگیر پس از آزمایش های مدلی طراحی شده است و آزمایش ها نشان داده اند که ظرفیت دبی آبگیر مذکور در مقایسه با آبگیر صاف (یعنی مخزن لیدی باور^۱) بیشتر است.

¹ Chastang Dam, France

² United State Bureau of Reclamation

³ Gold Greek Dam, Australia

۲- آبشارهای پلکانی^۲ در طرح‌های تصفیه آب کاربرد دارند. این چنین آبشارهای پلکانی می‌توانند در مسیر رودخانه‌ها برای افزایش میزان اکسیژن محلول^۳ ساخته شوند. در نزدیکی شیکاگو^۵ آبشار پلکانی برای اکسیژن‌دهی آب آلوده در مسیر جریان احداث شده است.

۳- کاربرد دیگر سرریزهای پلکانی استفاده از آن‌ها به عنوان سد تنظیمی^۴ برای سیلاب‌های محتوی قلوه‌سنگ می‌باشد. در رودخانه‌های کوهستانی مواد حمل‌شونده^۵ توسط جریان شدید آب می‌تواند خسارات زیادی ایجاد نماید و برای کاهش خسارات، سدهای تنظیمی در این گونه موارد کاربرد دارند.

۴- در محل‌های تفریحی در پارک‌ها از سرسره‌های پلکانی استفاده می‌شود که منظره زیبایی را به وجود می‌آورند [۹].

الگوی جریان برای یک شکل هندسی مشخص در سرریز پلکانی می‌تواند به صورت ریزشی^۶ با دبی‌های کم و ارتفاع پلکان‌های بزرگ، جریان تبدیلی^۷ با دبی‌های متوسط و یا جریان غیرریزشی^۸ با دبی‌های زیاد و ارتفاع پلکان‌های کم رخ دهد [۱۰ و ۱۱]. در شکل (۱-۲) این سه رژیم جریان مشاهده می‌شوند. در این شکل طول افقی هر پلکان به l و ارتفاع عمودی آن به h نشان داده شده است [۱].

¹ Lydy Bower

² Stepped Cascades

³ Dissolved Oxygen

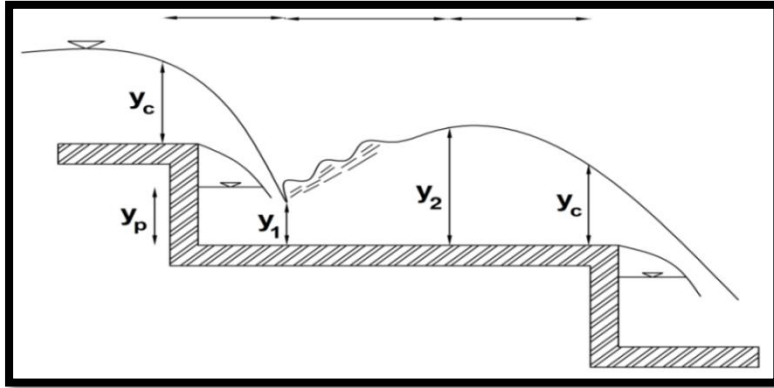
⁴ Check Dams

⁵ Debris

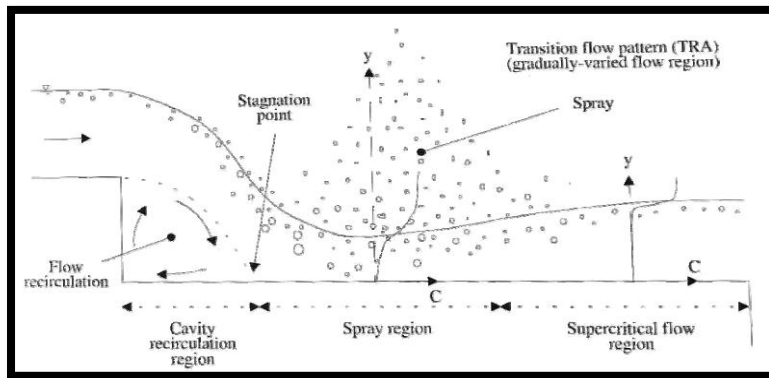
⁶ Nappe Flow

⁷ Transition Flow

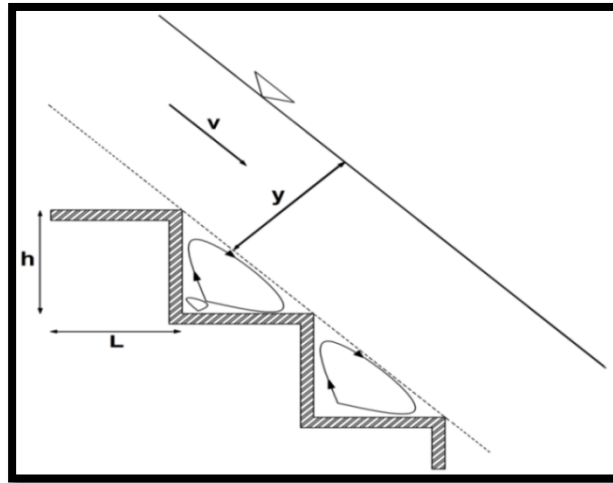
⁸ Skimming Flow



(الف) : رژیم جریان ریزشی با پرش هیدرولیکی کاملاً توسعه یافته



(ب) : رژیم جریان تبدیلی



(ج) : رژیم جریان غیرریزشی با چرخش حفره‌ای پایدار

شکل ۱-۲- رژیم‌های جریان از روی سرریز پلکانی: الف- رژیم ریزشی ب- رژیم تبدیلی ج- رژیم غیرریزشی [۱]

۱-۴- اهداف پایان نامه

مستهلك کننده‌های انرژی در مواردی که انرژی جنبشی زیاد جریان منجر به خرابی‌هایی از قبیل فرسایش کانال پایاب، سایش سازه‌های هیدرولیکی، تولید امواج مخرب در پایاب و یا پدیده آبستگي شوند، به کار می‌روند. واژه مستهلك کننده انرژی که توسط محققین هیدرولیک به کار برده می‌شود، اشاره به سازه‌هایی دارد که برای از بین بردن و یا کاهش انرژی جنبشی جریان به کار برده می‌شوند. سرریزهای پلکانی از جمله سازه‌های هیدرولیکی هستند که به علت ظرفیت بالای آن‌ها در استهلاك انرژی، مورد توجه طراحان است و در چند دهه اخیر به یکی از روش‌های متداول جهت جابه‌جایی سیلاب‌ها تبدیل گردیده‌اند.

در یک سرریز پلکانی، پله‌ها به نحو کاملاً چشمگیری می‌توانند شدت استهلاك انرژی در امتداد سطح سرریز را افزایش داده و اندازه و هزینه حوضچه آرامش پایین‌دست را کاهش دهند. از پارامترهای هیدرولیکی و هندسی موثر بر استهلاك انرژی جریان از روی سرریزهای پلکانی می‌توان به دبی جریان، ورود هوا به داخل جریان، ارتفاع پلکان‌ها، تعداد پلکان‌ها، شیب سرریز و نوع رژیم جریان اشاره نمود [۶].

در این تحقیق با استفاده از مدل فیزیکی ساخته شده در آزمایشگاه هیدرولیک گروه آب دانشگاه شاهرود، برای بررسی افت انرژی در سرریز پلکانی لبه‌دار و بدون لبه، آزمایش‌های متعددی انجام شد. بدین منظور یک سرریز پلکانی با شیب ۴۵ درجه و تعداد پله ۱۰ عدد ساخته و مورد آزمایش قرار گرفت. این تحقیق دارای اهداف زیر می‌باشد :

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

ریزشی

۲- مقایسه استهلاك انرژی جریان در سرریزهای پلکانی لبه‌دار و بدون لبه در حالت‌های مختلف

لبه‌دار شدن پله‌ها

۳- دستیابی به ارتفاع بهینه لبه‌های مورد استفاده

۴- دستیابی به مناسب‌ترین مکان برای قرارگیری لبه‌ها بر روی پله‌های سرریز

۱-۵- سازمان‌دهی فصل‌های پایان‌نامه

فصل اول این پایان‌نامه شامل مقدمه، تاریخچه، کاربردها و اهمیت موضوع، اهداف پایان‌نامه و شرح کلی فصول پایان‌نامه می‌باشد. 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 آزمایش‌ها و نیز توضیح مختصری در مورد وسایل به کار برده شده در این پایان‌نامه پرداخته است. در فصل چهارم نتایج حاصل از انجام آزمایش‌ها آرایه و مورد بحث و بررسی قرار گرفته‌اند. در فصل پنجم به نتیجه‌گیری و پیشنهادات پرداخته شده است. در فصل پنجم ضمن آرایه نتایج بدست آمده به صورت کلی و خلاصه، پیشنهاداتی در رابطه با ادامه تحقیقات آرایه گردیده است.

فصل دوم

کلیات و مروری بر تحقیقات

پیشین

۲-۱- مقدمه

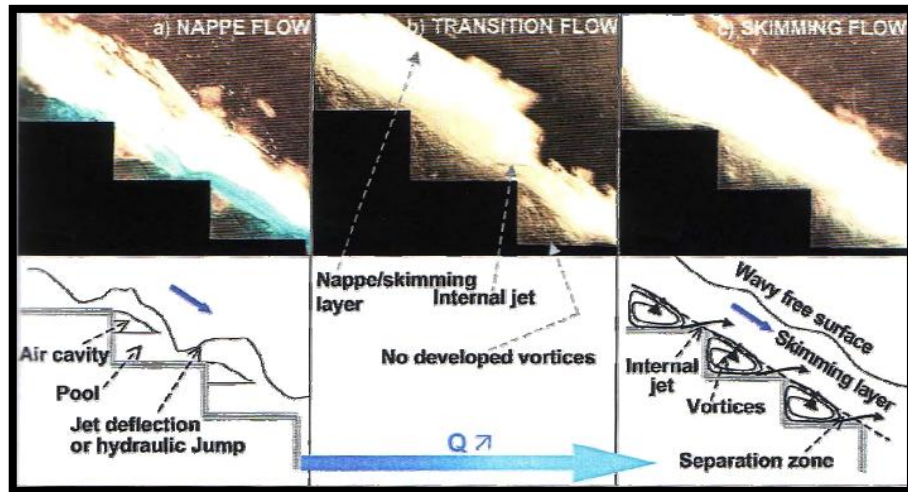
مستهلك نمودن انرژی جریان عبوری از روی سرریز جهت جلوگیری از وارد آمدن خسارت به پایین دست بسیار حائز اهمیت می باشد. یکی از بهترین راه های مستهلك نمودن انرژی استفاده از سرریزهای پلکانی بوده که با استهلاك مناسب جریان باعث کوچکتر شدن ابعاد حوضچه آرامش واقع در پایین دست سرریز می گردند. در این فصل از پایان نامه ابتدا به صورت مختصر به اصول حاکم بر جریان از روی سرریزهای پلکانی پرداخته می شود. رژیم های ریزشی و غیرریزشی، موضوع پدیده هوا به داخل جریان و اهمیت آن و استهلاك انرژی جریان در سرریزهای پلکانی به صورت مختصر مورد بحث قرار می گیرد. در ادامه در خصوص تحقیقات انجام شده بر روی سرریزهای پلکانی پرداخته می شود. منابع ارایه شده در این فصل شامل ۳ بخش می باشد :

- ۱- تحقیقات آزمایشگاهی صورت گرفته بر روی سرریزهای پلکانی ساده
- ۲- تحقیقات آزمایشگاهی صورت گرفته بر روی سرریزهای پلکانی شیب دار و لبه دار
- ۳- تحقیقات عددی صورت گرفته بر روی سرریزهای پلکانی ساده، شیب دار و لبه دار

۲-۲- تشریح انواع جریان روی سرریزهای پلکانی

سرریز پله ای در واقع یک کانال روباز است که یک سری آبشار در کف آن تعبیه شده است. با تغییر دبی عبوری از روی این سرریزها، سه نوع جریان شکل می گیرد :

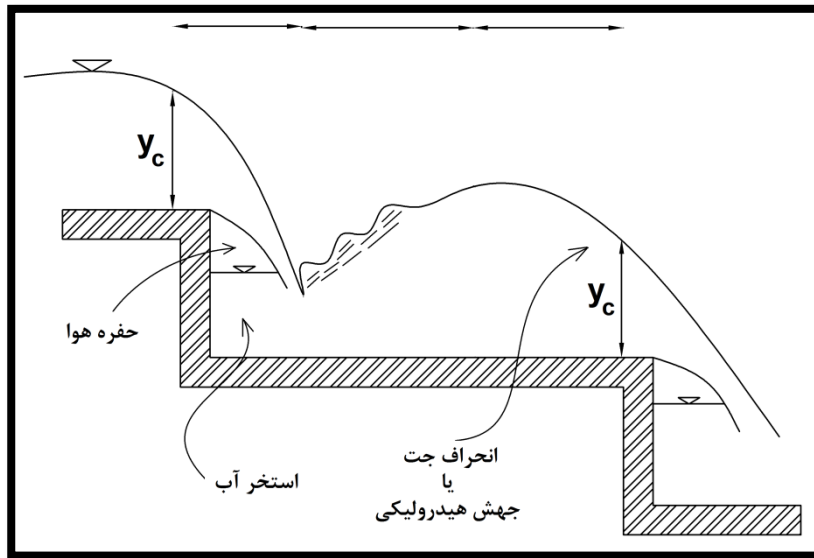
- ۱- جریان ریزشی با شدت جریان کم
- ۲- جریان تبدیلی با شدت جریان متوسط
- ۳- جریان غیرریزشی با شدت جریان زیاد



شکل ۱-۲- انواع جریان روی سرریز پلکانی [۳]

۱-۲-۲- رژیم جریان ریزشی

کل آبشار در شدت جریان‌های کم (یعنی رژیم جریان ریزشی) به تعدادی از آبشارهای کوچک‌تر تقسیم شده و جریان در برخورد با پلکان‌های متوالی می‌تواند دارای پرش هیدرولیکی کامل و یا ناقص (بستگی به طول افقی هر پله دارد) باشد. افت انرژی بر اثر تماس جت جریان با هوا، برخورد جت روی هر پله و تشکیل پرش هیدرولیکی کامل و یا ناقص روی هر پله حاصل می‌شود. جریان در انتهای بالادست هر پله دارای سه خصوصیت عمده یعنی تیغه سقوط آزاد، حفره هوا و یک استخر می‌باشد که سیال در آن به چرخش در می‌آید. 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 [۱]. نمایی از جریان ریزشی به جهت ضرورت مطلب دوباره در شکل (۲-۲) ارائه شده است.



شکل ۲-۲- رژیم جریان ریزشی

۲-۲-۱-۱- تقسیم بندی رژیم جریان ریزشی

چانسون در بررسی دقیق این نوع جریان را به سه نوع متمایز از یکدیگر تقسیم بندی کرده است :

۱- جریان ریزشی با پرش هیدرولیکی کامل (رژیم فرعی NA1).

۲- جریان ریزشی با پرش هیدرولیکی ناقص (رژیم فرعی NA2).

۳- جریان ریزشی فاقد پرش هیدرولیکی (رژیم فرعی NA3).

جریان ریزشی روی پله‌های افقی و مایل رو به بالا غالباً دارای پرش‌های هیدرولیکی کامل و یا ناقص هستند. ویژگی بارز هیدرولیکی در چنین مواردی وقوع جریان بحرانی در هر لبه پله می‌باشد. این گونه جریان‌های ریزشی به صورت یک رشته سازه آبشاری^۱ متوالی عمل می‌کنند. (شکل‌های ۲-۳ و ۲-۴) [۱].

جریان در رژیم فرعی NA1 در هر پله در تیغه سقوط آزاد در بالای پرش هیدرولیکی از نوع فوق بحرانی، در پایین دست پرش هیدرولیکی از نوع زیر بحرانی و در لبه پله از نوع بحرانی می‌باشد (شکل

^۱ Drop Structure

۳-۲). پرش هیدرولیکی در شدت جریان‌های بزرگ‌تر به تدریج با لبه پایین دست پله برخورد می‌کند (رژیم فرعی NA2، شکل ۴-۲) [۱].

جریان ریزشی بدون پرش هیدرولیکی (رژیم فرعی NA3) در دبی‌های بیشتر و قبل از وقوع جریان تبدیلی به وقوع می‌پیوندد. رژیم فرعی NA3 در پله‌های افقی پهن و غالباً در کانال‌هایی که دارای پله‌های افقی مایل رو به پایین هستند به وقوع می‌پیوندد (شکل ۵-۲) [۱].

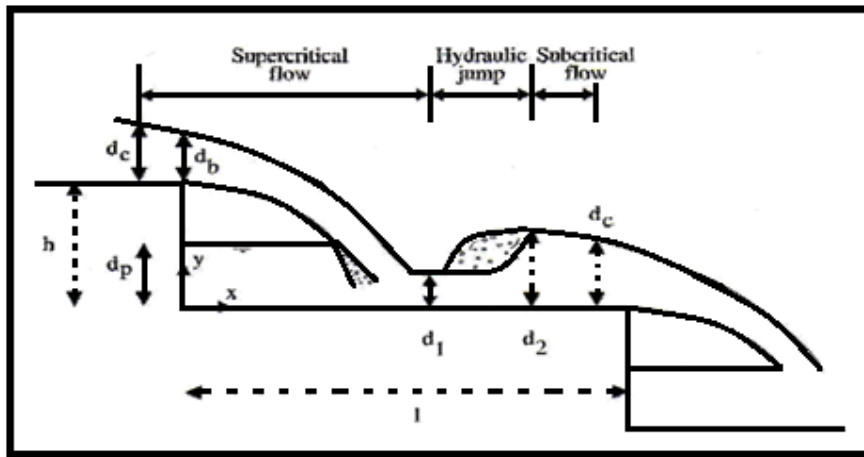
در چنین مواردی کنترل هیدرولیکی (جریان بحرانی) وجود ندارد و نوع جریان در هر شرایطی فوق بحرانی است و الگوهای سه بعدی جریان مثلاً امواج ضربه‌ای یا امواج دیواره‌های جانبی را می‌توان در آن مشاهده کرد [۱].

۲-۲-۲- رژیم جریان غیرریزشی

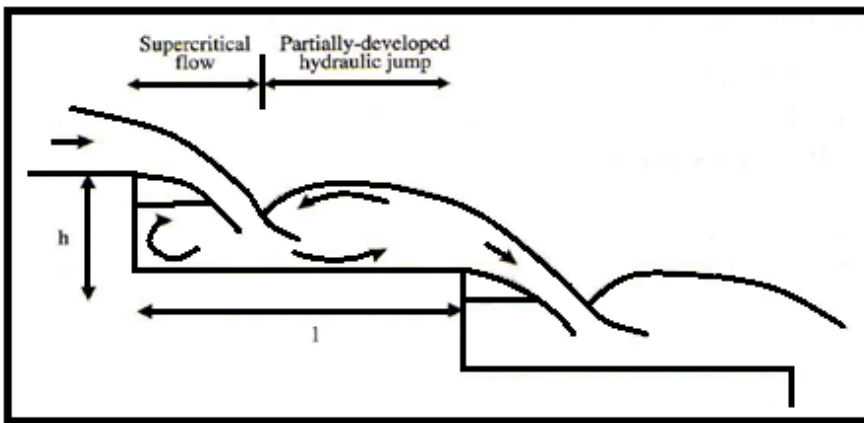
آب در رژیم جریان غیرریزشی به صورت یک نهر پیوسته و منسجم به سمت سطح پله‌ها حرکت می‌کند و روی پله‌ها به صورت یک لایه جاری می‌شود. سپس به وسیله چرخش مجدد سیالی که بین پله‌ها در دام می‌افتد در قالب بالشتک آب ظاهر می‌گردد (شکل ۶-۲). لبه‌های خارجی پله‌ها نوعی کف کاذب^۱ یا شبه کف به وجود می‌آورند که آب از روی آن‌ها عبور می‌نماید [۱].

گردابه‌های چرخشی در زیر این شبه کف توسعه می‌یابند و در میان انتقال تنش برشی حاصل از جریان آب عبوری از پله‌ها باقی می‌مانند [۱]. قسمت اعظم استهلاک انرژی در این نوع رژیم، بر اثر ایجاد جریان‌های چرخشی زیر بستر کاذب ایجاد می‌گردد.

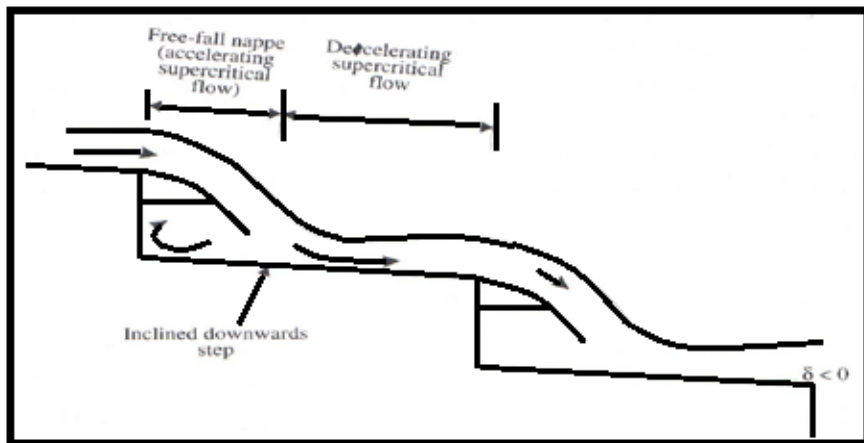
^۱ Pseudo- Bottom



شکل ۲-۳- رژیم فرعی NA1 [۱]

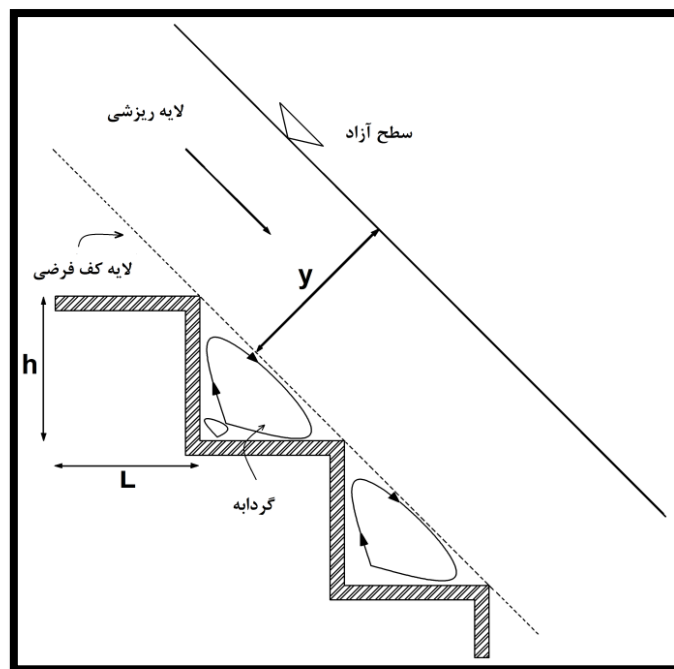


شکل ۲-۴- رژیم فرعی NA2 [۱]



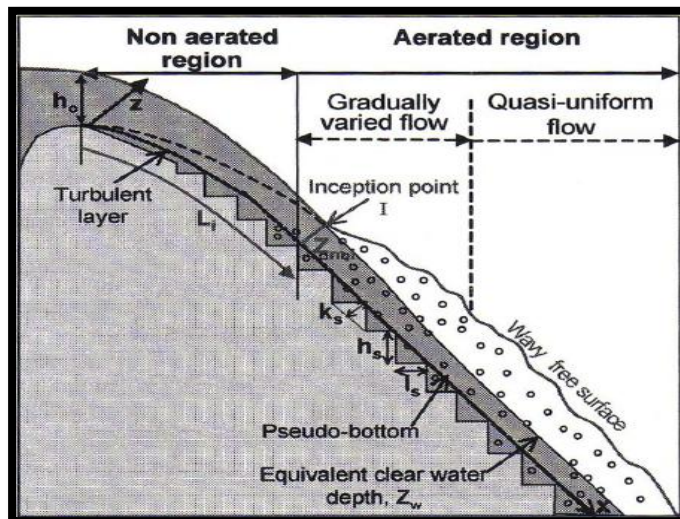
شکل ۲-۵- رژیم فرعی NA3 [۱]

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 [۱]. با رشد لایه مرزی تلاطم و رسیدن به سطح آب، ورود هوا در پله‌های پایین‌دست صورت گرفته و میزان تلاطم به حداکثر می‌رسد (شکل ۲-۷). در صورت طولانی بودن سرریز، جریان در پنجه سرریز به صورت کف آلود در آمده و سیال به صورت آب سفید^۱ ظاهر می‌گردد. لازم به ذکر است که در شدت جریان‌های بسیار بالا پله‌ها نقش زبری را ایفا می‌کنند و نقش چندان‌ی در استهلاک انرژی ندارند [۳].



شکل ۲-۶- رژیم جریان غیرریزشی [۱]

¹ white water



شکل ۲-۷- جریان از روی سرریز پلکانی با رژیم غیرریزشی و تقسیم بندی نواحی جریان [۳]

۲-۲-۱- تقسیم بندی جریان غیرریزشی

جریان غیرریزشی به دو دسته A و B تقسیم بندی می شود. بررسی های انجام شده در این مورد در محدوده $(5.7^\circ \leq \theta \leq 55^\circ)$ می باشد ($\theta =$ شیب کانال). آزمایش های انجام شده مشخصات متفاوتی را برای این نوع جریان در محدوده $(5.7^\circ \leq \theta \leq 19^\circ)$ و $(19^\circ \leq \theta \leq 55^\circ)$ نشان می دهد. مرز بین این دو نوع جریان توسط رابطه (۲-۱) ارایه شده است [۳].

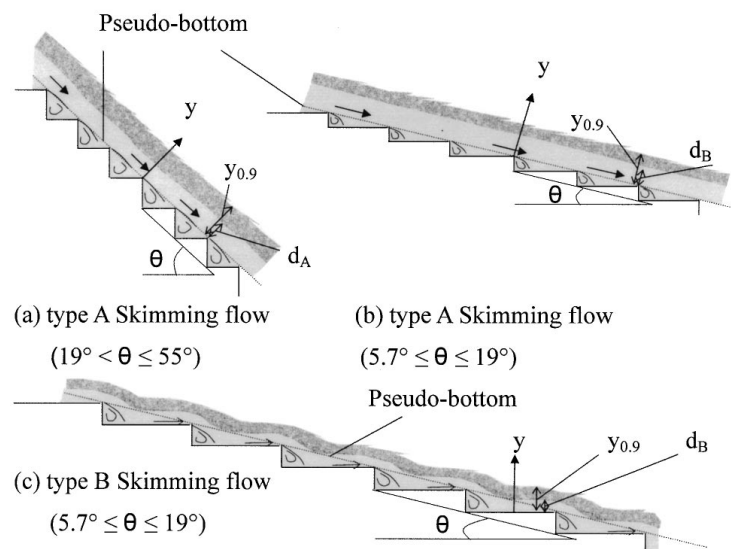
$$\left(\frac{h}{y_c}\right)_B = 13(\text{tg } \theta)^2 - 2.73\text{tg } \theta + 0.373 \quad (2-1)$$

در این رابطه $h =$ ارتفاع پله، $y_c =$ عمق بحرانی و $\theta =$ شیب کانال می باشند.

نوع A: برای محدوده $(19^\circ \leq \theta \leq 55^\circ)$ پروفیل سطح آب در نواحی جریان شبه یکنواخت مستقل از نسبت $\frac{h}{y_c}$ می باشد و سطح آب تقریباً موازی با خط فرضی می باشد که از لبه پله ها می گذرد (Pseudo-bottom) (شکل ۲-۸ - a). برای محدوده $(5.7^\circ \leq \theta \leq 19^\circ)$ پروفیل سطح آب

همواره موازی با خط فرضی که از لبه پله‌ها می‌گذرد نمی‌باشد (شکل ۲-۸-ب). جریان غیرریزشی از نوع A برای نسبت $\frac{h}{y_c}$ کوچک به وقوع می‌پیوندد.

نوع B: جریان نوع B هنگامی به وقوع می‌پیوندد که مقدار $\frac{h}{y_c}$ بزرگ باشد. در این هنگام عمق جریان وابسته به محل اندازه‌گیری تغییر می‌کند. در این حالت پروفیل سطح آب تقریباً موازی با سطح افقی پله (کف پله) است (شکل ۲-۸-ج).



شکل ۲-۸- تقسیم بندی جریان غیرریزشی [۱۲]

۲-۲-۳- جریان تبدیلی

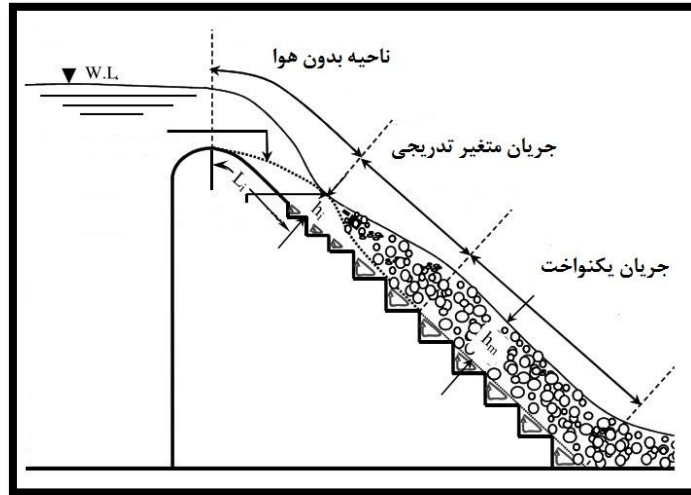
محدوده‌ای از رژیم جریان که حد واسط بین جریان‌های ریزشی و غیرریزشی می‌باشد. این جریان خصوصیتی از هر دو جریان ریزشی و غیرریزشی را دارا است. تاکنون نتوانسته‌اند خصوصیات رژیم جریان تبدیلی را با توجه به مبانی تئوریک آن پیش‌بینی کنند و اطلاعات بدست آمده بر اساس مشاهدات آزمایشگاهی است [۳]. از آنچه گفته شد برمی‌آید که مسئله مهم برای طراح ارزیابی رژیم جریان برای طراحی است. به همین منظور برای تعیین حد شروع این رژیم‌ها آزمایش‌های بسیار

زیادی انجام شده است. مشاهدات و تفسیرهای گوناگون نشان می‌دهد که در نتایج بدست آمده پراکندگی و تفاوت‌هایی دیده می‌شود.

۲-۳- ورود هوا در سرریزهای پلکانی

به علت سرعت بالا و اغتشاش در جریان، جریان روی شیب سرریز پلکانی مخلوط با هوا خواهد بود. با مشاهده رژیم جریان در نمونه‌های اصلی، می‌توان جریان را در نواحی مختلفی تشریح کرد. نزدیک تاج سد، در ناحیه بدون هوا، جریان آب تندشونده است و لایه مرزی سریعاً رشد کرده و به سطح آب می‌رسد. در این ناحیه هوایی نخواهیم داشت و عمق جریان آب عاری از هوا z_w مطابق با افت منحنی جریان آب کاهش می‌یابد. وقتی لایه مرزی به سطح آب می‌رسد، انرژی چرخش‌ها بسیار بیشتر از کشش سطحی و تاثیرات آن‌ها و نیروی جاذبه است. در این زمان هوادهی طبیعی شروع می‌شود و محل شروع این هوادهی به نام نقطه شروع^۱ نامیده می‌شود. مشخصات این نقطه به وسیله طول و فاصله آن از تاج سد L_i و شدت هوا C_i در عمق مخلوط مشخص می‌شود $(Z_{m,i})$. در پایین دست نقطه شروع جریان نسبتاً توسعه یافته را خواهیم داشت. سطح آب در این ناحیه سفید و شیری رنگ است که حاصل ورود هوا به داخل جریان می‌باشد. این جریان نسبتاً توسعه یافته به آهستگی افزایش عمق می‌یابد که حاصل محبوس شدن کیسه‌های هوای درون جریان است [۳].

¹ Inception point



شکل ۲-۹- موقعیت نقطه شروع

در واقع 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 :

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

$$g' > U_r \cos \alpha \quad (3-2)$$

در روابط فوق $\vartheta' =$ انرژی جنبشی تلاطم، $\sigma =$ کشش سطحی، $\rho_w =$ جرم مخصوص آب، $d_{ab} =$ قطر حباب‌های هوا، $U_r =$ سرعت بالا آمدن حباب‌های هوا و $\alpha =$ شیب کف کانال است [۶].

مکانیسم ورود هوا به داخل جریان در سرریزهای پلکانی در دو نوع رژیم ریزشی و غیرریزشی 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. با این 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 [۶].

در سرریزهای پلکانی با جریان غیرریزشی نقطه ورود هوا بعد از منطقه‌ای است که جریان در آن صاف و براق است. لایه مرزی از بالادست سرریز شروع به رشد کرده و در نقطه‌ای به سطح جریان می‌رسد و این نقطه به نام نقطه شروع هوا نامیده می‌شود. در پایین‌دست نقطه ورود هوا، جریان به شدت هوادهی می‌شود. در پایین‌دست، جریان یکنواخت شده و برای هر دبی مشخصی اندازه‌گیری عمق جریان، غلظت هوا و توزیع سرعت در طول سرسره بدون تغییر باقی می‌ماند. این نقطه به نام ناحیه تعادل جریان یا ناحیه با جریان کاملاً گسترش یافته نامیده می‌شود [۶].

۲-۳-۱- تاثیر ورود هوا

در جریان‌های فوق بحرانی روی سرریزها و سرسره‌ها مقدار هوادهی یکی از پارامترهای مهم می‌باشد. هوادهی طبیعی، ابتدا به علت تاثیری که بر روی افزایش حجم جریان داشت، مورد بررسی قرار گرفته است. ورود هوا باعث افزایش حجم جریان شده و این مسئله، پارامتر مهمی در تعیین ارتفاع دیواره‌های سرریز می‌باشد. از طرفی حضور هوا در جریان، عمق اولیه پرش را با خطای اندازه‌گیری همراه می‌سازد. همچنین وجود هوا در لایه مرزی باعث کاهش تنش برشی بین لایه‌های جریان شده و بنابراین نیروی برشی حاصل کاهش می‌یابد. به علاوه وجود هوا در جریان‌های با سرعت بالا ممکن است خسارت ناشی از خلأزایی (کاویتاسیون) را کاهش و یا از بین ببرد [۶].

ورود هوا در جریان از روی سرریز و سرسره‌ها و تاثیر آن بر انتقال گازهای اتمسفر مانند اکسیژن و نیتروژن در حال حاضر نیز مورد علاقه و بررسی محققین زیادی قرار گرفته است. این پدیده می‌تواند در اکسیژن‌دهی مجدد آب‌های آلوده رودخانه‌ها مورد استفاده قرار گیرد [۱ و ۶]. در این پایان‌نامه نیز کلیه محاسبات با استفاده از عمق اولیه پرش هیدرولیکی به علت محدودیت در ساخت حوضچه

آرامش انجام گرفته است. محاسبات مربوط به این قسمت برای دو حالت عمق اولیه پرش با حباب هوا و عمق اولیه پرش بدون حباب هوا و مقایسه این دو عمق انجام گرفته شده است.

۲-۴- استهلاک انرژی

میزان انرژی باقی مانده در انتهای سرریز مسئله بسیار مهم و تاثیرگذاری برای طراحی حوضچه آرامش می باشد. پلکانی کردن شوت ها و سرریزها نقش مهمی در استهلاک انرژی جریان فوق بحرانی موجود بر روی سرریزها دارد. در طراحی سازه های هیدرولیکی کاهش سرعت جریان بسیار حائز اهمیت است. به طور کلی هرچه شناخت از سرریزهای پلکانی بیشتر باشد، با استفاده بهتر از آنها انرژی بیشتری را می توان مستهلک کرد.

آنچه در مورد استهلاک انرژی مهم می باشد این است که کدام نوع از رژیم های جریان انرژی بیشتری را مستهلک می کند که اکثر تحقیقات در این مورد بوده است. مسئله مهم دیگر آن است که کدام نوع از پله ها در استهلاک انرژی موثرتر هستند. با توجه به اهمیت موضوع استهلاک انرژی در این تحقیق به تاثیر پله های لبه دار در مقایسه با پله های بدون لبه و دستیابی به مکان مناسب برای قرارگیری لبه ها پرداخته شده است.

۲-۴-۱- استهلاک انرژی در رژیم جریان ریزشی

برای جریان ریزشی چندین روش جهت بدست آوردن انرژی مستهلک شده ارایه شده است. چانسون (۱۹۹۴a) یک رابطه تحلیلی را برای محاسبه میزان افت انرژی ارایه کرد.

$$\frac{\Delta H}{H_t} = 1 - \left[\frac{0.54 \left(\frac{y_c}{h}\right)^{0.275} + 1.715 \left(\frac{y_c}{h}\right)^{-0.55}}{1.5 + \frac{H_{dam}}{y_c}} \right] \quad (4-2)$$

$$\frac{\Delta H}{H_t} = 1 - \left[\frac{0.54 \left(\frac{y_c}{h} \right)^{0.275} + 1.715 \left(\frac{y_c}{h} \right)^{-0.55}}{\frac{H_{dam} + H_0}{y_c}} \right] \quad (5-2)$$

رابطه (۴-۲) برای شوت بدون دریچه و رابطه (۵-۲) برای شوت دریچه‌دار ارایه شده است. در این روابط $\frac{\Delta H}{H_t}$ = افت انرژی، H_{dam} = ارتفاع کل سرریز، H_0 = بار آب روی تاج سد، y_c = عمق بحرانی و h = ارتفاع پله می‌باشند [۱۳].

اگرچه معادلات فوق برای جریان‌های ریزشی با پرش هیدرولیکی کامل تدوین شده‌اند، با این وجود چانسون اعتقاد دارد که این معادلات برای جریان‌های ریزشی با پرش هیدرولیکی ناقص نیز دارای کاربرد هستند. درستی این امر با توجه به آزمایش‌های گوناگون به اثبات رسیده است. چانسون در مورد جریان ریزشی بدون پرش هیدرولیکی هم مطالعات و آزمایش‌های بسیاری انجام داد که فرمول‌های زیر را براساس آن‌ها بدست آورد.

$$\frac{H_{res}}{y_c} = 6 \left(\frac{H_{dam}}{y_c} \right)^{-0.3} \quad 2 < \frac{H_{dam}}{y_c} < 20 \quad (6-2)$$

$$\frac{H_{res}}{y_c} = 3.34 \left(\frac{H_{dam}}{y_c} \right)^{-0.027} \quad 30 < \frac{H_{dam}}{y_c} < 75 \quad (7-2)$$

در این روابط H_{res} = انرژی باقیمانده در پنجه شوت، H_{dam} = ارتفاع کل سرریز و y_c = عمق بحرانی می‌باشند [۳].

چمنی و راجاراتنام نیز روشی را برای انواع جریان ریزشی پیشنهاد دادند که به موجب آن تعیین انرژی از دست رفته در هر پله قابل دستیابی می‌باشد. به فرض یک سرریز پلکانی با طول افقی l برای هر پله و h ارتفاع هر پله و N تعداد کل پله‌ها و α ضریب افت انرژی برای هر پله باشد. بنابراین میزان افت انرژی باقیمانده در هر پله به صورت زیر محاسبه خواهد شد :

$$\alpha(h + 1.5y_c)$$

افت انرژی در پله اول

$$(1-\alpha)(h + 1.5y_c)$$

انرژی باقیمانده در پله اول

$$\alpha[(1-\alpha)(h + 1.5y_c)] + h$$

افت انرژی در پله دوم

$$(1-\alpha)[(1-\alpha)(h + 1.5y_c)] + h$$

انرژی باقیمانده در پله دوم

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

$$H = (1-\alpha)^N (h + 1.5y_c) + h \sum_{i=1}^{N-1} (1-\alpha)^i \quad (۸-۲)$$

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

$$\frac{\Delta H}{H_t} = 1 - \frac{(1-\alpha)^N \left(1 + 1.5 \frac{y_c}{h}\right) + \sum_{i=1}^{N-1} (1-\alpha)^i}{N + 1.5 \left(\frac{y_c}{h}\right)} \quad (۹-۲)$$

در روابط فوق $\frac{\Delta H}{H_t}$ = افت انرژی، h = ارتفاع پله، N = تعداد کل پله ها، 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 [۱۴] :

$$\alpha = a - b * \log\left(\frac{y_c}{h}\right) \quad (۱۰-۲-الف)$$

$$a = 0.30 - 0.35\left(\frac{h}{l}\right) \quad (۱۰-۲-ب)$$

$$b = 0.54 + 0.27\left(\frac{h}{l}\right) \quad (۱۰-۲-ج)$$

a, b = ضرایبی توصیفی معادله (۱۰-۲-الف)

چانسون در بحثی که در مورد نتایج تحقیقات چمنی و راجاراتنام ارائه داده است، چنین اظهار می‌دارد که در کاربردهای مهندسی کاربرد فرمول (۴-۲) راحت‌تر از فرمول (۹-۲) برای محاسبه میزان افت انرژی نسبی بوده و در رابطه (۴-۲) نیازی به محاسبه ضریب افت انرژی در هر پله نمی‌باشد [۶].

۵-۲- شروع رژیم جریان غیرریزشی

اولین معیار برای توصیف شروع رژیم غیرریزشی توسط راجاراتنام ارائه گردید. وی شروع رژیم جریان غیرریزشی را به ازای $y_c/h > 0.8$ ارائه نمود. این معیار براساس اطلاعات موجود از آزمایش‌های اسری و هورنر (۱۹۷۱) و در محدوده شیب‌های $h/l = 0.4 - 0.9$ ارائه گردید [۱۵]. دومین رابطه توسط چانسون برای توصیف شرایط شروع رژیم جریان غیرریزشی ارائه گردید. رابطه ارائه شده توسط وی، براساس اطلاعات موجود از آزمایش‌ها برای شیب‌های $h/l = 0.2 - 1.25$ (۱۱ تا ۵۱ درجه) بود. نتایج بررسی‌های وی نشان داد که برای وقوع رژیم جریان غیرریزشی، می‌بایست دبی جریان از یک مقدار مشخصه بحرانی بیشتر گردد. این دبی مشخصه برای شروع رژیم غیرریزشی $\{(y_c)_{onset}\}$ به صورت رابطه زیر ارائه گردید [۱۳]:

$$\frac{(y_c)_{onset}}{h} = 1.057 - 0.465 \frac{h}{l} \quad (۱۱-۲)$$

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:

$$\frac{h}{l} = 0.405 \left(\frac{y_c}{h} \right)^{-0.62} \quad (۱۲-۲)$$

در حالیکه شرایط شروع رژیم جریان غیرریزشی برای سرریزهای با شیب بیشتر از ۴۵ درجه به

صورت زیر بیان گردید [۲]:

$$\frac{h}{l} = \sqrt{0.89 \left[\left(\frac{y_c}{h} \right)^{-1} - \left(\frac{y_c}{h} \right)^{-0.34} + 1.5 \right]} - 1 \quad (13-2)$$

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

یاسودا و اهاتسو 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 غیرریزشی به صورت زیر ارائه نمودند:

$$\frac{y_c}{h} = \frac{(1.4 - h/l)^{0.26}}{1.4} \quad (14-2)$$

$$\left(\frac{y_c}{h} \right) = 0.862 \left(\frac{h}{l} \right)^{-0.165} \quad (15-2)$$

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

بحرانی، h = ارتفاع پله و l = طول پله می‌باشند [۲].

همچنین یاسودا و اهاتسو در تحقیق دیگری دو معادله برای توصیف حد بالایی رژیم جریان ریزشی

و حد پایینی رژیم جریان غیرریزشی که در شیب‌های مابین ۵/۷ تا ۵۵ درجه صادق است، را به صورت

زیر ارائه نمودند [۱۶].

$$\frac{y_c}{h} = \frac{1}{0.57(\tan \theta)^3 + 1.3} \quad 5.7 \leq \theta \leq 55 \quad (16-2)$$

$$\frac{y_c}{h} = \frac{1}{1.16(\tan \theta)^{0.165}} \quad 5.7 \leq \theta \leq 55 \quad (17-2)$$

رابطه (۱۶-۲) مربوط به حد بالای جریان ریزشی و رابطه (۱۷-۲) مربوط به حد پایین جریان غیرریزشی می باشد. در این روابط $y_c =$ عمق بحرانی، $h =$ ارتفاع پله و $\theta =$ شیب سرریز می باشند. روابطی نیز توسط چیناراسری جهت این امر پیشنهاد شده است [۱۷].

$$\frac{y_c}{h} = 0.98(0.55)\frac{h}{l} \quad (۱۸-۲)$$

$$\frac{y_c}{h} = 0.8\left(\frac{h}{l}\right)^{-0.22} \quad (۱۹-۲)$$

رابطه (۱۸-۲) مربوط به حد بالای جریان ریزشی و رابطه (۱۹-۲) مربوط به حد پایین جریان غیرریزشی می باشد. در این روابط $y_c =$ عمق بحرانی، $l =$ طول پله و $h =$ ارتفاع پله می باشند. حیدری از جلو و همکاران نیز محدوده پایین شروع جریان غیرریزشی را با معادله زیر تعیین نمودند [۱۸ و ۱۹].

$$\frac{y_c}{h} = 1.204 - 0.463\frac{h}{l} \quad (۲۰-۲)$$

در این رابطه $l =$ طول پله، $y_c =$ عمق بحرانی و $h =$ ارتفاع پله می باشند.

۲-۶- مروری بر آزمایش‌های انجام گرفته بر روی سرریزهای پلکانی ساده

سلماسی و همکاران (۱۳۸۲) آزمایش‌هایی بر روی چهار مدل فیزیکی از سرریزهای پلکانی و یک مدل از سرریز صاف به ارتفاع ۱ متر و شیب ۴۵ درجه انجام دادند. آن‌ها با کاربرد عمق ثانویه پرش هیدرولیکی (به منظور حذف خطای حاصل از دخول هوا در آب) جهت محاسبه افت انرژی نسبی، نتایج حاصل از آزمایش‌ها را صورت زیر بیان نمودند:

۱- استفاده از عمق آب قبل از پرش هیدرولیکی در پایین دست سرریز جهت تعیین افت انرژی، باعث برآورد بیشتر افت انرژی نسبی می گردد.

- ۲- با افزایش دبی جریان (و یا V_c) از میزان استهلاک انرژی کاسته می‌شود.
- ۳- افت انرژی در سرریز صاف کمتر از سرریز پلکانی بوده و با افزایش دبی جریان، تفاوت بین مقدار افت انرژی نسبی در دو نوع سرریز صاف و پلکانی بیشتر می‌گردد.
- ۴- این تحقیق نشان می‌دهد که چنانچه پارامترهای هندسی موثر در افت انرژی مجموعاً در مطالعات مورد توجه قرار گیرد، محتملاً می‌توان از تاثیر رژیم جریان صرفه نظر نمود. معادلات همبستگی و مشاهدات این تحقیق نشان می‌دهد که می‌توان منحنی پیوسته‌ای برای هر دو نوع رژیم جریان برآزش داد [۲۰].
- موسوی جهرمی و همکاران (۱۳۸۴) ۲۲ مدل فیزیکی از سرریزهای پلکانی و صاف با شیب‌های ۱۵، ۲۵ و ۴۵ درجه را مورد بررسی قرار دادند. جهت مطالعه اثر تعداد پله‌ها در افت انرژی سرریز با ۳، ۵، ۱۰، ۱۵، ۲۰، ۳۵ و ۵۰ پله ساخته شد. همچنین جهت مطالعه اثر مقیاس آزمایش‌ها در دو فلوم با عرض‌های ۲۵ و ۵۰ سانتی‌متری انجام گرفتند. نتایج بدست آمده به شرح زیر می‌باشند:
- ۱- افزایش عرض پلکان‌ها تاثیری در میزان استهلاک انرژی در سرریزهای پلکانی ندارد.
 - ۲- افزایش شیب پلکان‌ها موجب افزایش افت انرژی خواهد شد.
 - ۳- افزایش تعداد پلکان‌ها تا مقدار مشخصی موجب افزایش استهلاک انرژی است که در شرایط معین این تعداد بهینه خواهد بود [۲۱].
- سلماسی و همکاران (۱۳۸۴) آزمایش‌هایی بر روی ۱۱ مدل فیزیکی از سرریزهای پلکانی با شیب‌های ۱۵، ۲۵ و ۴۵ درجه و با تعداد پله‌های ۳ الی ۵۰ انجام دادند. هدف تعیین محدوده وقوع رژیم جریان انتقالی بود. نتایج نشان داد که پارامترهای بی بعد شیب سرریز و $\frac{V_c}{h}$ (نسبت عمق بحرانی به ارتفاع پله) در تعیین محدوده رژیم جریان انتقالی موثر هستند. به طوری که دو منحنی حد بالای رژیم جریان ریزشی و حد پایین رژیم جریان غیرریزشی که معرف محدوده رژیم جریان انتقالی هستند، قابل ارایه می‌باشد. محدوده تعریفی در این پژوهش تقریباً با محدوده تعریفی توسط یاسودا و

اهاتسو منطبق است به استثنای اینکه اندکی به سمت راست متمایل گردیده و قابلیت آن را با نتایج

آزمایش‌های بیتس و لاوس، پیراس و همکاران بیشتر نموده است [۲۲].

حیدرزاده و بنی هاشمی (۱۳۸۴) ضمن معرفی اجمالی سرریزهای پلکانی، مطالعات صورت گرفته

بر روی سرریزهای پلکانی را مورد بحث و بررسی قرار دادند و به نتایج زیر دست یافتند :

۱- سرریزهای پلکانی در مقایسه با سرریزهای موجود، هنگام عبور آب از روی آن‌ها انرژی بیشتری

را مستهلک می‌کنند و موجب کاهش ابعاد حوضچه آرامش و هزینه‌های ساخت سد می‌شوند.

۲- سرریزهای پلکانی به علت هوادهی جریان ورودی، به مقدار زیادی از پدیده خللازایی

جلوگیری می‌کنند.

۳- شیب‌دار کردن پله‌ها، افزایش تعداد پله‌ها، ملایم‌تر کردن شیب سرریز و کاهش دبی موجب

افزایش استهلاک انرژی در این سرریزها می‌شوند.

۴- همخوانی روش ساخت سدهای بتن غلطکی با روش ساخت سرریزهای پلکانی، ساخت سریع،

ارزان، آسان و کاهش مشکلات خللازایی استفاده از این سرریزها را در سدهای بتن غلطکی

مقرون به صرفه‌تر ساخته است [۲].

کاویانپور و معصومی (۱۳۸۶) به منظور یافتن یک رابطه جهت محاسبه افت انرژی جریان عبوری از

روی یک شوت پلکانی، از نتایج شش سری آزمایش مختلف که بر روی ۵ مدل متفاوت انجام شده بود

استفاده نمودند. به این ترتیب متغیرهای مختلفی از قبیل هندسه و شیب سرریز، هندسه و ابعاد پله‌ها،

مقیاس مدل، دبی، سرعت و عمق جریان و به‌طور کلی مشخصات جریان ورودی به سرریز و جریان

عبوری از روی پلکان، در آزمایش‌های مختلف را مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها به منظور بدست آوردن

رابطه‌ای برای محاسبه افت انرژی از روی داده‌های آزمایشگاهی، ابتدا پراکنش انرژی جریان در حین

عبور از روی سرریز را محاسبه نمودند. در کنار آن، پارامترهای موثر در افت انرژی به وسیله آنالیز

ابعادی بی‌بعد شده و مقدار هر کدام در آزمایش‌ها گوناگون را به دست آوردند. سپس رابطه‌ای برای محاسبه افت کلی انرژی به صورت زیر به دست آمد.

$$\frac{\Delta E}{E_0} = (4.1 \times 10^3) \times \left(\frac{k_s}{D_h} \right)^{0.502} \times (Re)^{-0.214} \times (Fr)^{-1.297} \times (\tan \alpha)^{-0.145} \quad (21-2)$$

در این رابطه k_s = شاخص ارتفاع ناهمواری‌ها یا $k_s = h_s \cos \alpha$ ، D_h = قطر هیدرولیکی جریان،

$\frac{\Delta E}{E_0}$ = افت انرژی، Re = عدد رینولدز، Fr = عدد فرود و α = شیب کانال می‌باشند.

همچنین آن‌ها مقایسه‌ای را بین نتایج به دست آمده با نتایج دیگر محققین انجام دادند و به این نتیجه رسیدند که رابطه به دست آمده برای محاسبه افت انرژی بر روی سرریزهای پلکانی با ضریب رگرسیون ۰/۷۲ نسبت به روابط موجود بهتر و دقیق‌تر می‌باشد [۲۳].

حیدری ارجلو و همکاران (۱۳۸۷) با ساخت ۵۴ مدل از سرریزهای پلکانی در سه شیب ۲۱/۸، ۲۶/۵۶ و ۳۰ درجه و انجام آزمایش‌های متعدد با دبی‌های مختلف (حداقل دبی ۱۰ لیتر بر ثانیه در واحد عرض و حداکثر ۵۰ لیتر بر ثانیه در واحد عرض) به بررسی رفتار جریان بر روی سرریزهای پلکانی پرداختند. نتایج به صورت زیر می‌باشد :

۱- در تعداد پلکان‌های بالا و با تبدیل شدن جریان ریزشی به جریان غیرریزشی میزان افت انرژی نسبی در سرریز ۲۱/۸ درجه بیشتر از دو شیب دیگر می‌باشد. توجه این مطلب به این صورت می‌باشد که با افزایش شیب سرریز تبدیل جریان ریزشی به غیرریزشی سریع‌تر به وقوع می‌پیوندد و چون افت انرژی صورت پذیرفته در جریان ریزشی بیشتر از جریان غیرریزشی می‌باشد نمودار افت انرژی در شیب کمتر بالاتر از دو نمودار دیگر قرار می‌گیرد.

۲- تاثیر تعداد پلکان در دبی‌های مختلف متفاوت بوده و در دبی‌های بالا، تاثیر افزایش پلکان بر میزان افت انرژی بیشتر می‌باشد. با افزایش تعداد پلکان، میزان افت انرژی نسبی افزایش یافته

و با توجه به میزان دبی در تعداد پله مشخصی به حداکثر مقدار خود رسیده و از آن به بعد سیر نزولی از خود نشان می‌دهد.

۳- معادله‌ای برای شروع جریان غیرریزشی با استفاده از نتایج تحقیق و روابط تجربی ارایه شده و داده‌های سایر محققین به صورت زیر ارایه گردید [۱۸].

$$\frac{y_c}{h} = 1.204 - 0.463 \frac{h}{l} \quad (2-22)$$

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

روابط تجربی زیادی برای طراحی سرریزهای پلکانی ارایه شده است که هر کدام در شرایط مختلف و با دقت‌های متفاوتی می‌باشند. لذا طراح می‌بایست بهترین رابطه را در طراحی خود لحاظ نماید. بنابراین بررسی دقت روابط، دارای اهمیت فراوانی می‌باشد. جمشیدی و عطاری (۱۳۸۷) برای رسیدن به این هدف روابط مختلف هیدرولیکی را در طراحی سرریزهای پلکانی گردآوری نموده و سپس به بررسی و مقایسه نتایج روابط و نتایج حاصل از اندازه‌گیری‌های صورت گرفته بر روی مدل هیدرولیکی سرریز بالادست سد سیاه بیشه در مؤسسه تحقیقات آب، پرداختند. در این تحقیق، محدوده دبی برای تغییر رژیم جریان، پارامترهای مختلف هیدرولیکی، درصد استهلاک انرژی در جریان‌های ریزشی و غیرریزشی با استفاده از روابط مختلف در مورد خاص سرریز بالادست سد سیاه بیشه، محاسبه و سپس این مقادیر با نتایج اندازه‌گیری‌های مدل هیدرولیکی این سرریز مقایسه شده است. بررسی نتایج نشان می‌دهد که در محاسبه بعضی از پارامترها انطباق خوبی بین محاسبات و اندازه‌گیری‌ها وجود دارد و در بعضی دیگر اختلاف قابل ملاحظه‌ای دیده می‌شود [۲۴].

حیدری ارجلو و همکاران (۱۳۸۸) با ساخت ۵۴ مدل از سرریزهای پلکانی در سه شیب ۲۱/۸، ۲۶/۵۶ و ۳۰ درجه و انجام آزمایش‌های متعدد با دبی‌های مختلف (حداقل دبی ۱۰ لیتر بر ثانیه در واحد عرض و حداکثر دبی ۵۰ لیتر بر ثانیه در واحد عرض) به بررسی نحوه شکل‌گیری جریان بر روی مدل‌ها پرداختند. نتایج نشان داد که با افزایش نسبت (h/l) ، نسبت (y_c/h) کم می‌گردد.

این نکته بیانگر این موضوع می‌باشد که با افزایش شیب (h/l) سرریزهای پلکانی، جریان غیرریزشی زودتر به وقوع می‌پیوندد. همچنین با توجه به این نکته که میزان افت انرژی در جریان‌های غیرریزشی کمتر از جریان‌های ریزشی می‌باشد بنابراین با افزایش شیب سرریزهای پلکانی، میزان افت انرژی صورت پذیرفته در این سرریزها نیز کاهش می‌یابد. همچنین این محققین معادله‌ای برای شروع جریان غیرریزشی با استفاده از نتایج تحقیق و روابط تجربی ارائه شده و داده‌های سایر محققین به صورت زیر ارائه دادند [۱۹].

$$\frac{y_c}{h} = 1.204 - 0.463 \frac{h}{l} \quad (2-23)$$

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

حیدری ارجلو و همکاران (۱۳۸۸) با ساخت ۵۴ مدل از سرریزهای پلکانی در سه شیب ۲۱/۸، ۲۶/۵۶ و ۳۰ درجه به بررسی میزان افت در سرریزها و مقایسه میزان افت انرژی نسبی در زوایای مختلف (h/l) پرداختند. نتایج به صورت زیر می‌باشد:

۱- افت انرژی نسبی تابعی از دبی جریان (یا y_c) بوده و با افزایش دبی از مقدار افت انرژی نسبی کاسته می‌شود.

۲- با افزایش شیب سرریز از ۲۱/۸ به ۳۰ درجه، به ازای افزایش تعداد پلکان، میزان افت انرژی صورت پذیرفته در مدل‌ها سیر صعودی را نشان می‌دهد. این روند تا تعداد ۲۷ پله ادامه پیدا می‌کند و از آن به بعد میزان افت در شیب ۲۱/۸ درجه بیشتر از بقیه شیب‌ها می‌شود.

۳- درصد اختلاف افت انرژی نسبی بین شیب‌های ۲۶/۵۶ درجه و ۳۰ درجه کاهش می‌یابد. عامل این موضوع می‌تواند تاثیر ارتفاع پلکان باشد بدین صورت که هرچه تعداد پلکان‌ها در شیب‌های بیشتر، کمتر می‌شوند و در نتیجه تاثیر پلکان بر روی جریان و در نتیجه بر روی افت کمتر می‌شود [۲۵].

سلماسی (۱۳۸۸) ابتدا روش جدید طراحی سرریزهای پله‌ای مورد بررسی قرار داد و سپس بر اساس آن، تجزیه و تحلیل‌هایی در مورد اثر تعداد پله‌ها انجام داد. نتایج نشان می‌دهد که تاثیر افزایش تعداد پله‌ها در افزایش استهلاک انرژی تا یک حدی مثبت است و سپس روند کاهشی را نشان می‌دهد. به طوری که به ازای هر دبی و شیب مشخص، می‌توان یک تعداد پله تعیین کرد که میزان استهلاک انرژی جریان در حداکثر مقدار خود باشد (تعداد بهینه پله). همچنین با کاهش دبی طرح تعداد پله‌های بهینه نیز افزایش نشان می‌دهد [۲۶].

فتحی و همکاران (۱۳۸۸) با هدف بررسی محل هواگیری طبیعی در جریان غیر ریزشی، از مدل فیزیکی با انتخاب سه شیب تندآب در پایین دست تاج استفاده کردند. لذا در قسمت تندآب 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 متر مربع 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 به دلیل مختلف ایجاد 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 تندآب 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 تندآب 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 [۲۷].

حیدری ارجلو و موسوی جهرمی (۱۳۸۹) به بررسی میزان افت انرژی صورت گرفته در رژیم‌های جریان ریزشی و غیرریزشی پرداختند. آن‌ها ابتدا به بررسی زمان و نحوه شروع جریان

غیرریزشی در مدل‌های آزمایشگاهی پرداختند. سپس با توجه به داده‌های آزمایشگاهی حاضر و داده‌های سایر محققین و همچنین روابط تجربی ارایه شده در این زمینه، مرز بین دو رژیم جریان ریزشی و غیرریزشی در آزمایش‌ها را تخمین زدند. پس از مشخص کردن محدوده رژیم‌های جریان، به بررسی میزان افت انرژی صورت گرفته در نوع رژیم یاد شده پرداختند. نتایج حاصل از آزمایش‌ها بیانگر این موضوع بود که میزان افت انرژی صورت گرفته در رژیم جریان ریزشی بیشتر از رژیم جریان غیرریزشی است [۲۸].

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 پایین‌دست جهت تعیین افت انرژی، باعث برآورد بیشتر (غیر واقعی) افت انرژی نسبی می‌گردد. در واقع با ورود حباب‌های هوا به داخل جریان (کاهش لزجت) از میزان تنش برشی کاسته شده و نتیجتاً 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 [۲۹].

سرفراز و همکاران (۱۳۸۹) با استفاده از روابط تجربی ارایه شده برای محاسبه میزان استهلاک انرژی در سرریزهای پلکانی که هر کدام در محدوده خاصی از شرایط آزمایشگاهی و با دقت‌های متفاوتی بدست آورده شده‌اند، میزان استهلاک انرژی را با نتایج محاسباتی که مبتنی بر اندازه‌گیری بوده‌اند مورد مقایسه قرار دادند. برای ارزیابی روابط تجربی و محاسبه استهلاک انرژی، از ۴ مدل سرریز پلکانی ساخته شده در مؤسسه تحقیقات آب استفاده گردید. با در دست داشتن نتایج آزمایش‌های مدل که شامل دبی، سرعت جریان و عمق آب در پنجه می‌باشد، مقادیر استهلاک انرژی

محاسبه شده با روابط تجربی ارایه شده توسط محققین دیگر مقایسه گردید. نتایج به صورت زیر خلاصه شده‌اند :

- ۱- میزان استهلاک انرژی در جریان ریزشی و غیرریزشی با افزایش دبی جریان، کاهش می‌یابد.
- ۲- میزان استهلاک انرژی در جریان ریزشی بیشتر از غیرریزشی است.
- ۳- خطای نسبی در جریان غیرریزشی بیشتر از جریان ریزشی به دست آمد.
- ۴- در جریان ریزشی برای محاسبه میزان استهلاک انرژی، رابطه (۲-۲۴) کمترین خطای نسبی را در مقایسه با سایر روابط دارد.
- ۵- میزان استهلاک انرژی محاسبه شده از رابطه (۲-۲۴) در جریان ریزشی بیشتر از مقادیر اندازه‌گیری شده می‌باشد.

$$\frac{\Delta H}{H_{\max}} = 1 - \frac{\lambda + \frac{1}{2}\lambda^{-2}}{\frac{H_d}{d_c} + \frac{3}{2}} \lambda = \frac{\sqrt{2}}{\frac{3}{2\sqrt{2}} + \sqrt{\frac{h}{d_c} + \frac{3}{2}}} \quad (2-24)$$

$$\frac{d_c}{h} \leq \left\{ 0.57 \left(\frac{h}{l} \right)^3 + 1.3 \right\}^{-1} \frac{d_c}{h} \leq 0.89 - 0.4 \left(\frac{h}{l} \right)$$

$$\frac{d_c}{h} \leq 0.98 (55)^{\frac{h}{l}}$$

در این روابط $\frac{\Delta H}{H_{\max}}$ = میزان استهلاک انرژی، d_c = عمق بحرانی جریان، h = ارتفاع پله، l = طول پله و λ = ضریب معادله می‌باشند.

- ۶- در جریان غیرریزشی برای محاسبه میزان استهلاک انرژی، رابطه (۲-۲۵) کمترین خطای نسبی را در مقایسه با سایر روابط دارد.

- ۷- میزان استهلاک انرژی محاسبه شده از رابطه (۲-۲۵) در جریان غیرریزشی کمتر از مقادیر اندازه‌گیری شده می‌باشد.

$$\frac{\Delta H}{H_{\max}} = 1 - \frac{\left(\frac{d_w}{d_c}\right)^{-2} + 2\left(\frac{d_w}{d_c}\right) \cos \theta}{3 + 2\frac{H_d}{d_c}} \quad (25-2)$$

در این روابط $\frac{\Delta H}{H_{\max}}$ = میزان استهلاک انرژی، d_c = عمق بحرانی جریان، d_w = عمق آب خالص و θ = شیب کانال می‌باشند.

با توجه به موارد فوق، روابط تجربی توصیه شده، حداقل برای طراحی اولیه سرریزهای پلکانی از دقت قابل قبولی برخوردار می‌باشند. لیکن برای طراحی نهایی، آزمایش در مدل فیزیکی ضروری می‌باشد [۳۰].

حسنعلی پور و همکاران (۱۳۹۱) در آزمایشگاه هیدرولیک مؤسسه تحقیقات آب وزارت نیرو انجام دادند. مدل‌های ساخته شده از جنس پلکسی گلاس، از سرریزهای سد بالا (۲ سرریز) و سد پایین (۲ سرریز) سیاه بیشه که دارای مشخصات هندسی (پروفیل تاج، عرض آستانه، تعداد پله و شیب) متفاوت می‌باشند، مورد آزمایش قرار گرفتند. نتایج نشان می‌دهد که با افزایش نسبت h/l ، نسبت y_c/h کم می‌گردد. به این معنی که با افزایش شیب h/l در این گونه سرریزها، جریان غیرریزشی زودتر شروع خواهد شد [۱۶].

سعادت و اصغرزاده (۱۳۹۱) به بررسی شبیه‌سازی هیدرولیکی جریان از روی حوضچه آرامش سرریزهای پلکانی و اوجی و تاثیر پلکانی بودن سرریز در طول حوضچه آرامش نسبت به سرریز اوجی با استفاده از نرم افزار Flow – 3D پرداختند. ایشان برای صحت‌سنجی شبیه‌سازی‌های انجام شده از مدل‌های آزمایشگاهی استفاده کردند و سطح آزاد توسط نرم افزار شبیه‌سازی و با مدل آزمایشگاهی مقایسه شده است. در بررسی تاثیر پلکانی بودن سرریز در طول حوضچه آرامش نسبت به سرریز اوجی نوسانات اتلاف انرژی از ۱۵ تا ۶۷ درصد بوده است که در این صورت ابعاد حوضچه آرامش سرریزهای پلکانی در مقابل ابعاد حوضچه آرامش سرریزهای اوجی کاهش می‌یابد. با توجه به نتایج حاصل از

مقایسه مدل فیزیکی با نتایج عددی حاصل از اجرای برنامه Flow-3D مشاهده می‌شود که در مجموع با صرفه نظر کردن از برخی جزئیات این نرم افزار قابلیت مناسبی برای مدل سازی عددی دارد [۳۱].

فیل بند کشکولی و خراسانی‌زاده (۱۳۹۲) در مؤسسه تحقیقات آب و بر روی مدل سیاه بیشه با مقیاس ۱:۱۵ آزمایش‌هایی در خصوص سرعت و ارتفاع جریان در انتهای حوضچه آرامش برای سه نوع جریان ریزشی با دبی‌های ۱۵، ۲۰، ۳۰ و ۳۵ و غیرریزشی با دبی‌های ۶۰، ۷۰، ۹۰، ۱۲۰ و ۱۶۰ و تبدیلی با دبی‌های ۴۵ و ۵۰ به روی دو نوع حوضچه آرامش معمولی و ابتکاری پرداختند. نتایج به صورت زیر می‌باشد:

۱- برای هرگونه جریانی ارتفاع آب در انتهای حوضچه آرامش ابتکاری بیشتر از ارتفاع آب در حوضچه آرامش معمولی می‌باشد.

۲- سرعت در انتهای حوضچه آرامش ابتکاری کمتر از سرعت در نمونه معمولی آن می‌باشد.

۳- با توجه به نتایج بدست آمده می‌توان نتیجه گرفت که حوضچه آرامش ابتکاری دارای کارایی بهتری برای مستهلک کردن انرژی جریان می‌باشد [۳۲].

چانسون (۲۰۰۲) در یک شوت پلکانی مسطح و بزرگ (شیب = $3/4$ درجه) با مشابهت عدد فرود سه نوع جریان را مشاهده نمود: جریان ریزشی، انتقالی و غیرریزشی. اندازه‌گیری‌های مربوط به جریان هوا-آب انجام شد. نتایج نشان داد که وجود خصوصیات کامل از غلظت هوا و توزیع تعداد حباب تخمین درستی از افت انرژی را به دست می‌دهد. مقاومت جریان در حدود $2/5$ مرتبه بزرگتر از جریان در شوت پلکانی صاف می‌باشد. یک مقایسه در جریان بر روی سرریز صاف و معکوس نشان داد که هوادهی بیشتر و مدت زمان باقی ماندن قطرات در این هندسه رخ داده است. نتایج تاکید می‌کند که پتانسیل انتقال جرم هوا-آب در آبشارهای پلکانی حتی برای شیب‌های مسطح (شیب کمتر از ۵ درجه) هم وجود دارد [۳۳].

گنزالس و چانسون (۲۰۰۴) خصوصیات جریان هوا- آب در دو شوت پلکانی بزرگ مقیاس (شیب = ۳/۴ درجه و ۱۶ درجه) را همراه با اثر مقیاس و تعمیم نتایج به پروتوتایپ انجام دادند. هندسه پلکانی با شیب‌های ملایم برای سدهای خاکی و مسیره‌های آبی مغشوش مشابه بوده است. داده‌های آزمایشگاهی شامل توزیع غلظت هوا، سرعت جریان هوا- آب، تعداد حباب، شدت اغتشاش و طول خط حباب‌ها می‌باشند. برای یک فرود مشابه اثر مقیاس در هر دو مورد مشاهده شد. معیار مقیاس برای اثر مقیاس یک مسئله بحرانی است. در شوت ۱۶ درجه اختلاف اصلی مثلاً اثر مقیاس در سطح اغتشاش و اندازه خط حباب بود اگرچه این اثر برای مقیاس کوچک در کسر فضای خالی و توزیع سرعت مشاهده شد. همچنین تاکید شده است که برای شوت پلکانی بر اساس فرود مشابه حساسیت به اثر مقیاس بیشتر از مطالعات شوت وارونه و ساده می‌باشد [۳۴].

موسوی جهرمی و همکاران (۲۰۰۸) در دانشگاه شهید چمران به بررسی هیدرولیک جریان ریزشی با استفاده از مدل‌های عددی و آزمایشگاهی پرداختند. آن‌ها افت انرژی در جریان ریزشی را به دو قسمت تقسیم کردند و معادلات بدون بعد برای هر دو قسمت ارائه دادند. در سرریزهای پلکانی با شیب ملایم پرش هیدرولیکی کامل و ناقص می‌تواند تشکیل گردد. بنابراین افت انرژی پرش هیدرولیکی در معادلات وارد شده است. سپس ایشان برای ارزیابی صحت معادلات چندین آزمایش در آزمایشگاه هیدرولیک انجام دادند. آزمایش‌ها در دو مدل با شیب‌های ۱۵ و ۲۵ درجه انجام شد. در جریان ریزشی با دبی‌های بالا ($(Nh/y_c) < 15$)، معادله ارائه شده با چمنی و راجاراتنام تطابق بسیار مناسبی داشت. اثر پرش هیدرولیکی در معادلات حاضر با محققین قبلی در نظر گرفته نشده است. این نشان می‌دهد که در جریان ریزشی با دبی‌های جریان زیاد پرش هیدرولیکی تشکیل نمی‌گردد. بنابراین، افت فشار به واسطه پرش هیدرولیکی در مطالعات قبلی در نظر گرفته نشده است. به هر حال با افزایش Nh/y_c در دبی‌های جریان کمتر، پرش هیدرولیکی بر روی هر پله منحصرآ تشکیل می‌گردد و این مورد در این تحقیق در نظر گرفته شده است. در نهایت، ANSYS برای شبیه‌سازی

هیدرولیکی بر روی سرریزهای پلکانی به کار گرفته شد. نتایج نشان داد که ANSYS قابلیت مناسبی برای سرریزهای پلکانی با خطای کمتر از ۶ درصد را دارا می‌باشد [۳۵].

روشن و همکاران (۲۰۱۰) با مطالعه دو مدل فیزیکی ساخته شده به بررسی افت انرژی و رژیم‌های جریان برای دبی‌های مختلف بر روی سرریز پلکانی با تعداد پله‌های مختلف پرداختند. این مدل‌های فیزیکی دارای شیب کلی ۱۹/۲ درصد و با ۱۲ و ۲۳ عدد پله بودند. آزمایش‌ها برای محدوده گسترده‌ای از دبی‌ها انجام گرفت. پارامترهای هیدرولیکی جریان بر روی مدل‌ها اندازه‌گیری گردید و افت انرژی جریان محاسبه شد. نتایج نشان داد که سرریز ۱۲ پله‌ای افت انرژی بیشتری را در مقایسه با سرریز ۲۳ پله‌ای داشته است. به هر حال رژیم‌های جریان اتفاق افتاده در سرریز ۲۳ پله‌ای قابل قبول‌تر از سرریز ۱۲ پله‌ای بود. آزمایش‌ها نشان داد که افت انرژی در دبی‌های جریان کمتر در هر دو مدل مشابه بوده است. به هر حال در رژیم جریان غیرریشی در دبی‌های بیشتر افت انرژی در سرریز ۲۳ پله‌ای حدود ۱۲ درصد کمتر از سرریز ۱۲ پله‌ای بود [۳۶].

انوار و درماوان (۲۰۱۱) به بررسی یک مدل فیزیکی برای ارزیابی سرریز Dawuan در شرق Situbondo پرداختند که این سرریز ساده و دارای شیب ۷۲ درجه بوده است و با سرریز پلکانی مورد مقایسه قرار گرفت. سرریز پلکانی نیز دارای شیب ۷۲ درجه و ۳۲ عدد پله بود. این تحقیق به بررسی موقعیت پرش هیدرولیکی در سرریز صاف و پلکانی پرداخته است. مدل سرریز صاف و پلکانی در آزمایشگاه با ۱۰۰ متر ارتفاع، ۳۰ سانتی‌متر عرض و ۵ دبی مختلف اجرا شده است. نتایج نشان داد که طول پرش هیدرولیکی در سرریز پلکانی ۳۲ پله‌ای حدود ۴۷/۶۱٪ کاهش پیدا کرده است. درصد افت انرژی سرریز پلکانی نیز در حدود ۹۲/۵۹٪ بوده است [۳۷].

دستغیب و همکاران (۲۰۱۲) با استفاده از یک مدل عددی، جریان بر روی شکل‌های مختلف سرریز پلکانی را بررسی نمودند و نتایج را مورد مقایسه قرار دادند. مدل با داده‌های آزمایشگاهی کالیبره شد. محاسبات دینامیکی مایع با حل جفت معادلات RANS با الگوریتم surface-capturing که

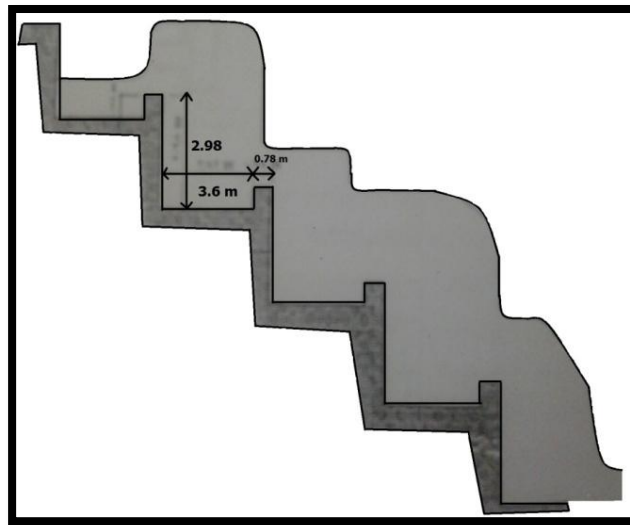
ویژگی‌های اصلی جریان آب را پیش‌بینی می‌کند انجام گرفت. این تحقیق شامل تعیین سطح آب، پیشرفت جریان گردابی و فشار بر روی پله‌ها بود. مدل با استفاده از روش احجام (VOF) انجام گرفت. در این تحقیق سرعت جریان در انتهای سرریز و نرخ افت انرژی با ارتفاع پله‌ها مقایسه شد. مدل آشفتگی RNG برای محاسبه لزجت گردابی استفاده گردیده است. همچنین ساختار شبکه‌ای هیبریدی با استفاده از هندسه سرریز پلکانی شامل بالادست، پله‌ها و پایین‌دست انجام گرفت. تطابق بین نتایج عددی و آزمایشگاهی نشان داد که مدل آشفتگی RNG و روش VOF برای پیش‌بینی سطح آب در سرریزهای پلکانی مناسب می‌باشد. این تحقیق قابلیت مدل عددی با استفاده از تکنیک VOF برای پیش‌بینی تغییرات جریان بر روی سرریز پلکانی پیچیده را نشان می‌دهد [۳۸].

امینی و اتوما (۲۰۱۲) به بررسی افت انرژی جریان بر روی زوایای مختلف پرداختند. مدل‌های فیزیکی با زوایای متنوع که هر مدل نماینده یک زاویه بود در کانال مستطیلی ساخته شد. پارامترهای هیدرولیکی جریان اندازه‌گیری شدند و افت انرژی محاسبه شد. این تحقیق نشان داد که افت انرژی با افزایش دبی کاهش می‌یابد. همچنین عمق پایین‌دست به واسطه کاهش زاویه از ۹۰ درجه کاهش یافت. شیب با تغییرات واضح به ۴۵ و ۴۰ رسید. نتایج نشان داد که افت انرژی بهینه در شیب‌های ۴۰ و ۴۵ درجه می‌باشد. افت انرژی در پایین‌دست، کانال آبیاری و تولیدات غذایی را ایمن نگه داشته است. همچنین نتایج نشان داد که کانال آبیاری با ذخیره بهینه آب برای تولید محصولات بیشتر در شیب‌های ۴۰ و ۴۵ درجه بوده است [۳۹].

۲-۷- مروری بر آزمایش‌های انجام گرفته بر روی سرریزهای پلکانی شیب‌دار و لبه‌دار

در سال‌های اخیر به علت تمایل روزافزون طراحان به استفاده از سرریزهای پلکانی، محققین نیز در صدد افزایش کارایی این سرریزها برآمده و تحقیقات زیادی را در این زمینه انجام داده‌اند که از جمله

آن‌ها تلاش، جهت افزایش میزان استهلاک انرژی می‌باشد. از جمله مواردی که می‌تواند به افزایش میزان استهلاک انرژی کمک نماید استفاده از لبه یا آستانه روی پله‌ها و همچنین شیب‌دار نمودن پله‌ها می‌باشد. اولین بار پله‌های استخری در زمان رومیان مورد استفاده قرار گرفته است (شکل ۲-۱). اما تحقیقات علمی که روی آن‌ها صورت گرفته به سال‌های اخیر باز می‌گردد.



شکل ۲-۱۰- آبشارهای پلکانی در گذرگاه‌های ناوهای رومی - پلکان آندریاکی، [۱]

بارانی و صدری (۱۳۸۲) آزمایش‌هایی را بر روی مدل سرریز پلکانی سد مانکسویل^۱ با مقیاس ۱:۲۵ انجام دادند. این سرریز از جنس چوب ساخته شده بود و توسط چند سری قطعه مثلی شکل در زوایای ۱۵، ۲۶، ۳۶ و ۴۵ درجه به صورت شیب‌دار در آمد و آزمایشاتی در محدوده دبی ۰/۷۸ تا ۱۰ لیتر بر ثانیه بر روی این سرریز انجام گرفت. با توجه به نتایج آزمایش‌ها مشخص شد که پله‌های شیب‌دار افت انرژی بیشتری را نسبت به پله‌های مسطح ایجاد می‌کنند و همچنین با افزایش شیب کف پله‌ها از صفر تا ۴۵ درجه، میزان افت انرژی هم افزایش می‌یابد [۴۰].

¹ Manksoil Dam

بارانی و همکاران (۱۳۸۲) به منظور بررسی استهلاک انرژی بر روی سرریز پلکانی، از مدل سرریز پلکانی آزمایشگاه هیدرولیک دانشگاه شهید باهنر کرمان که با شیب ۴۱ درجه ساخته شده بود استفاده نمودند. استهلاک انرژی در روی این مدل در دو حالت، پله‌های بدون لبه و پله‌های لبه‌دار با ضخامت‌های ۱، ۱/۵، ۲، ۳ و ۴ سانتی‌متر اندازه‌گیری گردید. نتایج به صورت زیر خلاصه شده است :

۱- با افزایش دبی، هم در سرریز پلکانی ساده و هم لبه‌دار میزان افت انرژی کاهش می‌یابد.

۲- هر چه تعداد پله‌ها افزایش یابد میزان استهلاک انرژی نیز افزایش می‌یابد.

۳- همچنین میزان استهلاک انرژی در حالت لبه‌دار شدن پله‌ها نسبت به حالت بدون لبه افزایش نشان می‌دهد و لبه با ضخامت ۲ سانتی‌متری نسبت به سایر لبه‌ها مناسب‌تر است.

۴- با اضافه کردن لبه به نوک هر پله، هر پله به شکل یک حوضچه عمل می‌کند و با افزایش ضخامت لبه شروع جریان لغزشی در دبی‌های بالاتر صورت می‌گیرد.

آن‌ها روابط زیر را بر اساس اطلاعات آزمایشگاهی، شروع جریان لغزشی و زمانیکه جریان آزاد همراه با پرش هیدرولیکی کامل رخ می‌دهد را به صورت تابعی از عمق آب بالادست y_1 و ضخامت لبه پله‌ها L_E و ارتفاع پله h ارایه نمودند [۴].

$$\frac{Y_1}{h} = 0.1204 \frac{L_E}{h} + 0.5819 \quad (26-2)$$

$$\frac{Y_1}{h} = 0.2139 \frac{L_E}{h} + 0.3392 \quad (27-2)$$

جعفری‌نیا و موسوی جهرمی (۱۳۸۴) در این تحقیق از داده‌های خام چمنی (۲۰۰۲) استفاده نمودند. این داده‌ها در دو گروه الف و ب تقسیم‌بندی شدند. در گروه الف تعداد پلکان‌ها از ۸ تا ۳۰ عدد متغیر بود. همچنین تغییرات ارتفاع کل مدل سرریز بین ۸۷/۱ سانتی‌متر تا ۳۵۹/۴۲ سانتی‌متر است. نسبت ارتفاع هر پله به طول هر پله در این سری از داده‌ها برابر با ۰/۸۴۲، ۰/۷۳۶، ۰/۶۳۱، ۰/۵۲۶ و ۰/۴۲۱ بود. آزمایش‌های مربوط به داده‌های گروه ب فقط با تعداد پلکان‌های ۱۰ و ۳۰ عدد

بود. میزان تغییرات ارتفاع کل سرریز برای این داده‌ها بین ۸۷/۱ تا ۱۷۷/۸ سانتی‌متر می‌باشد. نسبت ارتفاع پله به طول هر پله مانند سری الف می‌باشد.

آن‌ها با استفاده از نرم افزار SPSS و تکنیک رگرسیون چند متغیره روابط زیر را برای سرریز با شیب صاف و معکوس بدست آوردند.

$$\frac{\Delta E}{Eu} = 0.8n^{0.063} \alpha^{0.104} \left(\frac{y_c}{h}\right)^{-0.021} \left(\frac{h}{l}\right)^{-0.0075} \quad (28-2)$$

$$\frac{\Delta E}{Eu} = 0.8n^{0.05} \phi^{0.0027} \alpha^{0.088} \left(\frac{y_c}{h}\right)^{0.024} \left(\frac{h}{l}\right)^{-0.016} \quad (29-2)$$

در این روابط $\frac{\Delta E}{Eu}$ = افت انرژی، n = تعداد پله ها، α = ضریب افت انرژی برای هر پلکان، y_c = عمق بحرانی، h = ارتفاع پله و l = طول پله و ϕ = زاویه شیب معکوس می‌باشند.

نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که وجود پلکان‌ها تاثیر قابل ملاحظه‌ای در استهلاک انرژی دارند به طوری که با افزایش تعداد آن‌ها به میزان قابل توجهی افت انرژی نسبی افزایش می‌یابد. همچنین زیاد شدن شیب معکوس پله‌ها در رژیم ریزشی افت انرژی بیشتری را به همراه خواهد داشت ولی در رژیم غیرریزشی تاثیر چندانی بر روی افت انرژی نخواهد داشت [۴۱].

منصوری و پدرام (۱۳۸۷)، با آزمایش بر روی سرریز پلکانی لبه‌دار میزان استهلاک انرژی را در این نوع سرریزها مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها از سرریزی با ۲۳ پله از جنس پلکسی گلاس با ضخامت ۱۰ میلی‌متر با طول پله ۱۷ سانتی‌متر، عرض ۵۵ سانتی‌متر و ارتفاع ۳ سانتی‌متر استفاده نمودند که از بالا به فلومی با اسکلت فلزی و دیواره‌های پلکسی گلاس متصل بود.

آن‌ها آزمایش‌های خود را با دو دبی ۳/۶ لیتر بر ثانیه (جریان ریزشی) و ۲۵ لیتر بر ثانیه (جریان غیرریزشی) انجام دادند و فشار استاتیکی وارد بر کف و نوسانات آن به همراه سرعت و عمق جریان را برداشت نمودند.

با توجه به نتایج آزمایش‌ها مشخص شد که وجود لبه بر میزان افت انرژی در سرریزهای پلکانی تاثیر دارد اما این تاثیر در جریان ریزشی و غیرریزشی متفاوت است و با افزایش دبی این اثر کاهش می‌یابد. در رژیم جریان ریزشی عرض، ارتفاع و زاویه بالادست لبه بر میزان افت انرژی تاثیر دارند و افزایش عرض و ارتفاع لبه‌ها میزان افت انرژی را افزایش می‌دهند و هر چه زاویه بالادست لبه کاهش یابد افت انرژی نیز کم می‌شود و بدین ترتیب لبه قائم نسبت به لبه منحنی افت انرژی بیشتری ایجاد می‌نماید. اما در رژیم غیرریزشی تاثیر لبه‌ها بر میزان افت انرژی ناچیز می‌باشند و این تاثیر ناچیز به علت ارتفاع لبه‌ها می‌باشد. همچنین رابطه چمنی و چانسون را برای تعیین میزان تاثیر لبه اصلاح نمودند [۴۲].

$$\frac{\Delta H}{H_{\max}} = 1 - \frac{\left\{ (1-\alpha)^N \left[1 + 1.5 \left(\frac{h_c}{h_s} \right) \right] + \sum_{i=1}^{N-1} (1-\alpha)^N \right\}}{N + 1.5 \left(\frac{h_c}{h_s} \right)} \quad (30-2)$$

$$\alpha = a - b \log \left(\frac{h_c}{h_s} \right) + c$$

$$a = 0.3 - 0.35 \left(\frac{h_s}{l_s} \right)$$

$$b = 0.54 + 0.27 \left(\frac{h_s}{l_s} \right)$$

$$c = \left(1 - \frac{0.025}{\tan^2 \beta} \right) \left[0.35 \log \left(1 + \frac{0.4(x + 2s)}{h_c} \right) \right]$$

h_s = ارتفاع پله، D_H = عمق هیدرولیکی جریان، N = تعداد پله‌ها، α = ضریب افت انرژی روی هر

پله، $\frac{\Delta H}{H_{\max}}$ = افت انرژی، h_c = عمق بحرانی و a, b = ضرایبی توصیفی معادله می‌باشند.

شمسای و صداقت‌نژاد (۱۳۸۸)، سه نوع سرریز پلکانی را به شرح زیر مورد استفاده قرار دادند :

۱- نوع ۱: سرریز پلکانی معمولی با ارتفاع کل ۴۰ سانتی‌متر. به علت اینکه ممکن بود پله آخر غرقاب گردد این محققین یک پله ۱۰ سانتی‌متری را به آخر سرریز به عنوان پله غرقاب اضافه نمودند. همچنین برای آرام شدن جریان پیش از ورود به سرریز ۱۰ سانتی‌متر به طول کف پله اول اضافه نمودند.

۲- نوع ۲: در این نوع سرریز تعداد پله‌ها از ۴۰ عدد به ۴ عدد کاهش یافت و ارتفاع هر پله نیز ۱۰ سانتی‌متر بود.

۳- نوع ۳: مانند حالت قبلی ارتفاع سرریز و طول کف پله ثابت بوده اما تعداد پله به ۵ پله با ارتفاع ۸ سانتی‌متر رسید.

این محققین از لبه‌هایی با ارتفاع‌های ۱، ۲/۵ و ۵ سانتی‌متر برای سرریز نوع ۲ و لبه‌هایی با ارتفاع‌های ۰/۸، ۲ و ۴ سانتی‌متر برای سرریز نوع ۳ استفاده نمودند.

شمسای و صداقت‌نژاد پس از تحلیل اطلاعات آزمایشگاهی رابطه زیر را برای تعیین میزان افت انرژی در سرریزهای پلکانی لبه‌دار ارائه نمودند:

$$\frac{E_L}{E_0} = \eta \ln\left(\frac{d_c}{h}\right) + \xi \quad (2-31)$$

که مقدار ضرایب عبارتند از:

$$\eta = -0.0054\left(\frac{h}{m} \times \frac{h}{l}\right)^2 + 0.0487\left(\frac{h}{m} \times \frac{h}{l}\right) + 0.7791$$

$$\xi = -0.0012\left(\frac{h}{m} \times \frac{h}{l}\right)^2 + 0.0112\left(\frac{h}{m} \times \frac{h}{l}\right) - 0.0504$$

در این روابط $\frac{E_L}{E_0}$ = افت انرژی، d_c = عمق بحرانی، h = ارتفاع پله، l = طول پله، m = ارتفاع ایجاد

شده توسط شیب یا لبه، η و ξ = ضریب می‌باشند.

نتایج به‌دست آمده توسط این محققین به صورت زیر خلاصه شده است:

۱- رابطه ارایه شده توسط چیناراسری و ونگ وایز برای پله‌های افقی به علت ایجاد عدد بزرگتر از ۱ برای میزان افت انرژی صحیح نمی‌باشد.

۲- در صورت استفاده از پله‌های افقی و بدون لبه، سرریز با شیب ۱:۳ بیشترین کارایی را از نظر افت انرژی خواهد داشت.

۳- با افزایش ارتفاع لبه‌ها، میزان استهلاک انرژی افزایش می‌یابد.

این محققین همچنین اثر نیرو روی لبه‌ها را بررسی نمودند و بیان داشتند که بهترین حالت سرریز از نظر هیدرولیکی و هندسه که دارای بیشترین میزان افت انرژی و کمترین میزان نیروی وارد به لبه‌ها باشد، سرریز لبه‌دار با ارتفاع لبه ۰/۲۵ ارتفاع پله می‌باشد. همچنین بیان داشتند که با نصب لبه‌ها بر روی پله‌ها، نسبت به حالت بدون لبه، میزان استهلاک انرژی در حدود ۵ تا ۱۰ درصد افزایش می‌یابد [۴۳].

ترابی و همکاران (۱۳۸۹) با استفاده از ۱۲ سری آرایش متفاوت، اثر شیب‌های معکوس در پله‌های سرریز پلکانی را مورد بررسی قرار دادند. این آزمایش‌ها با استفاده از یک مدل آزمایشگاهی از جنس پلکسی گلاس با ارتفاع تاج ۷۲ سانتی‌متر از کف فلوم تحقیقاتی و در دبی‌های متفاوت مورد بررسی قرار گرفته‌اند. با توجه به نتایج آزمایش‌ها مشخص شد که با افزایش دبی و افزایش تعداد پلکان‌ها و در نظر گرفتن شیب معکوس پلکان‌ها افت انرژی افزایش یافته است. با این حال، نمی‌توان تعداد موانع و یا شیب پلکان‌ها را به صورت نامحدود و بدون توجه به مسائل هیدرولیکی جریان افزایش داد، چرا که بالاترین میزان افت انرژی لزوماً در بیشینه تعداد پلکان‌های شیب‌دار رخ نداده است [۴۴].

حامدی و همکاران (۱۳۹۰) در مؤسسه تحقیقات آب بر روی مدل سرریز پلکانی از جنس پلکسی گلاس با ضخامت ۱۰ میلی‌متر که دارای سرریز لبه پهن می‌باشد آزمایش‌هایی را انجام دادند. این سرریز دارای ۶۰ پله بوده و طول هر پله ۱۴ سانتی‌متر، ارتفاع هر پله ۴/۶۶ سانتی‌متر، عرض سرریز

۱۳۳ سانتی‌متر و همچنین ارتفاع سرریز لبه پهن تا اولین پله ۵/۱ سانتی‌متر بوده است. جهت انجام این تحقیق ۴ پله دارای شیب معکوس گردیدند که شیب‌های مورد استفاده ۷، ۱۰ و ۱۲ درجه بوده اند. دبی‌های مورد استفاده در این تحقیق ۲۰، ۲۵، ۳۰ و ۳۵ لیتر بر ثانیه بودند که همگی از نوع ریزشی می‌باشند. نتایج نشان داد که با افزایش دبی هم در پله‌های افقی و هم در پله‌های شیب‌دار میزان افت انرژی کاهش می‌یابد. همچنین نتایج نشان دادند که با اعمال شیب معکوس روی پله‌ها میزان افت انرژی نسبت به حالت پله‌های افقی افزایش می‌یابد و با افزایش میزان شیب معکوس نیز افت انرژی افزایش می‌یابد. اما روند این افزایش چندان زیاد نمی‌باشد [۴۵].

فولادی‌پناه و جعفری‌نیا (۱۳۹۰) تاثیر شیب معکوس پله‌ها بر روی افت انرژی را مورد بررسی قرار دادند. برای این منظور دو مدل مورد استفاده قرار گرفت. مدل ۱ با تعداد پله‌های ۸ تا ۳۰، ارتفاع سرریز بین ۸۷۱ تا ۳۵۴/۲ میلی‌متر و با شیب‌های ۰/۴۲۱، ۰/۵۲۶، ۰/۶۳۱، ۰/۷۳۶ و ۰/۸۴۲، و مدل ۲ با تعداد پله‌های ۱۰ و ۳۰، ارتفاع سرریز بین ۸۷۱ تا ۱۷۷۸ میلی‌متر و با شیب‌های مساوی با مدل ۱ تحت رژیم جریان ریزشی و غیرریزشی برای جمعآوری داده‌های مورد نیاز ساخته شدند.

خلاصه نتایج در زیر آمده است :

- ۱- تعداد پله‌ها و افت انرژی رابطه عکس با یکدیگر دارند.
- ۲- افت انرژی در رژیم غیرریزشی بیشتر از رژیم ریزشی است.
- ۳- شیب معکوس پله‌ها تاثیر چشمگیری بر روی افت انرژی دارد. مقدار زاویه شیب معکوس رابطه مستقیمی با افت انرژی دارد.
- ۴- تاثیر شیب معکوس در رژیم ریزشی به شدت کاهش می‌یابد به طوری که در نهایت، تاثیری در افت انرژی نخواهد داشت [۴۶].

سلماسی و ارونقی (۱۳۹۲) به منظور بررسی اثر شیب سرریز در استهلاک انرژی، آزمایش‌هایی بر روی ۱۲ مدل فیزیکی از سرریزهای پلکانی با شیب‌های ۱۵، ۲۵ و ۴۵ درجه و تعداد پله‌های ۵، ۱۰ و ۱۵ انجام دادند. نتایج به صورت زیر می‌باشد :

۱- با افزایش دبی استهلاک انرژی نسبی کاهش می‌یابد.

۲- افزایش شیب سرریز باعث افزایش استهلاک انرژی می‌گردد که علت آن افزایش اندازه حرکت تبدالی بین جریان چرخشی زیر هر پله و جریان غیرریشی می‌باشد.

۳- آنالیز رگرسیون چند متغیره نشان داد که از بین پارامترهای بی‌بعد موجود، شیب سرریز و عدد رینولدز در تخمین استهلاک انرژی جریان مهم‌تر بقیه می‌باشند [۴۷].

آبشارها و شوت‌های پلکانی برای دبی آب برای سدها و یا شیب‌های تند استفاده می‌شوند. پله‌ها به صورت پی در پی باعث افت انرژی می‌شوند. پله‌ها باعث ورود هوا به داخل جریان شده و جریان آب- هوا شکل می‌گیرد. اگر پله‌ها به عنوان حوضچه‌های آرامش برای افت انرژی طراحی گردند سرریز پلکانی استخری نامیده می‌شوند. آیگنر طراحی هیدرولیکی این ساختارها را در این تحقیق مورد بررسی قرار داده است. برای یک دبی فرضی که دارای y_c ثابت است و ارتفاع پله نیز h می‌باشد عمق ثانویه پرش هیدرولیکی y_2 بر اساس انرژی کل وارد بر پله به صورت زیر محاسبه می‌گردد :

$$E_0 = h + w + y_0 + \frac{y_c^3}{2(w + y_0)} \quad (32-2)$$

در این رابطه E_0 = افت، y_0 = عمق جریان روی سرریز، w = ارتفاع سرریز و $\frac{y_c^3}{2(w+y_0)}$ = هد به

علت ورودی جریان می‌باشند. حاشیه ایمنی به میزان ۵٪ پیشنهاد شده است بنابراین :

$$w = 1.05y_2 - h$$

$$l = l_s + l_w$$

در این روابط l = طول پله، l_s = عمق پرتاب جت از پایین دست، l_w = طول پرش هیدرولیکی که

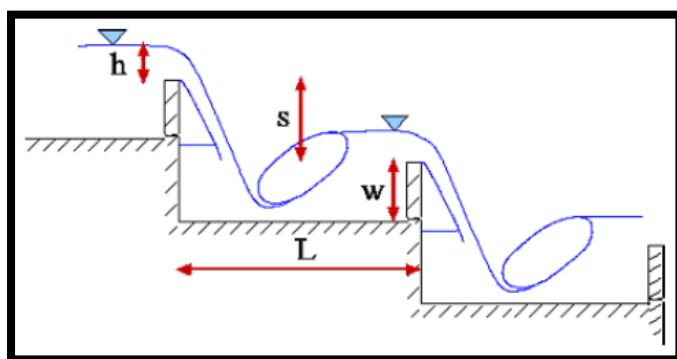
همیشه برابر $6y_2$ است.

$$\tan \theta \rightarrow 0.1 - 0.5$$

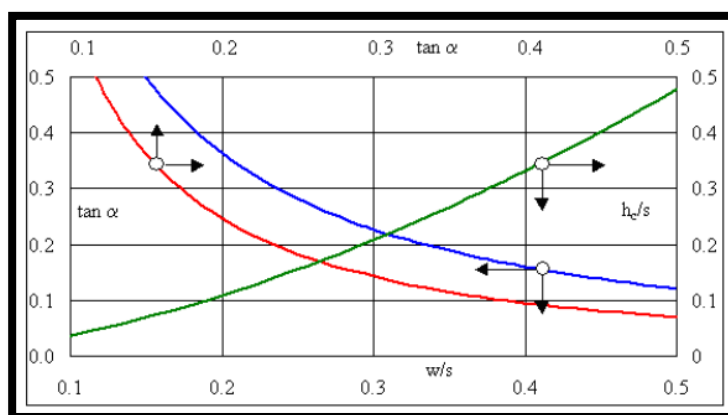
$$\frac{w}{h} \rightarrow 0.1 - 0.5 \quad \frac{y_c}{h} \rightarrow 0 - 0.5$$

در این روابط θ = شیب کانال، w = ارتفاع لبه، h = ارتفاع جریان عبوری از روی لبه و y_c = عمق

بحرانی می‌باشند.



شکل ۲-۱۱- آبشار پلکانی [۹]



شکل ۲-۱۲- طراحی آبشار پلکانی [۹]

زمانی قادر به استفاده از این نمودار خواهیم بود که دبی و شیب سرریز مشخص باشد برای بازه‌های

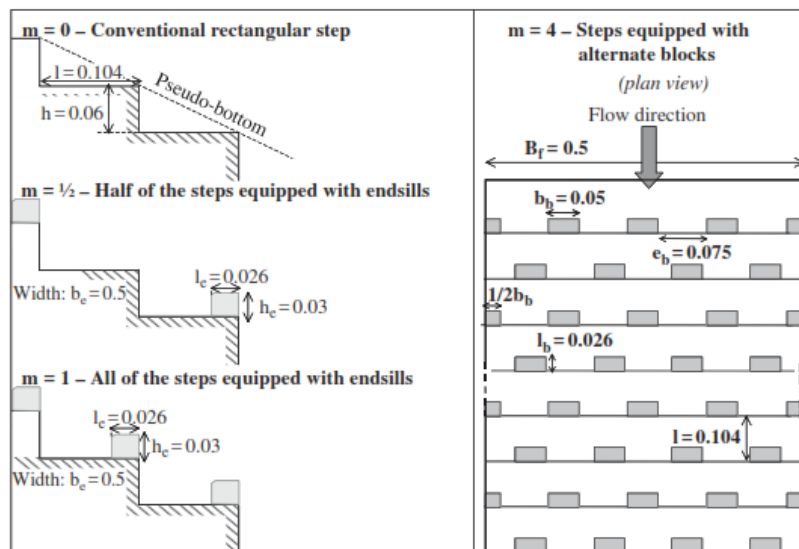
خارج از محدوده قادر به طراحی نخواهیم بود [۹].

چیناراسری و ونگ وایز (۲۰۰۴) تحقیقاتی در مورد رژیم‌های جریان و افت انرژی بر روی شوت‌ها

با پله‌های شیب‌دار رو به بالا انجام دادند. آن‌ها نتیجه گرفتند که پله‌های شیب‌دار افت انرژی را

افزایش می‌دهد و سرعت جریان خروجی را تا ۱۰ درصد کاهش می‌دهند [۴۸].

آندره و همکاران (۲۰۰۴) این تحقیق را به منظور افت انرژی و نیروهای هیدرودینامیکی جریان هوادار بر روی یک سری لبه‌های تعبیه شده بر روی پله‌ها انجام دادند. این تحقیق در آزمایشگاه هیدرولیک (LCH-EPFL) انجام شده است. نتایج اخیر امکان مقایسه راندمان پله‌های معمولی، پله‌های مجهز به لبه انتهایی و پله‌های مجهز به بلوک‌های مستطیلی به صورت یک در میان برای شوت با شیب ۳۰ درجه برای تخمین نیروها را می‌دهد. شکل زیر انواع قرارگیری این لبه‌ها بر روی پله‌ها را نشان می‌دهد.



شکل ۲-۱۳- انواع لبه‌های مورد استفاده و حالت‌های قرارگیری آن‌ها [۴۹]

افت انرژی ۴ پوشش زبری برای پله‌های معمولی، تمام پله‌ها با لبه انتهایی، هر دو پله با لبه انتهایی و تمام پله‌ها با بلوک‌های مستطیلی به صورت یک در میان برای شوت ۳۰ درجه و با استفاده از روش پرش هیدرولیکی مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج نشان داد که اثرات فرم کشیده یک منبع مناسب برای افت انرژی می‌باشد. بنابراین سیستم کاهنده بلوک‌های یک در میان به منظور کاهش انرژی باقی مانده در پنجه یک سد خاکی یا سرریز مفید می‌باشد. یک نمونه آزمایشی برای دبی در واحد عرض

۷/۶ بر روی شوت ۳۰ درجه با پوشش ۴ بلوک بر روی هر پله (۵۰ سانتی متر عرض، ۲۶ سانتی متر طول و ۳۰ سانتی متر ارتفاع بلوک مستطیلی در ۷۵ سانتی متر فاصله)، محدوده افت انرژی در حدود ۸۰ درصد با محدوده ۳۵ درصد ولی برای شوت ساده مشابه مقایسه شد.

نوسانات فشار منفی و ماکزیمم بر روی بلوکها و بر روی پلهها اندازه گیری شد ولی به اندازه کافی قابل رفع کردن برای تولید کاویتاسیون یا غیر ثابت کردن بلوکها نبود [۴۹].

بارانی و همکاران (۲۰۰۵) به بررسی افت انرژی بر روی سرریزهای پلکانی با انواع مختلف پله پرداختند. یک مدل فیزیکی از جنس چوب در آزمایشگاه هیدرولیک دانشگاه باهنر کرمان ساخته شد. این مدل دارای مشخصات، شیب ۴۱٫۴۱ درجه، ارتفاع کل ۸۴ سانتی متر، ۲۱ عدد پله، ارتفاع هر پله ۴ سانتی متر، عرض هر پله ۳۰ سانتی متر و طول ۴/۵ سانتی متر می باشد. آزمایشها بر روی شکل های مختلفی از پلهها (ساده، لبه دار با ضخامت ۱، ۲، ۳ و ۴ سانتی متر و شیب دار معکوس با شیب های ۱۵، ۲۶، ۳۶ و ۴۵ درجه) انجام گرفت. نتایج به صورت زیر خلاصه شده است :

۱- افت انرژی جریان بر روی سرریز پلکانی لبه دار و شیب دار بیشتر از سرریز پلکانی ساده می باشد.

۲- افت انرژی جریان با افزایش ضخامت لبهها و اندازه شیب معکوس افزایش می یابد.

۳- مقایسه افت انرژی بر روی سرریز پلکانی لبه دار و شیب دار نشان داد که سرریز با پله های شیب دار افت انرژی بیشتری را در مقایسه با سرریز پله ای لبه دار معادلش نشان می دهد.

۴- همچنین برای سرریزهای پلکانی با انواع مختلفی از شکل های پله افت انرژی با افزایش دبی جریان کاهش می یابد.

۵- برای سرریز پلکانی بزرگ با دبی های جریان بیشتر نوع شیب دار موثر از انواع دیگر می باشد [۵۰].

چیناراسری و ونگ وایزرز (۲۰۰۶) طی آزمایش‌هایی بر روی سرریزهای پلکانی شیب‌دار، لبه‌دار و ساده به نتایج و روابط جالبی دست یافتند. آن‌ها به این نتیجه رسیدند که شیب‌دار نمودن پله‌ها می‌تواند استهلاک انرژی را تا ۱۰٪ افزایش دهد. آن‌ها شیب‌های ۱۰، ۲۰ و ۳۰ درجه را آزمایش نمودند. همچنین با آزمایش لبه روی پله‌ها نتیجه گرفتند که لبه‌ها نیز بر روی استهلاک انرژی موثر می‌باشند و هر چه ارتفاع لبه‌ها افزایش یابد استهلاک انرژی بیشتر می‌گردد. آن‌ها لبه‌هایی با ارتفاع ۵، ۱۰ و ۱۵ میلی‌متر را آزمایش نمودند و نتیجه گرفتند که تاثیر لبه بیشتر از تاثیر شیب بر افزایش میزان استهلاک انرژی می‌باشد. این محققین همچنین بیان داشتند که هر چه تعداد پله‌ها بیشتر گردد میزان استهلاک انرژی نیز افزایش می‌یابد.

چیناراسری و ونگ وایزرز با اطلاعات بدست آمده از آزمایش‌ها رابطه زیر را برای تعیین میزان افت انرژی در سرریزهای پلکانی شیب‌دار و لبه‌دار ارائه نمودند :

$$\frac{E_L}{E_0} = \eta \left(\frac{d_c}{h} \right)^\xi \quad (2-33)$$

که برای پله‌های شیب‌دار :

$$\eta = -0.034 \ln\left(\frac{h}{m} \times \frac{h}{l}\right) + 0.767$$

$$\xi = -0.015 \ln\left(\frac{l}{m}\right) - 0.216$$

و برای پله با لبه‌های انتهایی :

$$\eta = -0.028 \ln\left(\frac{h}{m} \times \frac{h}{l}\right) + 0.812$$

$$\xi = -0.030 \ln\left(\frac{l}{m}\right) - 0.149$$

اثر تعداد پله :

$$\frac{E_L}{E_0} = 1.10 \exp\left(-9.98 \frac{d_c}{Nh}\right) \quad (2-34)$$

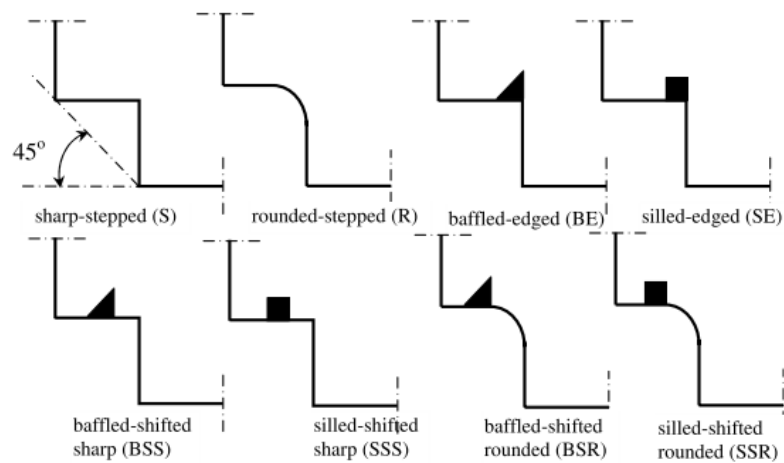
در این روابط $\frac{E_L}{E_0}$ = افت انرژی، d_c = عمق بحرانی، h = ارتفاع پله، l = طول پله، m = ارتفاع ایجاد شده توسط شیب یا لبه، N = تعداد پله و η و ξ = ضریب می‌باشند [۵۱].

کاروالهو و همکاران (۲۰۰۹) این تحقیق را بر پایه پرش هیدرولیکی بر روی پله‌های یک سرریز پلکانی به صورت آزمایشگاهی و عددی مورد بررسی قرار دادند. با استفاده از فرمول کلاسیک هیدرولیک، یک نمونه مفهومی طراحی شد. یک مدل با مقیاس بزرگ ایجاد و یک مطالعه آزمایشگاهی برای شبیه‌سازی پرش‌های هیدرولیکی بر روی هر پله و با کمترین طول پرش هیدرولیکی و بیشترین دبی در واحد عرض انجام شده است. یک مدل عددی بر پایه معادلات دو بعدی میانگین رینولدز، در جایی که سطح آزاد با استفاده الگوریتم volume-of-fluid، موانع ورودی به وسیله روش area-volume و اغتشاشات به وسیله مدل آشفتگی (RNG) و برای ارزیابی سرعت و فشار و خصوصیات نیروهای هیدرودینامیکی بر روی بلوک‌ها و لبه‌ها از مدل $k - \epsilon$ استفاده شده است. راهنمای اولیه برای طراحی سرریزهای پلکانی با پرش هیدرولیکی بر روی هر پله و دبی‌های کم پیشنهاد شد. خصوصیات اصلی شامل: فقدان یک حوضچه آرامش انتهایی، کانال مستقیم سرریز با مقطع عرضی ثابت مستطیلی، پله‌های افقی با ارتفاع ۲ متر، بلوک‌های مربعی با ابعاد ۰/۳ در ۰/۳ متر مربع و لبه‌های انتهایی با ارتفاع ۰/۵۲ و جریان یکنواخت گردشی بر سرریز پلکانی که اجازه طراحی مستقل ارتفاع سد را داد [۵۲].

حامدی و همکاران (۲۰۱۱) در این تحقیق به بررسی افت انرژی در رژیم جریان ریزشی در سرریز پلکانی پرداختند. این سرریز دارای ۶۰ پله بوده و طول هر پله ۱۴ سانتی‌متر، ارتفاع هر پله ۴/۶۶ سانتی‌متر، عرض سرریز ۱۳۳ سانتی‌متر و همچنین ارتفاع سرریز لبه پهن تا اولین پله ۵/۱ سانتی‌متر بوده است. جهت انجام این تحقیق آن‌ها ۴ پله را با لبه‌های شیب‌دار معکوس با زوایای ۷، ۱۰ و ۱۲

درجه مجهز کردند و بر روی این لبه‌های شیب‌دار، لبه انتهایی نصب کردند. طبق نتایج بدست آمده استفاده از پله‌های با لبه شیب‌دار و لبه انتهایی در ابتدای آن، افت انرژی در مقایسه با پله‌های با لبه شیب‌دار و بدون لبه در ابتدای آن یا روش‌های مورد استفاده توسط محققین بیشتر می‌شود. بعلاوه استفاده از پله‌های شیب‌دار و لبه‌دار با همدیگر یا پله‌های شیب‌دار به تنهایی در مقایسه با پله‌های افقی افت انرژی بیشتر خواهد بود [۵۳].

زارع و دوئرینگ (۲۰۱۲) این بررسی آزمایشگاهی را با یک پیشنهاد جدید در مورد پیکربندی سرریز پلکانی با استفاده از لبه و تیغه بر روی کف دو نوع پله و دو نوع لبه انجام دادند و به بررسی محل و عمق جریان در نقطه شروع ورود هوا و ارتفاع دیواره‌های سرریز پرداختند. شکل زیر انواع لبه‌ها و پله‌های مورد آزمایش را نشان می‌دهد.



شکل ۲-۱۴- اشکال مختلف پله‌ها و لبه‌های مورد استفاده [۵۴]

برای کاهش خسارت کاویتاسیون پیشنهاد می‌شود که از لبه مثلثی در وسط پله گرد^۱ استفاده شود به دلیل اینکه دارای کوچکترین طول نقطه شروع در بین تمام سرریزها برای عدد فرود در محدوده

¹ baffled-shifted rounded

بزرگ می‌باشد. لبه مثلثی در ابتدای پله قائم^۱ دارای بزرگ‌ترین عمق نقطه شروع در بین سرریزها برای اعداد فرود در محدوده بزرگ می‌باشد که رضایت بخش نمی‌باشد. لبه مثلثی در وسط پله قائم^۲ موثرترین به لحاظ هزینه‌های ساخت می‌باشد که برای اجرا به ارتفاع دیواره‌های کوچکتری در بین سرریزها برای عدد فرود در محدوده‌های بزرگ نیاز می‌باشد. محل و عمق نقطه شروع ورود هوا و ارتفاع دیواره به عنوان تابع زبری عدد فرود در معادلات تجربی نام گذاری شده که راهنمای طراحی برای پیکربندی سرریز می‌باشد [۵۴].

۲-۸- مروری بر تحقیقات عددی انجام گرفته بر روی سرریزهای پلکانی ساده، شیب‌دار و لبه‌دار

طاهرشمسی و همکاران (۱۳۸۸) به منظور بررسی افت انرژی سرریز پلکانی در دو حالت پله بدون لبه و پله لبه‌دار با ضخامت‌های ۱، ۲، ۳ و ۴ سانتی‌متری مدل‌سازی را انجام دادند. به دلیل پیچیدگی جریان دوفاز آب و هوا بر روی سرریز پلکانی، مدل دینامیک سیال محاسباتی حجم محدود با نرم افزار فلونت دو بعدی برای شبیه‌سازی این نوع جریان مورد استفاده قرار گرفت. شبیه‌سازی جریان دوفاز آب و هوا با الگوی حجم سیال کانال آزاد صورت گرفته است و برای مدل‌سازی آشفتگی از مدل آشفتگی $k - \epsilon$ (RNG²) 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 می‌باشد به طوری که در این روش مقدار خطا در مقادیر افت

¹ baffled-edged

² baffled-shifted sharp

انرژی در مقایسه با نتایج حاصله از آزمایشگاه کمتر می باشد چرا که در رابطه میزان افت انرژی سرعت متوسط نه از رابطه پیوستگی، بلکه با توجه به پروفیل های حاصله از حل عددی در محاسبه افت انرژی وارد شده اند. همچنین با اجرای این مدل عددی می توان گردابه های پادساعتگرد که در آزمایشگاه با چشم قابل دیدن نمی باشد را در مدل عددی حاضر مشاهده نمود.

همچنین طبق نتایج حاصل از تحلیل عددی، با لبه دار کردن سرریز پلکانی هواگیری جریان زودتر اتفاق می افتد و خطر ریسک ایجاد پدیده کاویتاسیون کاهش می یابد.

همچنین می توان بیان داشت که در لبه با ضخامت ۲ سانتی متر تاثیر افزایش دبی بر میزان افت انرژی کمتر بوده و به عبارت دیگر لبه با ضخامت ۲ سانتی متری مقاومت هیدرولیکی مناسب تری در برابر جریان ایجاد می نماید که نتایج آزمایشگاهی هم مؤید این قضیه می باشد [۵۵].

منصوری و همکاران (۱۳۸۹) با بررسی پارامترهای موثر بر استهلاك انرژی و مدل های اغتشاش و روش های انفصال، آنالیز برای ۱۶ مدل با هندسه گوناگون برای دو دبی ۳/۶ لیتر بر ثانیه (ریزشی) و ۲۵ لیتر بر ثانیه (غیرریزشی) یعنی جمعا ۳۲ مدل توسط نرم افزارهای گمبیت^۱ و فلوئنت^۲ با انتخاب مدل اغتشاش $k - \epsilon$ و روش VOF انجام دادند. نتایج بدست آمده با نتایج آزمایشگاهی و روابط موجود مقایسه گردید و همچنین نتایج بررسی آنالیز جریان ریزشی نشان می دهد که با افزایش عرض و ارتفاع لبه، میزان استهلاك انرژی افزایش می یابد. در مورد جریان غیرریزشی تغییرات عرض لبه ها و همچنین زاویه بالادست آن تاثیری در میزان استهلاك انرژی ندارند و فقط ارتفاع لبه بر آن تاثیر می گذارد و باعث افزایش آن می گردد [۵۶].

رفیع وحید و همکاران (۱۳۹۰) در این تحقیق 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

¹ Gambit

² Fluent

۲ سانتی متری و پوشش رنگی تدوین شده است. در بررسی نتایج مشاهده گردید، در سرریز لبه‌دار میزان نرخ پراکنش انرژی ۷۵٪ می‌باشد. همچنین تغییرات مقادیر عدد فرود برای هر یک از سرریزها محاسبه گردید. مقایسه نتایج، تغییرات محسوسی از استهلاک انرژی بین سرریز پلکانی لبه‌دار و بدون لبه را نشان می‌دهد. همچنین نرخ کاهش ابعاد حوضچه آرامش پس از لبه‌دار نمودن پله‌ها افزایش می‌یابد [۵۷].

منصوری و همکاران (۱۳۹۰) با استفاده از نرم افزار فلوئنت بر روی سرریزهای پلکانی با پله‌های شیب‌دار معکوس به انجام شبیه سازی جریان پرداختند. با کمک مقادیر بدست آمده از روش عددی جهت عمق و سرعت، میزان استهلاک انرژی مشخص گشته و با مقادیر استهلاک انرژی بدست آمده از روش آزمایشگاهی مقایسه گردیده، نتایج نشان دهنده اختلاف قابل قبول بین اعداد بدست آمده از روش عددی و آزمایشگاهی بوده و فلوئنت را به عنوان جایگزین مناسبی برای روش آزمایشگاهی در سرریزهای پلکانی معرفی می‌نماید [۵۸].

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، شیب‌دار و لبه‌دار با استفاده از نرم افزار فلوئنت پرداختند. در این نرم افزار جریان دو فازی عبوری از روی سرریز با استفاده از مدل دو فازي Mixture و مدل آشفستگی RSM شبیه‌سازی شدند. معیار ارزیابی مدل‌ها عبارت بود از مقایسه میزان استهلاک انرژی و میزان غلظت هوای موجود در جریان. نتایج نشان داد که جریان دوفازی بر روی سرریزهای پلکانی تاثیرپذیری قابل توجهی از عامل مقیاس داشته بنابراین نتایج حاصل از مدل‌های فیزیکی را نمی‌توان مستقیماً برای نمونه‌های واقعی سرریزهای پلکانی به کار برد.

در این راستا روش‌های عددی که قابلیت مدل‌سازی سرریزها را در اندازه واقعی خود دارند می‌توانند به عنوان راهنمایی در کنار مدل‌های آزمایشگاهی قرار گرفته و نتایج بدست آمده از آزمایشگاه را تصحیح نمایند [۵۹].

کشاورزیان 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 تاثیر نوع جریان به وسیله 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 $k - \epsilon$ استفاده شده است. نتایج به صورت 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 نمی‌باشد [۶۰].

رضائی و بیدختی (۱۳۹۱) به بررسی افت انرژی در انواع سرریز پلکانی: ساده، شیب‌دار و لبه‌دار با شبیه‌سازی عددی پرداختند. در این نرم افزار جریان دو فازی عبوری از روی سرریز با استفاده از مدل دو فازی Mixture و مدل آشفتگی RSM شبیه‌سازی شدند. مدل Mixture مناسب‌تر از روش VOF در تولید برهم کنش بین حباب‌های ورودی و چرخش حفره‌ها در رژیم جریان غیرریزشی می‌باشد. 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 تاثیر را در افت 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 غیرریزشی، 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 [۶۱].

فصل سوم

مواد و روش‌ها

۳-۱- مقدمه

در طراحی سازه‌های هیدرولیکی مسائلی مطرح هست که حل آن‌ها صرفاً به کمک تئوری و روابط تحلیلی امکان‌پذیر نبوده و ناگزیر باید از راه‌های تجربی و عملی استفاده کنیم. به‌طور کلی راه‌حل‌های تحلیلی فقط برای حل تعداد محدودی از مسائل جریان وجود دارد و در بسیاری از موارد به علت شرایط پیچیده هندسه جدار، معادلات جریان فوق‌العاده مشکل بوده و نمی‌توان با استفاده از تئوری و روابط ریاضی رفتار آن‌ها را در واقعیت پیش‌بینی کرد.

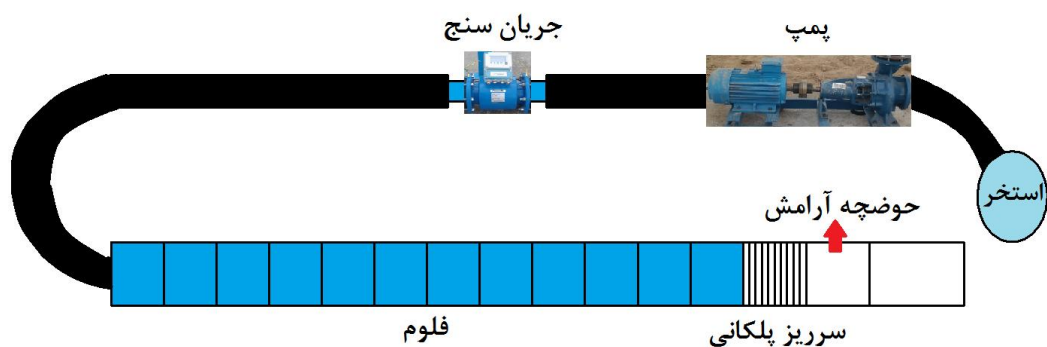
در این فصل ابتدا در مورد تجهیزات موجود در آزمایشگاه هیدرولیک دانشکده کشاورزی دانشگاه شاهرود، مشخصات فلوم مورد آزمایش و سرریز پلکانی ساخته شده برای این تحقیق پرداخته می‌شود. سپس در مورد روش‌های اندازه‌گیری پارامترهای هیدرولیکی، شامل عمق جریان و دبی جریان اشاره می‌گردد. در ادامه موضوع آنالیز ابعادی و بدست آوردن پارامترهای بی‌بعد ارائه می‌شود و در نهایت به نحوه انجام محاسبات پرداخته خواهد شد.

۳-۲- تجهیزات آزمایشگاه هیدرولیک

این تحقیق در آزمایشگاه هیدرولیک گروه آب و خاک دانشگاه شاهرود انجام پذیرفت. آزمایشگاه دارای یک استخر می‌باشد که آب آن توسط یک پمپ با الکتروموتور به قدرت $7/5$ کیلووات پمپاژ می‌گردد.

در شکل (۳-۱) پلان تجهیزات موجود در آزمایشگاه هیدرولیک جهت انجام آزمایش‌ها نمایش داده شده است. در این شکل فلوم به طول ۱۲ متر، پمپ اصلی آزمایشگاه، مکان نصب سرریز پلکانی، استخر تأمین آب، دستگاه دبی‌سنج و حوضچه آرامش نشان داده شده است.

در ادامه بحث به مشخصات فلوم مورد استفاده در این پژوهش و مدل فیزیکی ساخته شده و مشخصات آن پرداخته خواهد شد.



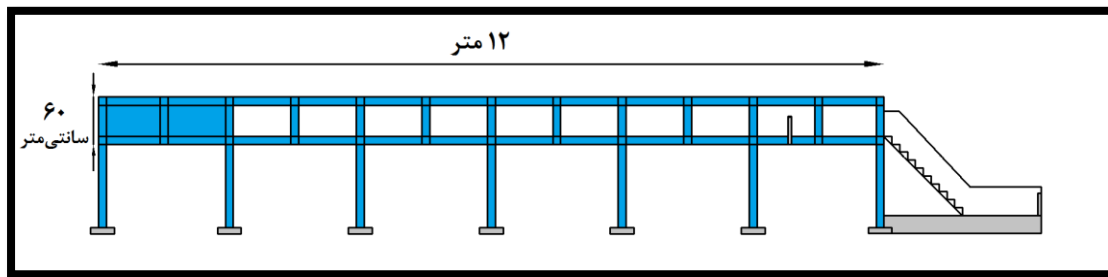
شکل ۳-۱- پلان تجهیزات موجود در آزمایشگاه هیدرولیک

۳-۲-۱- مشخصات فلوم مورد استفاده

در این تحقیق از یک فلوم به عرض ۱۰۰ سانتی متر 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 می‌باشد، که جهت سهولت مشاهده رفتار و خصوصیات جریان قابل استفاده است. کف فلوم جز دو متر اول که صفحه فلزی می‌باشد، کاملاً از جنس شیشه سکوریت با ضخامت ۱۰ میلی‌متر ساخته شده است. طول فلوم ۱۲ متر بوده و ارتفاع آن در تمام طول ۶۰ سانتی‌متر می‌باشد.

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 می‌گردد.

جهت کنترل دبی از دو عدد شیر تنظیم که بر روی پمپ نصب شده استفاده می‌شد و برای آرام نمودن جریان آب در ابتدای فلوم، از یک دیواره فلزی متخلخل که در داخل فلوم نصب شده بود استفاده شد. در شکل (۳-۲) مقطع طولی فلوم به عرض ۱۰۰ سانتی‌متر نشان داده شده است.



شکل ۳-۲- مقطع طولی فلوم به عرض ۱۰۰ سانتی‌متر

۳-۲-۲- سرریز پلکانی ساخته شده و مشخصات آن

در این پایان‌نامه یک سرریز پلکانی با شیب ۴۵ درجه، ارتفاع و عرض یک متر و با تعداد ۱۰ عدد پله ساخته و مورد آزمایش قرار گرفت. جنس این سرریز از نوعی چوب به نام فومیزه ساخته شده است.

۳-۲-۲-۱- مختصری در رابطه با جنس سرریز

امروزه پانل‌های ساختمانی سبک در تولید و توسعه صنعتی ساختمان نقش ویژه‌ای را به عهده گرفته‌اند و به همین سبب هر روزه پانل‌هایی با ویژگی‌های منحصر به فرد در جهان تولید و به بازار عرضه می‌گردد. یکی از این پانل‌ها که از سال ۱۹۹۰ میلادی در اروپا برای اولین بار طراحی و به بازار عرضه شد پانل‌های پی وی سی^۱ فوم (فومیزه) می‌باشد. برخلاف پوشش‌های چوب یا سایر مواد طبیعی پانل‌های پی وی سی دارای دوام و کیفیت بالایی بوده و مقاومت مطلوبی در برابر آب یا پوسیدگی دارند. این نوع پوشش در انواع مختلف با درصد متفاوت پی وی سی به صورت شبکه توخالی و توپر تولید می‌شوند و همچنین از نظر طرح نیز دارای دو نوع چاپی و روکش شده می‌باشند که نوع روکش شده پایداری طرح بالاتری داشته و مرغوب‌تر می‌باشد.

^۱ PVC

صفحات پی وی سی فومیزه جایگزین بسیار مناسبی برای چوب و سنگ‌های نما در صنعت ساختمان می‌باشند. این صفحات همانند چوب به راحتی اریه و به قطعات دلخواه بریده می‌شوند و می‌توان آن‌ها را با میخ و یا پیچ در محل مورد نظر نصب نمود. علاوه بر این به دلیل چگالی کم سبک و قابل حمل می‌باشند. از معایب این پوشش‌ها می‌توان به قیمت نسبتاً بالای آن‌ها اشاره نمود. در جدول (۱-۳) مشخصات سرریز پلکانی ذکر شده است.

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

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



شکل ۳-۳- سرریز پلکانی با عرض و ارتفاع یک متر (قبل از نصب)



شکل ۳-۴- سرریز پلکانی با عرض و ارتفاع یک متر (بعد از نصب)



شکل ۳-۵- رژیم جریان ریزشی برای دبی ۲۵ لیتر بر ثانیه



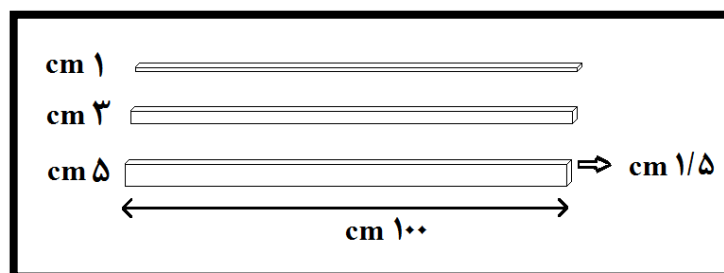
شکل ۳-۶- رژیم جریان ریزشی برای دبی ۲۵ لیتر بر ثانیه و سرریز با لبه ۵ سانتی متری در ابتدا و وسط پله

۳-۳- روش انجام آزمایش

سرریز پلکانی در خارج از فلوم و در جایی که اولین پله با لبه فلوم مماس می‌شد نصب گردید. پمپ مورد استفاده که در کنار استخر آب قرار دارد، قابلیت ایجاد دبی تا ۲۵ لیتر بر ثانیه را دارا می‌باشد و آب را از استخر برداشت نموده و توسط لوله به فلوم می‌رساند. آب پس از عبور از لوله‌ها وارد فلوم شده و بعد از عبور از روی سرریز پلکانی و حوضچه آرامش پایین‌دست، وارد استخر شده و از آنجا مجدداً به فلوم باز می‌گردد.

در این تحقیق به بررسی آزمایشگاهی افت انرژی در سرریز پلکانی لبه‌دار و بدون لبه پرداخته شده است. به همین منظور لبه‌هایی با سه ارتفاع ۱، ۳ و ۵ سانتی‌متری به عرض یک متر و ضخامت ۱/۵ سانتی‌متر از جنس فومیزه ساخته شد. در ابتدا آزمایش‌ها در حالت بدون لبه انجام گرفتند. محاسبات و جداول در ادامه آورده شده است. سپس به بررسی افت انرژی در سرریز پلکانی لبه‌دار پرداخته شده است.

در حالت لبه‌دار شدن پله‌ها، لبه‌ها بر روی پله‌های ۲، ۳، ۴ و ۵ (در ابتدا و وسط پله) با چسب آکواریوم چسبانده شد و برای حصول اطمینان از چسبیدن و خشک شدن آن‌ها در هر مرحله یک ساعت صبر می‌کردیم. سپس با دبی‌های مختلف (۱۵ دبی برای حالت بدون لبه و ۷ دبی برای حالت لبه‌دار، محدوده دبی‌ها از ۱ تا ۲۶ لیتر بر ثانیه) عمق آب قبل از پرش هیدرولیکی (در انتهای حوضچه آرامش به طول یک متر) و عمق آب در ۱/۲ متری در بالادست سرریز (در داخل فلوم) با خط‌کش و عکس‌برداری اندازه‌گیری شد. در شکل (۴-۱) نمایی از لبه‌های مورد استفاده نشان داده شده است.



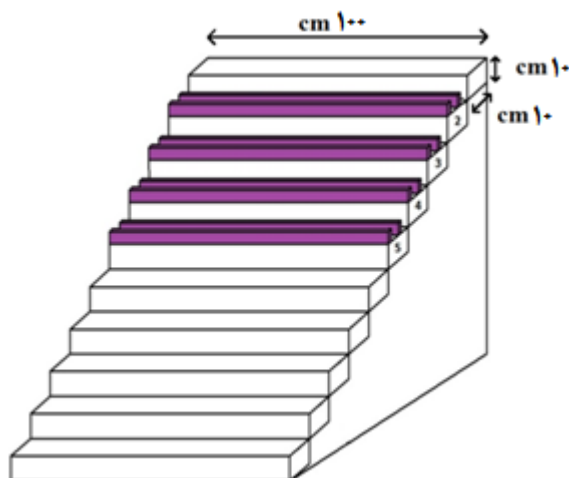
شکل ۳-۷- نمایی از لبه‌های مورد استفاده

در جدول (۱-۴) حالت‌های مختلف قرارگیری لبه‌ها بر روی پله‌های ۲، ۳، ۴ و ۵ به تفکیک ارائه

گردیده است. در شکل (۲-۴) نیز نمایی از محل قرارگیری لبه‌ها بر روی پله‌ها نشان داده شده است.

جدول ۲-۳- حالت‌های مختلف 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 ابتدای پله	۵، ۴، ۳، ۲	۷
۲	۴۵	لبه ۱ وسط پله	۵، ۴، ۳، ۲	۷
۳	۴۵	لبه ۱ وسط و ابتدای پله	۵، ۴، ۳، ۲	۷
۴	۴۵	لبه ۱ وسط و ۳ ابتدای پله	۵، ۴، ۳، ۲	۷
۵	۴۵	لبه ۱ وسط و ۵ ابتدای پله	۵، ۴، ۳، ۲	۷
۶	۴۵	لبه ۳ ابتدای پله	۵، ۴، ۳، ۲	۷
۷	۴۵	لبه ۳ وسط پله	۵، ۴، ۳، ۲	۷
۸	۴۵	لبه ۳ وسط و ۱ ابتدای پله	۵، ۴، ۳، ۲	۷
۹	۴۵	لبه ۳ وسط و ابتدای پله	۵، ۴، ۳، ۲	۷
۱۰	۴۵	لبه ۳ وسط و ۵ ابتدای پله	۵، ۴، ۳، ۲	۷
۱۱	۴۵	لبه ۵ ابتدای پله	۵، ۴، ۳، ۲	۷
۱۲	۴۵	لبه ۵ وسط پله	۵، ۴، ۳، ۲	۷
۱۳	۴۵	لبه ۵ وسط و ۱ ابتدای پله	۵، ۴، ۳، ۲	۷
۱۴	۴۵	لبه ۵ وسط و ۳ ابتدای پله	۵، ۴، ۳، ۲	۷
۱۵	۴۵	لبه ۵ وسط و ابتدای پله	۵، ۴، ۳، ۲	۷



شکل ۳-۸- نمایی از محل قرارگیری لبه‌ها بر روی پله‌های مورد آزمایش

شایان ذکر است که در این آزمایش‌ها حالت‌های مختلف برای چیدمان لبه‌ها بر روی پله‌ها انتخاب شده است و لبه‌ها بر روی پله‌های اولیه نصب شدند. دلیل این انتخاب تاثیر بیشتر پله‌های نزدیک به تاج سرریز بر استهلاک انرژی در سرریزهای پلکانی است [۴۴]. برای اندازه‌گیری عمق و دبی جریان از ابزار زیر استفاده شده است.

۳-۳-۱- اندازه‌گیری عمق جریان

به‌طور کلی دو روش برای اندازه‌گیری عمق جریان وجود دارد :

۱- به کمک لیمینیمتر که بر روی ریل موجود در مدل سوار گشته و عمق در سمت چپ و راست و وسط پله‌های مورد نظر اندازه‌گیری می‌شود (به طور عمود بر پله) و با تقسیم عدد بدست آمده بر کسینوس شیب مدل، عمق عمود بر جریان بدست می‌آید.

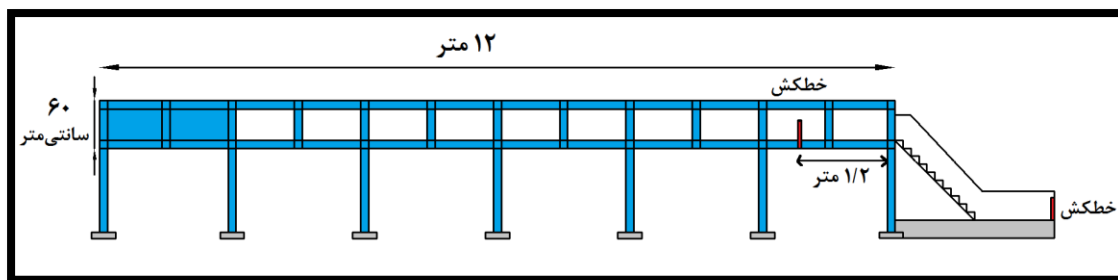
۲- روش دوم که به نظر دقیق‌تر از روش اول می‌باشد به این صورت است که، عمق جریان به کمک دوربینی که هر ۰/۰۲۵ ثانیه از جریان از مقطع مورد نظر عکس می‌گیرد اندازه‌گیری می‌شود. سپس با آنالیز کردن عکس‌های گرفته شده عمق بدست می‌آید و با عمق بدست آمده از لیمینیمتر مقایسه می‌گردد.

لازم به توضیح است که در جریان‌های ریزشی عمق‌های d_1 ، d_2 و d_3 محاسبه می‌گردند که عمق d_1 مربوط به جت روی لبه پله و عمق d_2 مربوط به عمق بالای جت تا سطح آب و عمق d_3 مربوط به پرش‌ها و افشانندگی آب روی پله می‌باشد. اما در جریان غیرریزشی تنها عمقی که محاسبه می‌گردد ضخامت لایه بالای کف کاذب می‌باشد.

در آزمایش‌های این پایان‌نامه دو عمق اندازه‌گیری شده است. یک عمق که در فاصله ۱/۲ متری در بالادست سرریز در فلوم اندازه‌گیری شد و دیگری عمق آب مربوط به قبل از پرش هیدرولیکی می‌باشد. در این مقاطع، عمق جریان توسط خط‌کش میلی‌متری که بر روی دیواره فلوم و حوضچه آرامش نصب شده بود با کمک دوربین و عکس‌برداری قابل اندازه‌گیری بود. برای هر قسمت متوسط ۳۰ عکس

گرفته شد و بعد از انجام آزمایش‌ها عمق‌های مورد نظر از روی عکس‌ها یادداشت و سپس بین این عمق‌ها میانگین‌گیری انجام می‌گرفت.

در مقطع عمق اولیه جریان، هوای زیادی وارد جریان گردیده (به خصوص در دبی‌های بالا) و بنابراین در این مقطع، عمق جریان دو فاز مخلوط "آب و هوا" قابل اندازه‌گیری بود. همچنین به علت ماهیت دو فاز جریان، سرعت جریان زیاد آب و نوسان‌های سطح آب، در این مقطع به ویژه در دبی‌های بیشتر، اندازه‌گیری عمق آب با خطای بیشتر انجام می‌شد. در شکل (۷-۳) محل اندازه‌گیری این دو عمق در حوضچه آرامش و داخل فلوم نشان داده شده است.



شکل ۳-۹- محل اندازه‌گیری عمق جریان (دید از کنار)

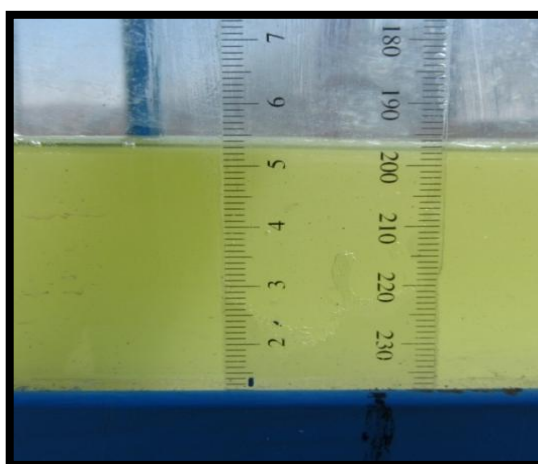
حوضچه آرامش در این تحقیق با طول و عرض یک متر در پایین‌دست سرریز پلکانی ساخته شد. جنس این حوضچه از شیشه ساده می‌باشد و دیواره‌ها و کف آن به ترتیب دارای ضخامت ۶ و ۱۰ میلی‌متر می‌باشد. در انتهای این حوضچه خطکش‌هایی بر روی دیواره نصب شد و قرائت عمق از طریق عکس‌برداری انجام گرفت. در شکل (۳-۸) و (۳-۹) و (۳-۱۰) به ترتیب نمایی از حوضچه آرامش، محل اندازه‌گیری عمق جریان در حوضچه آرامش و همچنین مدرج کردن دیواره فلوم نشان داده شده است.



شکل ۳-۱۰- نمایی از حوضچه آرامش



شکل ۳-۱۱- نمایی از مدرج کردن دیواره حوضچه آرامش



شکل ۳-۱۲- نمایی از مدرج کردن دیواره فلوم

۳-۳-۲- اندازه‌گیری دبی جریان

دبی جریان از مهمترین پارامترهایی است که در تمام کارهای آزمایشگاهی و مدل‌سازی باید به دقت اندازه‌گیری شود. جریان سنج (پی ام ای جی)^۱، یک دبی‌سنج الکترومغناطیسی ساخته شده توسط شرکت SGM ایتالیا می‌باشد. این دستگاه برای سنجش دبی مایعات رسانا البته با میزان محدودی از مواد جامد معلق در آب کاملاً مناسب می‌باشد.

محدوده کاری این دستگاه از $0.12 \text{ m}^3/h$ تا $30000 \text{ m}^3/h$ و خطای محتمل $\pm 0.5\%$ می‌باشد. اساس کار سیستم دبی‌سنج‌های مغناطیسی مبتنی بر قانون القای مغناطیسی فارادی است که بیانگر آن است که هرگاه رسانایی در یک میدان مغناطیسی حرکت کند در آن ولتاژ جریان القا می‌شود.

$$\text{Faraday's Law: } E = KBDV$$

مقدار ولتاژ القایی، مستقیماً متناسب با سرعت رسانا V ، پهنای رسانا D و قدرت میدان مغناطیسی B می‌باشد. هنگامی که مایع رسانا از میدان مغناطیسی با سرعت V عبور می‌کند الکترونها ولتاژ القایی را دریافت می‌کنند. پهنای رسانا به فاصله بین الکترونها بستگی دارد (بدنه ایزوله از اتصال کوتاه با دیواره جلوگیری می‌کند)، تنها متغیر این وسیله سرعت مایع رسانا است و به دلیل آن که قدرت میدان مغناطیسی و فواصل الکترونها ثابت نگه داشته شده است ولتاژ خروجی E ، مستقیماً با سرعت متناسب است.

این دبی‌سنج هیچ‌گونه قطعه متحرکی ندارد و انسدادی در برابر جریان سیال ایجاد نمی‌کند و به دلیل آنکه نیازی به دانسیته و ویسکوزیته سیال برای اندازه‌گیری ندارد برای سنجش دبی دوغاب‌ها، مایعات خورنده مناسب می‌باشد. با وجود عدم افت فشار در آن‌ها (به دلیل عدم وجود مانع بر سر راه جریان) برای گازها مناسب نمی‌باشد. سیال در این نوع اندازه‌گیری باید حداقل رسانایی الکترونیسته را

¹ Pmag (Electromagnetic flow meter)

که وابسته به سازنده دی‌سنج است داشته باشد. سیال مورد استفاده باید رسانای الکتریسیته و غیر مغناطیسی باشد.



شکل ۳-۱۳- نمایش از جریان‌سنج

۳-۴- آنالیز ابعادی

روابط حاکم بر بسیاری از پدیده‌های هیدرولیکی را نمی‌توان مستقیماً از قوانین حاکم بر حرکت سیالات و تئوری‌های موجود نظیر قوانین بقای جرم، انرژی و ممنتوم به دست آورد. در چنین مواردی سعی می‌شود تا برای استخراج روابط ریاضی حاکم بر چنین پدیده‌هایی، ابتدا کلیه متغیرهای لازم که در به وجود آوردن آن پدیده نقش دارند مشخص گردند. در واقع هدف از روش آنالیز ابعادی پیدا نمودن رابطه‌ای بین کمیت‌های فیزیکی در یک پدیده طبیعی می‌باشد. با استفاده از آنالیز ابعادی می‌توان در بسیاری از حالت‌ها رابطه‌ای پیچیده را تجزیه و تحلیل نموده و بین متغیرهای مختلف آن پدیده روابط صحیحی را ایجاد نمود که رابطه بدست آمده معمولاً ساده‌تر و منطبق با شرایط فیزیکی می‌باشد.

نکته مهم در مورد رابطه مورد نظر این است که رابطه مذکور باید معنی‌دار، دارای کاربرد ساده و قابل استفاده در هر سیستم آحاد باشد. تحلیل ابعادی بر این اصل استوار است که در یک رابطه صحیح فیزیکی، هرگاه کمیت‌های مختلفی که در طرفین رابطه وجود دارند بر حسب پارامترهای اصلی

دستگاه یک‌گانه‌ی آحادی نوشته شوند، در هر دو طرف تجانس و تشابه کامل برقرار باشد. پارامترهای اصلی دستگاه مختلف شامل طول، جرم و زمان می‌باشد و بدین ترتیب در طرفین یک رابطه صحیح فیزیکی، بایستی نمای پارامترها یکسان باشد.

۳-۴-۱- تحلیل ابعادی پارامترهای موثر بر جریان از روی سرریزهای پلکانی

عوامل موثر در جریان از روی سرریزهای پلکانی همراه با ضمائم عبارت است از :

الف - خصوصیات مربوط به شرایط هیدرولیکی جریان شامل :

۱- عمق جریان در پاشنه پرش (y_1)

۲- سرعت جریان (V_1)

۳- عمق بحرانی (y_c)

۴- انرژی در بالادست تاج سرریز (H_t)

۵- افت انرژی (ΔH)

ب- خصوصیات مربوط به ویژگی‌های سیال شامل :

۱- جرم مخصوص آب (ρ)

۲- گرانروی دینامیک آب (μ)

۳-

تاب ثقل (g)

ج- خصوصیات هندسی سرریز شامل :

۱- تعداد پله‌ها (N)

۲- ارتفاع هر پله (h)

۳- طول افقی هر پله (l)

۴- ارتفاع لبه در ابتدای پله (h_{s1})

۵- ارتفاع لبه در وسط پله (h_{s2})

۶- محل قرارگیری لبه در وسط پله (x_1)

۷- محل قرارگیری لبه در ابتدای پله (x_2)

سه متغیر تکراری انتخاب می‌شود. این سه متغیر عبارتند از: y_1 ، V_1 و ρ . باتوجه به روش باکینگهام در تحلیل ابعادی و تعداد پارامترها، بایستی (N-3) یعنی ۱۲ پارامتر اصلی بی‌بعد جهت بررسی استخراج گردد:

جدول ۳-۳- ابعاد پارامترهای مورد استفاده

شماره پارامتر	پارامتر	بعد پارامتر	پارامتر تکرار شونده
۱	y_1	L	*
۲	V_1	LT^{-1}	*
۳	y_c	L	
۴	ΔH	L	
۵	H_t	L	
۶	ρ	$FL^{-4}T^2$	*
۷	μ	$FL^{-2}T^1$	
۸	g	LT^{-2}	
۹	N	-	
۱۰	h	L	
۱۱	l	L	
۱۲	h_{s1}	L	
۱۳	h_{s2}	L	
۱۴	x_1	L	
۱۵	x_2	L	

بنابراین می‌توان نوشت:

$$f(y_1, V_1, y_c, \rho, \mu, g, N, h, l, h_{s1}, h_{s2}, \Delta H, H_t, x_1, x_2) = 0$$

با توجه به پارامترها با ابعاد مشابه پارامترهای بی بعد به شرح زیر است :

$$f \left(\begin{array}{l} \pi_1 = \frac{y_c}{y_1}, \pi_2 = \frac{h}{y_1}, \pi_3 = \frac{l}{y_1}, \pi_4 = \frac{h_{s1}}{y_1}, \pi_5 = \frac{h_{s2}}{y_1}, \\ \pi_6 = N, \pi_7 = \frac{\Delta H}{y_1}, \pi_8 = \frac{H_t}{y_1}, \pi_9 = \frac{x_1}{y_1}, \pi_{10} = \frac{x_2}{y_1} \end{array} \right) = 0$$

حال عدد بی بعد دیگر با توجه به روش باکینگهام به شرح زیر قابل ارایه است :

$$(y_1)^{x_1} \times (V_1)^{y_1} \times (\rho)^{z_1} \times \mu = F^0 L^0 T^0$$

$$(L)^{x_1} \times (LT^{-1})^{y_1} \times (FL^{-4}T^2)^{z_1} \times FL^{-2}T^1 = F^0 L^0 T^0$$

$$\begin{cases} z_1 = -1 \\ x_1 + y_1 - 4z_1 - 2 = 0 \\ -y_1 + 2z_1 + 1 = 0 \end{cases}$$

$$\begin{cases} z_1 = -1 \\ x_1 = +1 \\ y_1 = +1 \end{cases}$$

پارامتر بی بعد یازدهم $\pi_{11} = \frac{V_1 y_1 \mu}{\rho} = Re_1$ می باشد.

بنابراین در پارامترهای اصلی داریم :

$$f \left(\frac{y_c}{y_1}, \frac{h}{y_1}, \frac{l}{y_1}, \frac{h_{s1}}{y_1}, \frac{h_{s2}}{y_1}, N, \frac{\Delta H}{y_1}, \frac{H_t}{y_1}, \frac{x_1}{y_1}, \frac{x_2}{y_1}, Re_1 \right) = 0$$

محققین تاکید کرده اند که افت انرژی نسبی $\frac{\Delta H}{H_t}$ مستقل از عدد رینولدز $R = \frac{q}{\rho}$ (دبی در

واحد عرض و ϑ لزجت سینماتیکی آب) برای $R \geq 1.6 \times 10^4$ می باشد [۶۲]. در این تحقیق چون

رژیم جریان درهم می باشد از تاثیر Re صرفه نظر می کنیم.

بنابراین رابطه کلی شامل ۱۰ پارامتر بی بعد به صورت زیر می باشد :

$$f \left(\frac{y_c}{y_1}, \frac{h}{y_1}, \frac{l}{y_1}, \frac{h_{s1}}{y_1}, \frac{h_{s2}}{y_1}, N, \frac{\Delta H}{y_1}, \frac{H_t}{y_1}, \frac{x_1}{y_1}, \frac{x_2}{y_1} \right) = 0$$

با کمک اعمال ریاضی بر روی پارامترها در نهایت رابطه زیر به دست می‌آید :

$$\frac{\Delta H}{H_t} = f_1\left(N, \frac{x_1 + l}{h_s + h}, \frac{x_2 + l}{h_s + h}, \frac{y_c}{h}\right) \quad (1-3)$$

با توجه به ثابت بودن تعداد پله این پارامتر از رابطه (۱-۳) حذف می‌شود. در نتیجه رابطه (۲-۳) به زیر خواهد بود :

$$\frac{\Delta H}{H_t} = f_1\left(\frac{x_1 + l}{h_s + h}, \frac{x_2 + l}{h_s + h}, \frac{y_c}{h}\right) \quad (2-3)$$

۳-۵- ثبت مشاهدات و محاسبات

۳-۵-۱- مشاهدات

همانطور که در فصل دوم اشاره شد پژوهش‌های متعددی در مورد پله‌های مجهز به لبه و تاثیر این لبه بر میزان استهلاک انرژی انجام شده است. در این تحقیق با انتخاب یک عرض ثابت برای لبه‌ها، ارتفاع‌های متفاوتی (۱، ۳ و ۵ سانتی‌متر) انتخاب، و یکبار پله‌ها بدون لبه مورد آزمایش قرار گرفتند و بار دیگر هر کدام از این لبه‌ها با حالت‌های مختلف در ابتدا و وسط پله‌ها تعبیه شدند و آزمایش‌ها انجام شد. در نهایت نتایج مقایسه و استهلاک انرژی محاسبه گردید.

۳-۵-۲- محاسبات

همانطور که قبلاً اشاره شد، در این آزمایش‌ها عمق قبل از پرش هیدرولیکی اندازه‌گیری و سپس میزان استهلاک انرژی نسبی با استفاده از این عمق محاسبه گردید. در فصل دوم در مبحث شروع جریان غیر ریزشی به روابطی که توسط محققین مختلف به دست آمده بود اشاره کردیم. در این تحقیق برای تعیین رژیم جریان از رابطه چانسون (۲-۱۱) که نسبت به روابط دیگر دارای کاربرد بیشتری بوده و نیز به دلیل سادگی آن، استفاده کردیم :

$$\frac{y_c}{h} = 1.057 - 0.465 \frac{h}{l} \quad (11-2)$$

$$\frac{h}{l} = 0.2 - 1.25(11.31 - 51.34^\circ)$$

با توجه به مقادیر زیر

$$h = 10\text{cm} = 0.1\text{m}, l = 10\text{cm} = 0.1\text{m}$$

خواهیم داشت :

$$\frac{y_c}{0.1} = 1.057 - 0.465 \frac{0.1}{0.1} \rightarrow y_c = 0.0592$$

$$q = V_c y_c \rightarrow V_c = \sqrt{g y_c} \rightarrow V_c = 0.762$$

$$q = 0.0451 \frac{\text{m}^2}{\text{s}} \rightarrow Q = q b \rightarrow 0.0451 \frac{\text{m}^3}{\text{s}} = 45.1 \frac{\text{lit}}{\text{s}}$$

با توجه به اینکه حداکثر دبی جریان قابل تامین در آزمایشگاه ۲۶ لیتر بر ثانیه بود و با توجه به

روابط و اعداد بدست آمده در بالا نتیجه می‌گیریم که دبی در تمامی حالت‌ها، ریزشی می‌باشد.

۳-۵-۳- استهلاک انرژی در سرریزها

منظور از استهلاک انرژی عبارت است از اختلاف بین انرژی در بالادست سرریز و انرژی در

پایین‌دست آن (پنجه) در محل تشکیل عمق قبل از پرش هیدرولیکی (عمق اولیه) است که به

صورت زیر نشان داده می‌شود :

$$\Delta H = H_t - H_1 = (1.5 y_c + H_{dam}) - (y_1 + \frac{V_1^2}{2g}) \quad (3-3)$$

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

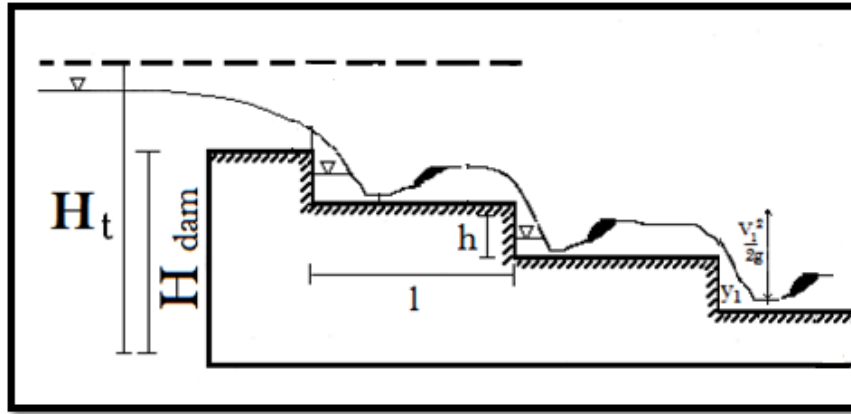
$$q = y_1 V_1 \quad (5-3)$$

$$H_1 = y_1 + \frac{V_1^2}{2g} \quad (6-3)$$

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

$$\frac{\Delta H}{H_t} = \frac{H_t - H_1}{H_t} = 1 - \frac{H_1}{H_t} = 1 - \frac{(y_1 + \frac{V_1^2}{2g})}{1.5y_c + H_{dam}} \quad (7-3)$$

در روابط فوق H_t = انرژی کل در بالادست سرریز، H_1 = انرژی در پنجه و قبل از پرش هیدرولیکی، H_{dam} = ارتفاع کل سرریز، h = ارتفاع پله، y_c = عمق بحرانی، y_1 = عمق قبل از پرش هیدرولیکی و V_1 سرعت متوسط قبل از پرش هیدرولیکی می‌باشند. در شکل (۳-۱۲) مقطع عرضی سرریز پلکانی که پارامترهای مختلف هیدرولیکی روی آن مشخص گردیده، ارائه شده است [۶].



شکل ۳-۱۴- مقطع عرضی سرریز پلکانی [۶]

با توجه به شکل (۳-۱۲) معادلات زیر ارائه می‌گردند :

$$H_t = H_{dam} + E_{sc} = H_{dam} + 1.5y_c \quad (8-3) \text{ انرژی کل در بالادست سرریز}$$

$$H_1 = y_1 + h_{v1} \quad (9-3) \text{ انرژی مخصوص در محل قبل از پرش هیدرولیکی}$$

$$\Delta H = H_t - H_1 \quad (10-3) \text{ کل استهلاک انرژی}$$

لازم به ذکر است که برخی از پارامترهای هیدرولیکی اندازه‌گیری شده و محاسباتی به صورت جدول در فصل چهارم ارائه شده است.

فصل چہارم

نتایج و بحث

۴-۱- مقدمه

در این فصل از پایان نامه، با توجه به آزمایش‌های انجام شده مشاهدات و نتایج مورد بحث قرار گرفته است. در نهایت با استفاده از داده‌های اندازه‌گیری شده و انجام تجزیه و تحلیل آماری روابط رگرسیونی برای محاسبه افت انرژی ارایه شده است.

۴-۲- مشاهدات آزمایشگاهی

در این بخش به بیان مشاهدات آزمایشگاهی و نتایج حاصل از آن‌ها در دو حالت پرداخته شده و برای بقیه حالت‌ها به ارایه جدول محاسبات اکتفا شده است.

۴-۲-۱- اندازه‌گیری‌ها در سرریز پلکانی بدون لبه

برای این حالت جمعا ۱۵ دبی مورد آزمایش قرار گرفت. محدوده تغییرات دبی از $2/3$ تا $27/1$ لیتر در ثانیه بود که مشاهدات به صورت زیر می‌باشد :



شکل ۴-۱- رژیم جریان ریزشی بر روی سرریز پلکانی بدون لبه

آزمایش ۱: دبی جریان $2/3$ لیتر بر ثانیه و رژیم جریان ریزشی است. جریان بعد از عبور از تاج سرریز به کف پله دوم برخورد و از آنجا بر روی پله ۴ ریخت و برخورد اندکی با پله ۳ داشت. سپس بر روی پله‌های متوالی در شرایط آرام برخورد کرد و سرانجام به پاشنه سرریز ریخت.

آزمایش ۲: دبی اندکی نسبت به حالت قبل افزایش داده شد و مقدار آن به $3/622$ لیتر بر ثانیه رسید. رژیم جریان ریزشی است. جریان بعد از عبور از تاج سرریز به کف پله دوم برخورد و از آنجا بر روی پله ۶ ریخت و کمی آشفته به کف حوضچه برخورد کرد.

آزمایش ۳: دبی جریان $4/889$ لیتر بر ثانیه و رژیم جریان ریزشی است. سایر شرایط مانند حالت قبل بود فقط کف آلودگی در حوضچه بیشتر شد.

آزمایش ۴: دبی جریان $5/7$ لیتر بر ثانیه و رژیم جریان ریزشی است. جریان بعد از عبور از تاج سرریز به ابتدای پله دوم برخورد و از آنجا بر روی پله ۵ و ۶ سقوط کرد و سپس به حوضچه ریخت.

آزمایش ۵: دبی جریان $7/5$ لیتر بر ثانیه و رژیم جریان ریزشی است. جریان بعد از عبور از تاج سرریز به ابتدای پله دوم برخورد و از آنجا بر روی پله ۵ سقوط کرد.

آزمایش ۶: دبی جریان $8/48$ لیتر بر ثانیه و رژیم جریان ریزشی است. جریان به صورت مماس از روی تاج سرریز عبور کرد و از آنجا بر روی پله ۴ سقوط کرد.

آزمایش ۷: دبی جریان $11/4$ لیتر بر ثانیه و رژیم جریان ریزشی است. سایر شرایط مانند حالت قبل بود.

آزمایش ۸: دبی جریان $12/3$ لیتر بر ثانیه و رژیم جریان ریزشی است. جریان به صورت مماس از روی پله دوم عبور کرد. عمق آب درون این پله به حدودا ۴ سانتی متر رسید. سپس به پله ۴ برخورد و از آنجا به صورت آشفته پله بر روی پله‌های دیگر ریخت.

آزمایش ۹: دبی جریان $13/6$ لیتر بر ثانیه و رژیم جریان ریزشی است. جریان به ابتدای پله ۲ برخورد کرد. برخوردهایی با پله ۳ نیز مشاهده شد و سپس وارد پله ۴ شد.

آزمایش ۱۰: دبی جریان $15/2$ لیتر بر ثانیه و رژیم جریان ریزشی است. جریان به صورت مماس و صاف و یکنواخت از روی پله ۲ و ۳ عبور کرد و با پرش بلندی به پله‌های آخر ریخت. کف آلودگی در حوضچه بیشتر مشاهده شد.

آزمایش ۱۱: دبی جریان ۱۷/۵ لیتر بر ثانیه و رژیم جریان ریزشی است. جریان به صورت صاف به کف پله سوم برخورد کرد.

آزمایش ۱۲: دبی جریان ۱۹/۴ لیتر بر ثانیه و رژیم جریان ریزشی است. جریان به صورت صاف به ابتدای پله سوم برخورد کرد و آب بسیار کمی در فضای بین پله و آبشار در روی پله ۲ قرار گرفت. جریان درون پله ۳ بسیار آشفته بود و حباب‌های هوا به وضوح قابل رؤیت بود.

آزمایش ۱۳ و ۱۴: دبی جریان به ۲۲ و ۲۴ لیتر بر ثانیه افزایش یافته و رژیم جریان ریزشی است. شرایط مانند آزمایش ۱۲ بود.

آزمایش ۱۵: دبی جریان ۲۶ لیتر بر ثانیه و رژیم جریان ریزشی است. شرایط مانند حالت قبل بود. بر روی پله ۳ جریان گردابی و متلاطم دیده شد.

خلاصه محاسبات در جدول (۴-۱) تنظیم شده است. با در دست بودن دبی و عمق اولیه جریان محاسبات انجام گرفت. برای نمونه یکی از محاسبات به صورت زیر ارائه شده است :

$$Q = 0.002374 \left(\frac{m^3}{s} \right) y_1 = 0.0114m$$

$$Q = qb \rightarrow b = 1m \rightarrow q = 0.002374$$

$$y_c = \left(\frac{q^2}{g} \right)^{1/3} \rightarrow y_c = 0.00832$$

$$q = V_1 y_1 \rightarrow V_1 = 0.2082$$

$$F_r = \frac{V_1}{\sqrt{g y_1}} \rightarrow F_r = 0.6228$$

$$H_1 = y_1 + \frac{V_1^2}{2g} \rightarrow H_1 = 0.01361$$

$$H_t = H_{dam} + \frac{3}{2} y_c \rightarrow H_t = 1.01248$$

$$\Delta H = H_t - H_1 \rightarrow \Delta H = 0.9988$$

$$\frac{\Delta H}{H_t} = \frac{H_t - H_1}{H_t} \rightarrow \frac{\Delta H}{H_t} = 0.9865$$

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

ردیف	شماره / مشخصات	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷
۱	$Q(m^3/s)$	۰/۰۰۲۴	۰/۰۰۳۶	۰/۰۰۴۹	۰/۰۰۵۷	۰/۰۰۷۶	۰/۰۰۸۵	۰/۰۱۱۴
۲	$H_t(m)$	۱/۰۱۲۵	۱/۰۱۷	۱/۰۲۰۲	۱/۰۲۲۵	۱/۰۲۷	۱/۰۲۹۲	۱/۰۳۵۵
۳	$q(m^2/s)$	۰/۰۰۲۴	۰/۰۰۳۶	۰/۰۰۴۹	۰/۰۰۵۷	۰/۰۰۷۶	۰/۰۰۸۵	۰/۰۱۱۴
۴	$y_1(m)$	۰/۰۰۹۶	۰/۰۱۰۷	۰/۰۱۴۳	۰/۰۱۶۵	۰/۰۱۷۳	۰/۰۲	۰/۰۲۱۶۷
۵	$V_1(m/s)$	۰/۲۴۸	۰/۳۴۹	۰/۳۴۳	۰/۳۴۸	۰/۴۳۹	۰/۴۲۴	۰/۵۲۶۱
۶	F_r	۰/۸۱	۱/۰۷۶۴	۰/۹۱۸	۰/۸۶۶	۱/۰۶۷۴	۰/۹۵۸	۱/۱۴۱۶
۷	$H_1(m)$	۰/۰۱۲۷	۰/۰۱۶۹	۰/۰۲۰۳	۰/۰۲۲۷	۰/۰۲۷۲	۰/۰۲۹۲	۰/۰۳۵۸
۸	$\Delta H(m)$	۰/۹۹۹۷	۰/۹۹۹۹	۰/۹۹۹۹	۰/۹۹۹۸	۰/۹۹۹۹	۰/۹۹۹۹	۰/۹۹۹۷
۹	$\Delta H/H_t(\%)$	۹۸/۷۴	۹۸/۳۳	۹۸/۰۱۵	۹۷/۷۸	۹۷/۳۵	۹۷/۱۶	۹۶/۵۴
۱۰	$y_c(m)$	۰/۰۰۸۳	۰/۰۱۱۳	۰/۰۱۳۵	۰/۰۱۴۹	۰/۰۱۸۱	۰/۰۱۹۴	۰/۰۲۳۷
۱۱	y_c/h	۰/۰۸۳	۰/۱۱۳	۰/۱۳۵	۰/۱۴۹	۰/۱۸۱	۰/۱۹۴	۰/۲۳۷

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

ردیف	شماره / مشخصات	۸	۹	۱۰	۱۱	۱۲	۱۳	۱۴	۱۵
۱	$Q(m^3/s)$	۰/۰۱۲	۰/۰۱۳	۰/۰۱۵	۰/۰۱۷	۰/۰۱۹	۰/۰۲۲	۰/۰۲۴	۰/۰۲۷
۲	$H_t(m)$	۱/۰۳۷	۱/۰۳۹	۱/۰۴۳	۱/۰۴۷	۱/۰۵۱	۱/۰۵۵	۱/۰۵۹	۱/۰۶۳
۳	$q(m^2/s)$	۰/۰۱۲	۰/۰۱۳	۰/۰۱۵	۰/۰۱۷	۰/۰۱۹	۰/۰۲۲	۰/۰۲۴	۰/۰۲۷
۴	$y_1(m)$	۰/۰۲۱	۰/۰۲۱	۰/۰۲۲	۰/۰۲۳	۰/۰۲۴	۰/۰۲۵	۰/۰۲۶	۰/۰۲۸
۵	$V_1(m/s)$	۰/۵۶۷	۰/۶۲۲	۰/۶۸۷	۰/۷۵۸	۰/۸۰۳	۰/۸۸۸	۰/۹۲۹	۰/۹۷۹
۶	F_r	۱/۲۲۹	۱/۳۴۳	۱/۴۷۴	۱/۵۹	۱/۶۴۳	۱/۷۹۷	۱/۸۳	۱/۸۸
۷	$H_1(m)$	۰/۰۳۸	۰/۰۴۱	۰/۰۴۶	۰/۰۵۲	۰/۰۵۷	۰/۰۶۵	۰/۰۷۰	۰/۰۷۶
۸	$\Delta H(m)$	۰/۹۹۹	۰/۹۹۸	۰/۹۹۷	۰/۹۹۵	۰/۹۹۴	۰/۹۹۰	۰/۹۸۹	۰/۹۸۷
۹	$\Delta H/H_t(\%)$	۹۶/۳۲	۹۶	۹۵/۵۷	۹۴/۹۹	۹۴/۵۵	۹۳/۸۳	۹۳/۳۵	۹۲/۸
۱۰	$y_c(m)$	۰/۰۲۵	۰/۰۲۷	۰/۰۲۹	۰/۰۳۲	۰/۰۳۴	۰/۰۳۷	۰/۰۳۹	۰/۰۴۲
۱۱	y_c/h	۰/۲۵	۰/۲۷	۰/۲۹	۰/۳۲	۰/۳۴	۰/۳۷	۰/۳۹	۰/۴۲

۳-۴- تجزیه و تحلیل نتایج بدست آمده

این بخش شامل دو قسمت می‌باشد :

۱- بررسی تاثیر لبه‌ها در استهلاک انرژی

۲- بررسی تاثیر ورود هوا در اندازه‌گیری عمق اولیه جریان

۳-۴-۱- بررسی تاثیر لبه‌ها در استهلاک انرژی

در این بخش به چگونگی کارکرد پارامترهای بی‌بعد در تفسیر نتایج آزمایش‌ها اشاره خواهد شد. با کاربرد پارامترهای بی‌بعد در رسم نمودارها، می‌توان بسیاری از مسایل استهلاک انرژی جریان از روی سرریزهای پلکانی را تفسیر نمود. در این بخش از نتایج پژوهش‌های سایر محققین به ازای پارامترهای بی‌بعد برای مقایسه با پژوهش حاضر استفاده شده است. پارامترهای بی‌بعد به دست آمده از آنالیز ابعادی که در فصل سوم به آن پرداخته شده است به صورت زیر می‌باشد :

$$\frac{\Delta H}{H_t} = f_1\left(\frac{x_1 + l}{h_s + h}, \frac{x_2 + l}{h_s + h}, \frac{y_c}{h}\right)$$

همانطور که قبلاً اشاره شد لبه‌های مورد نظر با حالت‌های مختلف بر روی پله‌های ۲، ۳، ۴ و ۵

نصب شدند و افت انرژی با در دست داشتن عمق اولیه جریان و دبی مربوطه بدست آمدند.

۳-۴-۱-۱- نمودارهای $\Delta H/H_t$ بر حسب Q :

برای مقایسه افت انرژی در این حالت، نمودارها را به ۶ قسمت به شرح زیر تقسیم بندی کردیم :

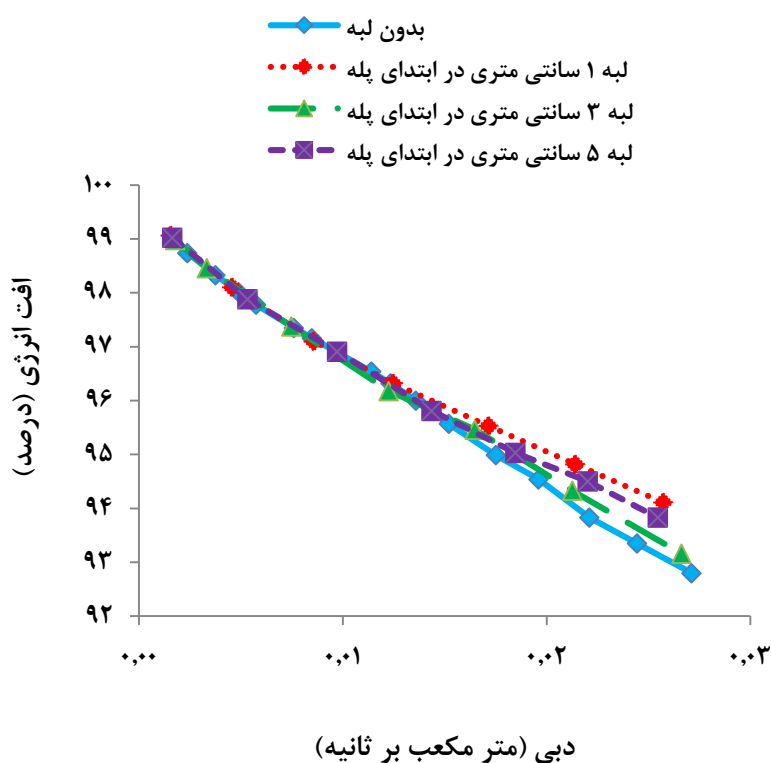
۱- حالتی که لبه‌های ۱، ۳ و ۵ سانتی‌متری در ابتدای پله قرار گرفتند.

۲- حالتی که لبه‌های ۱، ۳ و ۵ سانتی‌متری در وسط پله قرار گرفتند.

۳- حالتی که لبه‌ها همزمان در ابتدا و وسط پله قرار گرفتند.

- ۴- حالتی که لبه ۱ سانتی متری در ابتدای پله ثابت می باشد و لبه های وسط تغییر می کنند.
- ۵- حالتی که لبه ۳ سانتی متری در ابتدای پله ثابت می باشد و لبه های وسط تغییر می کنند.
- ۶- حالتی که لبه ۵ سانتی متری در ابتدای پله ثابت می باشد و لبه های وسط تغییر می کنند.

۱: حالتی که لبه های ۱، ۳ و ۵ سانتی متری در ابتدای پله قرار گرفتند.



شکل ۴-۲- مقایسه درصد افت انرژی بر روی سرریز پلکانی لبه دار (لبه ها در ابتدای پله) و بدون لبه

نمودار تغییرات درصد استهلاک انرژی جریان عبوری از روی سرریز برای دبی های مختلف در حالتی که لبه ها در ابتدای پله نصب می شوند در شکل (۴-۲) نشان داده شده است. همانطور که این شکل نشان می دهد در کلیه حالتها با افزایش دبی جریان افت انرژی کاهش می یابد. همچنین لبه دار بودن پله ها موجب افزایش استهلاک انرژی نسبت به حالت بدون لبه شده است و اثر لبه ۱

سانتی متری بیشتر از لبه ۳ و ۵ سانتی متری است. همچنین ملاحظه می‌شود که در مقادیر دبی کمتر (حدوداً ۰/۰۷ متر مکعب بر ثانیه) روند کاهش استهلاک انرژی در همه حالت‌ها یکسان است و منحنی‌ها بر هم منطبق می‌باشند ولی با افزایش دبی از ۰/۰۷ متر مکعب بر ثانیه لبه‌ها دارای استهلاک انرژی متفاوتی شده‌اند. در حالتی که از لبه ۱ سانتی متری در ابتدای پله استفاده شده مقدار افت انرژی ۹۴/۱۱٪ بوده و در حالت استفاده از لبه ۳ و ۵ سانتی متری در ابتدای پله مقدار افت انرژی به ترتیب ۹۳/۱۶٪ و ۹۳/۸۴٪ می‌باشد. در این حالت شیب نمودار منحنی با لبه ۱ سانتی متری ملایم‌تر از بقیه بوده (شیب = ۸۹/۷۲ درجه) و لبه ۱ سانتی متری را به عنوان لبه مناسب می‌توان معرفی نمود. جداول (۲-۴) تا (۴-۴) مربوط به شکل (۲-۴) می‌باشند.

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

ردیف	شماره مشخصات	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷
۱	$Q(m^3/s)$	۰/۰۰۱۶	۰/۰۰۴۶	۰/۰۰۸۶	۰/۰۱۲۵	۰/۰۱۷۲	۰/۰۲۱۴	۰/۰۲۵۷
۲	$H_1(m)$	۱/۰۰۹	۱/۰۱۹	۱/۰۲۹	۱/۰۳۸	۱/۰۴۶۷	۱/۰۵۴	۱/۰۶۱۱
۳	$q(m^2/s)$	۰/۰۰۱۶	۰/۰۰۴۶	۰/۰۰۸۶	۰/۰۱۲۵	۰/۰۱۷۲	۰/۰۲۱۴	۰/۰۲۵۷
۴	$y_1(m)$	۰/۰۰۵۹	۰/۰۱۲	۰/۰۱۶	۰/۰۲۲۶	۰/۰۲۹۵	۰/۰۳۲۶	۰/۰۳۵۱
۵	$V_1(m/s)$	۰/۲۶۲	۰/۳۶۹	۰/۵۱۴	۰/۵۵۲	۰/۵۸۰۳	۰/۶۵۶	۰/۷۳۳
۶	F_r	۱/۰۹	۱/۰۵۷	۱/۲۷	۱/۱۷۴	۱/۰۷۸۳	۱/۱۶	۱/۲۵
۷	$H_1(m)$	۰/۰۰۹۴	۰/۰۱۹۳	۰/۰۳	۰/۰۳۸۱	۰/۰۴۶۷	۰/۰۵۴۶	۰/۰۶۲۵
۸	$\Delta H(m)$	۰/۹۹۹۹	۰/۹۹۹۹	۰/۹۹۹۲	۰/۹۹۹۵	۰/۹۹۹۹	۰/۹۹۹۴	۰/۹۹۸۶
۹	$\Delta H/H_1(\%)$	۹۹/۰۶۷	۹۸/۱۰	۹۷/۱	۹۶/۳۲	۹۵/۵۳	۹۴/۸۲	۹۴/۱۱
۱۰	$y_c(m)$	۰/۰۰۶۳	۰/۰۱۲۹	۰/۰۱۹۶	۰/۰۲۵۱	۰/۰۳۱۱	۰/۰۳۶	۰/۰۴۰۷
۱۱	y_c/h	۰/۰۶۳	۰/۱۲۹	۰/۱۹۶	۰/۲۵۱	۰/۳۱۱	۰/۳۶	۰/۴۰۷

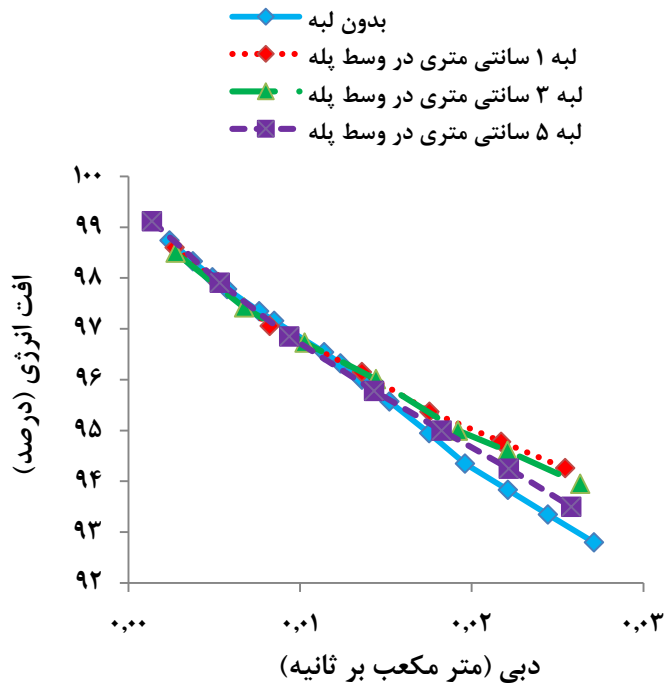
جدول ۴-۳- محاسبه پارامترهای هیدرولیکی برای سرریز پلکانی با لبه ۳ سانتی متری در ابتدای پله

ردیف	شماره / مشخصات	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷
۱	$Q(m^3/s)$	۰/۰۰۱۸	۰/۰۰۳۳	۰/۰۰۷۵	۰/۰۱۲۳	۰/۰۱۶۵	۰/۰۲۱۳	۰/۰۲۶۶
۲	$H_t(m)$	۱/۰۱۰۲	۱/۰۱۶	۱/۰۲۶۸	۱/۰۳۷۲	۱/۰۴۵۴	۱/۰۵۴	۱/۰۶۲۴۹
۳	$q(m^2/s)$	۰/۰۰۱۸	۰/۰۰۳۳	۰/۰۰۷۵	۰/۰۱۲۳	۰/۰۱۶۵	۰/۰۲۱۳	۰/۰۲۶۶
۴	$y_1(m)$	۰/۰۰۶۳	۰/۰۱۰۸	۰/۰۱۷۱	۰/۰۱۹۵	۰/۰۲۴۷	۰/۰۲۶۲	۰/۰۲۸۷
۵	$V_1(m/s)$	۰/۲۸۲	۰/۳۰۹۸	۰/۴۳۷	۰/۶۲۸	۰/۶۶۸	۰/۸۱۰۸	۰/۹۲۸۶
۶	F_r	۱/۱۳۷	۰/۹۵۴۵	۱/۰۶۸۵	۱/۴۳۷	۱/۳۵۸	۱/۵۹۹	۱/۷۵۲
۷	$H_1(m)$	۰/۰۱	۰/۰۱۵۶	۰/۰۲۶۸	۰/۰۳۹۶	۰/۰۴۷۴	۰/۰۵۹۸	۰/۷۲۶۵
۸	$\Delta H(m)$	۰/۹۹۹۹	۰/۹۹۹۹	۰/۹۹۹۹	۰/۹۹۷	۰/۹۹۷۹	۰/۹۹۴۰	۰/۹۸۹۸
۹	$\frac{\Delta H}{H_t}(\%)$	۹۸/۹۸	۹۸/۴۶	۹۷/۳۸	۹۶/۱۷	۹۵/۴۶	۹۴/۳۳	۹۳/۱۶
۱۰	$y_c(m)$	۰/۰۰۶۸	۰/۰۱۰۴	۰/۰۱۷۹	۰/۰۲۴۸	۰/۰۳۰۳	۰/۰۳۵۹	۰/۰۴۱۷
۱۱	$\frac{y_c}{h}$	۰/۰۶۸	۰/۱۰۴	۰/۱۷۹	۰/۲۴۸	۰/۳۰۳	۰/۳۵۹	۰/۴۱۷

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

ردیف	شماره / مشخصات	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷
۱	$Q(m^3/s)$	۰/۰۰۱۶	۰/۰۰۵۳	۰/۰۰۹۷	۰/۰۱۴۴	۰/۰۱۸۵	۰/۰۲۲۰	۰/۰۲۵۵
۲	$H_t(m)$	۱/۰۰۹	۱/۰۲۱۴	۱/۰۳۲	۱/۰۴۱	۱/۰۴۸۹	۱/۰۵۵	۱/۰۶۰۶
۳	$q(m^2/s)$	۰/۰۰۱۶	۰/۰۰۵۳	۰/۰۰۹۷	۰/۰۱۴۴	۰/۰۱۸۵	۰/۰۲۲	۰/۰۲۵۵
۴	$y_1(m)$	۰/۰۰۷	۰/۰۱۵۷	۰/۰۲۱۳	۰/۰۲۲	۰/۰۲۵۶	۰/۰۳	۰/۰۳۱
۵	$V_1(m/s)$	۰/۲۲۵	۰/۳۳۹۹	۰/۴۵۶	۰/۶۴۹	۰/۷۲۱۵	۰/۷۳۴	۰/۸۲۱
۶	F_r	۰/۸۴	۰/۸۶۷	۰/۹۹۸	۱/۳۹۴	۱/۴۴	۱/۳۵۴	۱/۴۸۹
۷	$H_1(m)$	۰/۰۰۹۹	۰/۰۲۱۶	۰/۰۳۱۹	۰/۰۴۴	۰/۰۵۲۲	۰/۰۵۸	۰/۰۶۵۴
۸	$\Delta H(m)$	۰/۹۹۹۸	۰/۹۹۹۸	۱	۰/۹۹۸	۰/۹۹۶۸	۰/۹۹۸	۰/۹۹۵۳
۹	$\frac{\Delta H}{H_t}(\%)$	۹۹/۰۲	۹۷/۸۸	۹۶/۹۱	۹۵/۸۱	۹۵/۰۳	۹۴/۵۵	۹۳/۸۴
۱۰	$y_c(m)$	۰/۰۰۶۵	۰/۰۱۴۳	۰/۰۲۱۳	۰/۰۲۷۶	۰/۰۳۲۷	۰/۰۳۶۷	۰/۰۴۰۴۳
۱۱	$\frac{y_c}{h}$	۰/۰۶۵	۰/۱۴۳	۰/۲۱۳	۰/۲۷۶	۰/۳۲۷	۰/۳۶۷	۰/۴۰۴۳

۲: حالتی که لبه‌های ۱، ۳ و ۵ سانتی‌متر در وسط پله قرار گرفتند.



شکل ۴-۳- مقایسه درصد افت انرژی بر روی سرریز پلکانی لبه‌دار (لبه‌ها در وسط پله) و بدون لبه

نمودار تغییرات درصد استهلاک انرژی جریان عبوری از روی سرریز در حالتی که لبه‌ها در وسط پله نصب می‌شوند برای دبی‌های مختلف در شکل (۳-۴) نشان داده شده است. همانطور که این شکل نشان می‌دهد در کلیه حالت‌ها با افزایش دبی جریان افت انرژی کاهش می‌یابد. همچنین لبه‌دار بودن پله‌ها موجب افزایش استهلاک انرژی نسبت به حالت بدون لبه شده است و اثر لبه ۱ سانتی‌متری بیشتر از لبه ۳ و ۵ سانتی‌متری است. همچنین ملاحظه می‌شود که در مقادیر دبی کمتر (تا حدوداً ۰/۰۳ متر مکعب بر ثانیه) روند کاهش استهلاک انرژی در همه حالت‌ها یکسان است و منحنی‌ها بر هم منطبق می‌باشند ولی با افزایش دبی از ۰/۰۳ متر مکعب بر ثانیه اثر لبه‌ها ملموس‌تر شده و لبه‌ها دارای استهلاک انرژی متفاوتی می‌باشند. در حالتی که از لبه ۱ سانتی‌متری در وسط پله استفاده شده مقدار افت انرژی ۹۴/۲۶٪ و در حالت استفاده از لبه ۳ و ۵ سانتی‌متری در وسط پله

مقدار افت انرژی به ترتیب ۹۳/۹۵٪ و ۹۳/۵٪ می‌باشد. با توجه به این نتایج و اینکه شیب نمودار منحنی با لبه ۱ سانتی‌متری ملایم‌تر از بقیه بوده (شیب = ۸۹/۷ درجه)، می‌توان لبه ۱ سانتی‌متری را به عنوان لبه مناسب معرفی نمود. جداول (۴-۵) تا (۴-۷) مربوط به شکل (۴-۳) می‌باشند.

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

شماره مشخصات	شماره							ردیف
	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	
$Q(m^3/s)$	۰/۰۰۲۷	۰/۰۰۵۲	۰/۰۰۰۸	۰/۰۱۳۶	۰/۰۱۷۵	۰/۰۲۱۷	۰/۰۲۵۴	۱
$H_t(m)$	۱/۰۱۴	۱/۰۲۱	۱/۰۲۸۶	۱/۰۳۹	۱/۰۴۷	۱/۰۵۴۵	۱/۰۶۰۶	۲
$q(m^2/s)$	۰/۰۰۲۷	۰/۰۰۵۲	۰/۰۰۸۲	۰/۰۱۳۶	۰/۰۱۷۵	۰/۰۲۱۷	۰/۰۲۵۴	۳
$y_1(m)$	۰/۰۰۷	۰/۰۱۳۲	۰/۰۱۵۱	۰/۰۲۵۶	۰/۰۲۷	۰/۰۴۰۲	۰/۰۴۳	۴
$V_1(m/s)$	۰/۳۷۳	۰/۳۹۶	۰/۵۴۴	۰/۵۳۱	۰/۶۴۹	۰/۵۴۰۵	۰/۵۹۱۶	۵
F_r	۱/۴۰۴	۱/۱۰۱۰	۱/۴۱۲	۱/۰۵۹۵	۱/۲۶۲	۰/۸۶۱۴	۰/۹۱۱۳	۶
$H_1(m)$	۰/۰۱۴۳	۰/۰۲۱۲	۰/۰۳۰۲	۰/۰۴	۰/۰۴۸۵	۰/۰۵۵۱	۰/۰۶۰۹	۷
$\Delta H(m)$	۰/۹۹۹۲	۰/۹۹۹۹	۰/۹۹۸	۰/۹۹۹۹	۰/۹۹۸۸	۰/۹۹۹	۰/۹۹۹۸	۸
$\Delta H/H_t(\%)$	۹۸/۶	۹۷/۹۲	۹۷/۰۶	۹۶/۱۵	۹۵/۳۷	۹۴/۷۸	۹۴/۲۶	۹
$y_c(m)$	۰/۰۰۹	۰/۰۱۴۱	۰/۰۱۹	۰/۰۲۶۶	۰/۰۳۱۵	۰/۰۳۶۴	۰/۰۴۰۴	۱۰
y_c/h	۰/۰۹۰۲	۰/۱۴۱	۰/۱۹	۰/۲۶۶	۰/۳۱۵	۰/۳۶۴	۰/۴۰۴	۱۱

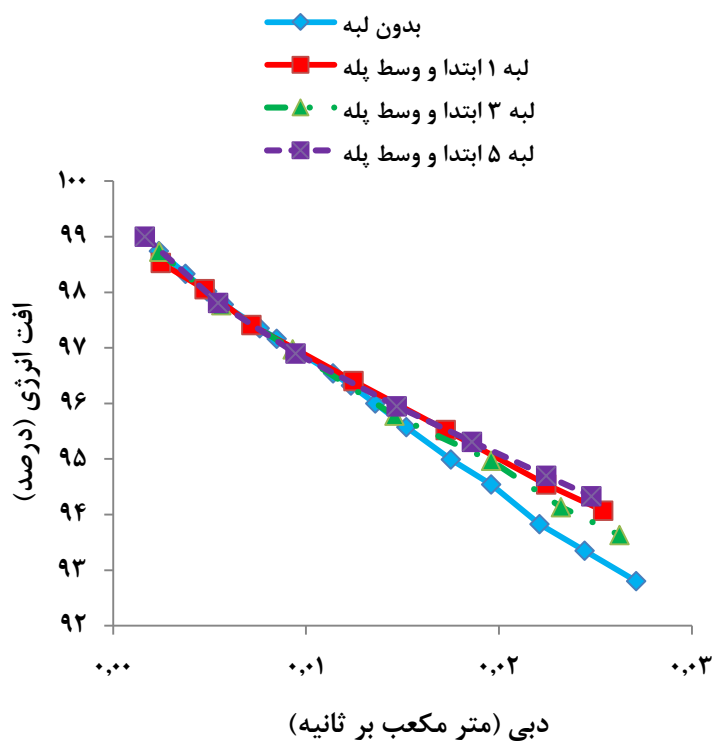
جدول ۴-۶- محاسبه پارامترهای هیدرولیکی برای سرریز پلکانی با لبه ۳ سانتی‌متری در وسط پله

شماره مشخصات	شماره							ردیف
	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	
$Q(m^3/s)$	۰/۰۰۲۷	۰/۰۰۶۷	۰/۰۱۰۳	۰/۰۱۴۴	۰/۰۱۹۲	۰/۰۲۲۱	۰/۰۲۶۳	۱
$H_t(m)$	۱/۰۱۴	۱/۰۲۵	۱/۰۳۳	۱/۰۴۲	۱/۰۵۰	۱/۰۵۵۲	۱/۰۶۲	۲
$q(m^2/s)$	۰/۰۰۲۷	۰/۰۰۶۷	۰/۰۱۰۳	۰/۰۱۴۴	۰/۰۱۹۲	۰/۰۲۲۱	۰/۰۲۶۳	۳
$y_1(m)$	۰/۰۰۷	۰/۰۱۳۲	۰/۰۱۹۱	۰/۰۲۶	۰/۰۲۷۳	۰/۰۳۰۸	۰/۰۳۴۴	۴
$V_1(m/s)$	۰/۴۱۵	۰/۵۰۹	۰/۵۳۷	۰/۵۵۴	۰/۷۰۲	۰/۷۱۷	۰/۷۶۴	۵
F_r	۱/۶۳۱	۱/۴۱۴	۱/۲۴۱	۱/۰۹۷۹	۱/۳۵۶	۱/۳۰۵۱	۱/۳۱۶	۶
$H_1(m)$	۰/۰۱۵۴	۰/۰۲۶۴	۰/۰۳۴	۰/۰۴۱۷	۰/۰۵۲۵	۰/۰۵۷	۰/۰۶۴۲	۷
$\Delta H(m)$	۰/۹۹۸۳	۰/۹۹۸۶	۰/۹۹۹	۱/۰۰۰۳	۰/۹۹۷۸	۰/۹۹۸۱	۰/۹۹۷۸	۸
$\Delta H/H_t(\%)$	۹۸/۵	۹۷/۴۲	۹۶/۷۳	۹۶	۹۵	۹۴/۶	۹۳/۹۵	۹
$y_c(m)$	۰/۰۰۹۲	۰/۰۱۶۶	۰/۰۲۲۱	۰/۰۲۷۷	۰/۰۳۴	۰/۰۳۷	۰/۰۴۱	۱۰
y_c/h	۰/۰۹۲	۰/۱۶۶	۰/۲۲۱	۰/۲۷۷	۰/۳۴	۰/۳۶۸	۰/۴۱	۱۱

جدول ۴-۷- محاسبه پارامترهای هیدرولیکی برای سرریز پلکانی با لبه ۵ سانتی‌متری در وسط پله

ردیف	شماره مشخصات	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷
۱	$Q(m^3/s)$	۰/۰۰۱۴	۰/۰۰۵	۰/۰۰۹۴	۰/۰۱۴۳	۰/۰۱۸۲	۰/۰۲۲۲	۰/۰۲۵۷۹
۲	$H_t(m)$	۱/۰۰۸۶	۱/۰۲۱۳	۱/۰۳۱۱	۱/۰۴۱۳	۱/۰۴۸۶	۱/۰۵۵	۱/۰۶۱۲
۳	$q(m^2/s)$	۰/۰۰۱۴	۰/۰۰۵	۰/۰۰۹۴	۰/۰۱۴۳	۰/۰۱۸۲	۰/۰۲۲۲	۰/۰۲۵۷۹
۴	$y_1(m)$	۰/۰۰۷	۰/۰۱۳۹	۰/۰۱۷	۰/۰۲۱۷	۰/۰۲۴۲	۰/۰۲۷۵	۰/۰۲۹۲
۵	$V_1(m/s)$	۰/۱۹۴	۰/۳۸۲	۰/۵۵۱	۰/۶۶	۰/۷۵۴	۰/۸۰۵۸	۰/۸۸۳۲
۶	F_r	۰/۷۴۱	۱/۰۳۵	۱/۳۴۹	۱/۴۳۲	۱/۵۴۸	۱/۵۵۲	۱/۶۵۱
۷	$H_1(m)$	۰/۰۰۸۹	۰/۰۲۱۳	۰/۰۳۲۵	۰/۰۴۴	۰/۰۵۳۲	۰/۰۶۰۶	۰/۰۶۹
۸	$\Delta H(m)$	۰/۹۹۹۷	۰/۹۹۹۹	۰/۹۹۸	۰/۹۹۷	۰/۹۹۵	۰/۹۹۴۷	۰/۹۹۲۲
۹	$\frac{\Delta H}{H_t}(\%)$	۹۹/۱۲	۹۷/۹۱	۹۶/۸۵	۹۵/۷۸	۹۵	۹۴/۲۵	۹۳/۵
۱۰	$y_c(m)$	۰/۰۰۵۷	۰/۰۱۴۲	۰/۰۲۱	۰/۰۲۷۵	۰/۰۳۲۴	۰/۰۳۶۹	۰/۰۴۱
۱۱	y_c/h	۰/۰۵۷	۰/۱۴۲	۰/۲۱	۰/۲۷۵	۰/۳۲۴	۰/۳۶۹	۰/۴۱

۳: حالتی که لبه‌ها در ابتدا و وسط پله قرار گرفتند.



شکل ۴-۴- مقایسه درصد افت انرژی بر روی سرریز پلکانی لبه‌دار (لبه‌ها در ابتدا و وسط پله) و بدون لبه

نمودار تغییرات درصد استهلاک انرژی جریان عبوری از روی سرریز در حالتی که لبه‌ها در ابتدا و وسط پله نصب می‌شوند برای دبی‌های مختلف در شکل (۴-۴) نشان داده شده است. همانطور که این شکل نشان می‌دهد در کلیه حالت‌ها با افزایش دبی جریان افت انرژی کاهش می‌یابد. همچنین لبه‌دار بودن پله‌ها موجب افزایش استهلاک انرژی نسبت به حالت بدون لبه شده است و اثر لبه ۵ سانتی‌متری بیشتر از لبه ۱ و ۳ سانتی‌متری است. همچنین شیب نمودار منحنی با لبه ۵ سانتی‌متری ملایم‌تر از بقیه بوده (شیب = $89/715$ درجه)، می‌توان لبه ۵ سانتی‌متری را به عنوان لبه مناسب معرفی نمود. جداول (۴-۸) تا (۴-۱۰) مربوط به شکل (۴-۴) می‌باشند.

جدول ۴-۸- محاسبه پارامترهای هیدرولیکی برای سرریز پلکانی با لبه ۱ سانتی‌متری در ابتدا و وسط پله

شماره مشخصات	شماره							ردیف
	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	
$Q(m^3/s)$	۰/۰۰۲۵	۰/۰۰۴۸	۰/۰۰۷۲	۰/۰۱۲۵	۰/۰۱۷۳	۰/۰۲۲۵	۰/۰۲۵۴	۱
$H_t(m)$	۱/۰۱۳	۱/۰۱۹	۱/۰۲۶۱	۱/۰۳۷۶	۱/۰۴۶۸	۱/۰۵۵۸	۱/۰۶۰۶	۲
$q(m^2/s)$	۰/۰۰۲۵	۰/۰۰۴۸	۰/۰۰۷۲	۰/۰۱۲۵	۰/۰۱۷۳	۰/۰۲۲۵	۰/۰۲۵۴	۳
$y_1(m)$	۰/۰۱۳	۰/۰۱۳۸	۰/۰۱۵۲	۰/۰۲۵۵	۰/۰۲۹۵	۰/۰۳۱۲	۰/۰۳۳۴	۴
$V_1(m/s)$	۰/۱۹۱	۰/۳۴۳	۰/۴۷۲	۰/۴۸۹	۰/۵۸۴	۰/۷۱۹۹	۰/۷۶۰۵	۵
F_r	۰/۵۳۴	۰/۹۳۲	۱/۲۲۴	۰/۹۷۷	۱/۰۸۴۹	۱/۳۰۲	۱/۳۲۹۳	۶
$H_1(m)$	۰/۰۱۴۹	۰/۰۱۹۸	۰/۰۲۶۶	۰/۰۳۸	۰/۰۴۶۹	۰/۰۵۷۶	۰/۰۶۲۹	۷
$\Delta H(m)$	۰/۹۹۷۹	۰/۹۹۹۹	۰/۹۹۹	۰/۹۹۹۹	۰/۹۹۹	۰/۹۹۸۱	۰/۹۹۷۷	۸
$\Delta H/H_t(\%)$	۹۸/۵۲	۹۸/۰۵	۹۷/۴۱	۹۶/۴	۹۵/۵۲	۹۴/۵۲	۹۴/۰۷	۹
$y_c(m)$	۰/۰۰۸۶	۰/۰۱۳۲	۰/۰۱۷۴	۰/۰۲۵۱	۰/۰۳۱۲	۰/۰۳۷۲	۰/۰۴۰۴	۱۰
y_c/h	۰/۰۸۶	۰/۱۳۲	۰/۱۷۴	۰/۲۵۱	۰/۳۱۲	۰/۳۷۲	۰/۴۰۴	۱۱

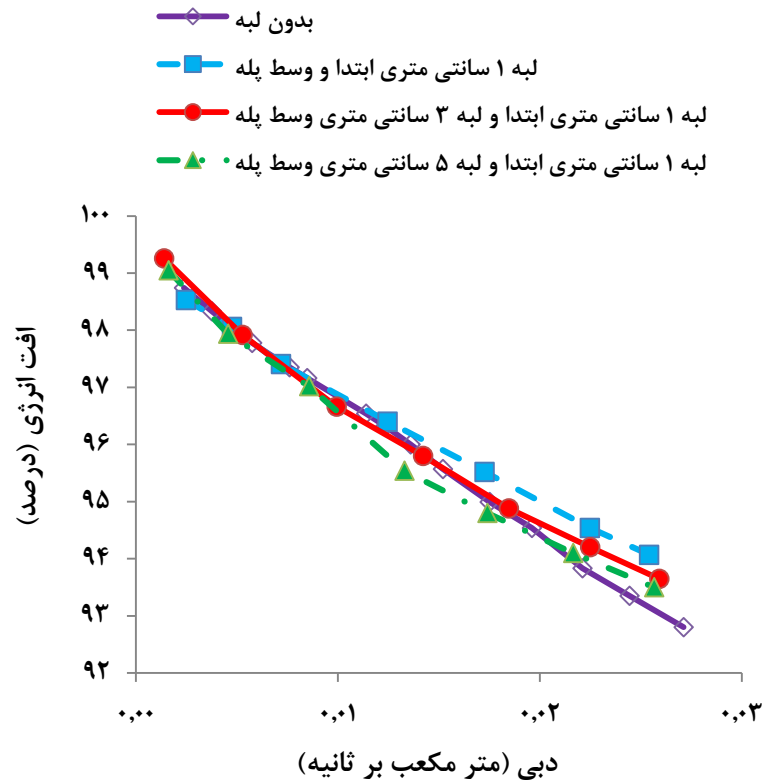
جدول ۴-۹- محاسبه پارامترهای هیدرولیکی برای سرریز پلکانی با لبه ۳ سانتی متری در ابتدا و وسط پله

ردیف	شماره / مشخصات	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷
۱	$Q(m^3/s)$	۰/۰۰۲۴	۰/۰۰۵۶۲	۰/۰۰۹۳	۰/۰۱۴۶	۰/۰۱۹۶	۰/۰۲۳۲	۰/۰۲۶۳
۲	$H_t(m)$	۱/۰۱۲۵	۱/۰۲۲۱۴	۱/۰۲۴۶	۱/۰۴۱۹	۱/۰۵۰۹	۱/۰۵۷۰	۱/۰۶۱۹
۳	$q(m^2/s)$	۰/۰۰۲۴	۰/۰۰۵۶۲	۰/۰۰۹۳	۰/۰۱۴۶	۰/۰۱۹۶	۰/۰۲۳۲	۰/۰۲۶۳
۴	$y_1(m)$	۰/۰۰۹۹	۰/۰۱۲۴۵	۰/۰۲۱۱	۰/۰۲۲۵	۰/۰۲۸۲	۰/۰۲۸۸	۰/۰۳۱
۵	$V_1(m/s)$	۰/۲۴۱	۰/۴۵۱۲	۰/۴۴۱۲	۰/۶۴۸	۰/۶۹۵	۰/۸۰۷۴	۰/۸۴۷۱
۶	F_r	۰/۷۷۴	۱/۲۹۲	۰/۹۷۰۲	۱/۳۸۱	۱/۳۲۰۶	۱/۵۲۱	۱/۵۳۷
۷	$H_1(m)$	۰/۰۱۲۹	۰/۰۲۲۸۴	۰/۰۳۱	۰/۰۴۳۹	۰/۰۵۲۸	۰/۰۶۲۰	۰/۰۶۷۶
۸	$\Delta H(m)$	۰/۹۹۹۶	۰/۹۹۹۳	۰/۹۹۹۴	۰/۹۹۸	۰/۹۹۸۱	۰/۹۹۵۰	۰/۹۹۴۳
۹	$\Delta H/H_t(\%)$	۹۸/۷۲	۹۷/۷۶	۹۶/۹۶	۹۵/۷۸	۹۴/۹۷	۹۴/۱۳	۹۳/۶۳
۱۰	$y_c(m)$	۰/۰۰۸۴	۰/۰۱۴۸	۰/۰۱۶۴	۰/۰۲۷۹	۰/۰۳۴	۰/۰۳۸	۰/۰۴۱۳
۱۱	y_c/h	۰/۰۸۳۴	۰/۱۴۸	۰/۱۶۴	۰/۲۷۹	۰/۳۳۹	۰/۳۸	۰/۴۱۳

جدول ۴-۱۰- محاسبه پارامترهای هیدرولیکی برای سرریز پلکانی با لبه ۵ سانتی متری در ابتدا و وسط پله

ردیف	شماره / مشخصات	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷
۱	$Q(m^3/s)$	۰/۰۰۱۶	۰/۰۰۵۵	۰/۰۰۹۵	۰/۰۱۴۷	۰/۰۱۸۶	۰/۰۲۲۵	۰/۰۲۴۸
۲	$H_t(m)$	۱/۰۰۹	۱/۰۲۲	۱/۰۳۱۴	۱/۰۴۲	۱/۰۴۹۲	۱/۰۵۵۸	۱/۰۵۹۶
۳	$q(m^2/s)$	۰/۰۰۱۶	۰/۰۰۵۵	۰/۰۰۹۵	۰/۰۱۴۷	۰/۰۱۸۶	۰/۰۲۲۵	۰/۰۲۴۸
۴	$y_1(m)$	۰/۰۰۷	۰/۰۱۶۶	۰/۰۱۸۱	۰/۰۳	۰/۰۳۲۹	۰/۰۳۴۷	۰/۰۳۶۵
۵	$V_1(m/s)$	۰/۲۳۵	۰/۳۲۹	۰/۵۲۳	۰/۴۹	۰/۵۶۶	۰/۶۴۶۹	۰/۶۷۹
۶	F_r	۰/۸۹۶	۰/۸۱۸	۱/۲۴۲	۰/۹۰۳۷	۰/۹۹۶۱	۱/۱۰۹۳	۱/۱۳۵۶
۷	$H_1(m)$	۰/۰۰۹۸	۰/۰۲۲۱	۰/۰۳۲۱	۰/۰۴۲۳	۰/۰۴۹۲	۰/۰۵۶	۰/۰۶
۸	$\Delta H(m)$	۰/۹۹۹۹	۰/۹۹۹۶	۰/۹۹۹	۰/۹۹۹	۰/۹۹۹۹	۰/۹۹۹۷	۰/۹۹۹۵
۹	$\Delta H/H_t(\%)$	۹۹	۹۷/۸۱	۹۶/۹۸	۹۵/۹۵	۹۵/۳۱	۹۴/۷	۹۴/۳۳
۱۰	$y_c(m)$	۰/۰۰۶۵	۰/۰۱۴۵	۰/۰۲۰۹	۰/۰۲۸	۰/۰۳۳	۰/۰۳۷۲	۰/۰۳۹۷
۱۱	y_c/h	۰/۰۶۵	۰/۱۴۵	۰/۲۰۹	۰/۲۸	۰/۳۲۸	۰/۳۷۲	۰/۳۹۷

۴: حالتی که لبه ۱ سانتی متری در ابتدای پله ثابت می‌باشد و لبه‌های وسط تغییر می‌کنند.



شکل ۴-۵- مقایسه درصد افت انرژی برای لبه ۱ سانتی متری در ابتدای پله و لبه‌های متغیر در وسط

شکل (۴-۵) نشان می‌دهد که در کلیه حالت‌ها با افزایش دبی جریان افت انرژی کاهش

می‌یابد. همچنین کاهش ارتفاع لبه در وسط پله باعث افزایش افت انرژی شده است. جداول (۴-۸)،

(۴-۱۱) و (۴-۱۲) مربوط به شکل (۴-۵) می‌باشند.

جدول ۴-۱۱- محاسبه پارامترهای هیدرولیکی برای سرریز پلکانی با لبه ۱ سانتی‌متری در ابتدا و لبه ۳

سانتی‌متری در وسط پله

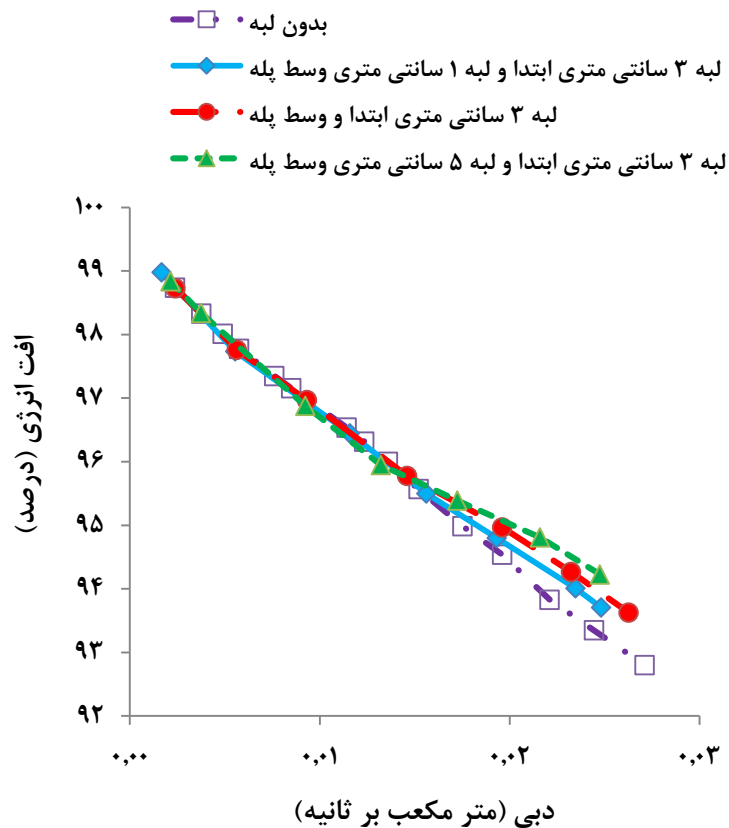
ردیف	شماره / مشخصات	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷
۱	$Q(m^3/s)$	۰/۰۰۱۴	۰/۰۰۵۲۷	۰/۰۰۹۹	۰/۰۱۴۲	۰/۰۱۸۵	۰/۰۲۲۵	۰/۰۲۵۹
۲	$H_1(m)$	۱/۰۰۹	۱/۰۲۱۲	۱/۰۳۲۴	۱/۰۴۱۱	۱/۰۴۸۹	۱/۰۵۵۸	۱/۰۶۱۴
۳	$q(m^2/s)$	۰/۰۰۱۴	۰/۰۰۵۲۷	۰/۰۰۹۹	۰/۰۱۴۲	۰/۰۱۸۵	۰/۰۲۲۵	۰/۰۲۵۹
۴	$y_1(m)$	۰/۰۰۷۵	۰/۰۱۳۶۶	۰/۰۱۷	۰/۰۲۲۱	۰/۰۲۴۳	۰/۰۲۷۵	۰/۰۳۰۴
۵	$V_1(m/s)$	۰/۰۱۸۶	۰/۳۸۵۷	۰/۵۸۴	۰/۶۴۳	۰/۷۵۸	۰/۸۱۷	۰/۸۵۲
۶	F_r	۰/۰۶۸۵	۱/۰۵۴۲	۱/۴۳۱	۱/۳۸۳	۱/۵۵	۱/۵۷۴۵	۱/۵۶۱
۷	$H_1(m)$	۰/۰۰۷۵	۰/۰۲۱۲۵	۰/۰۳۴۴	۰/۰۴۳۲	۰/۰۵۳۶	۰/۰۶۱۶	۰/۰۶۷۴
۸	$\Delta H(m)$	۱/۰۰۱۲	۰/۹۹۹۹	۰/۹۹۸	۰/۹۹۸	۰/۹۹۵	۰/۹۹۴	۰/۹۹۴
۹	$\Delta H/H_1(\%)$	۹۹/۲۶	۹۷/۹۱	۹۶/۶۶	۹۵/۸	۹۴/۸۸	۹۴/۲	۹۳/۶۵
۱۰	$y_c(m)$	۰/۰۰۵۸	۰/۰۱۴۲	۰/۰۲۱۶	۰/۰۲۷۴	۰/۰۳۲۶	۰/۰۳۷۲	۰/۰۴۰۹
۱۱	y_c/h	۰/۰۵۸	۰/۱۴۲	۰/۲۱۶	۰/۲۷۴	۰/۳۲۶	۰/۳۷۲	۰/۴۰۹

جدول ۴-۱۲- محاسبه پارامترهای هیدرولیکی برای سرریز پلکانی با لبه ۱ سانتی‌متری در ابتدا و لبه ۵

سانتی‌متری در وسط پله

ردیف	شماره / مشخصات	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷
۱	$Q(m^3/s)$	۰/۰۰۱۶	۰/۰۰۴۶	۰/۰۰۸۶	۰/۰۱۳۳	۰/۰۱۷۴	۰/۰۲۱۶	۰/۰۲۵۷
۲	$H_1(m)$	۱/۰۰۹۶	۱/۰۱۹۳	۱/۰۲۹۴	۱/۰۳۹۳	۱/۰۴۷۱	۱/۰۵۴۴	۱/۰۶۰۹
۳	$q(m^2/s)$	۰/۰۰۱۶	۰/۰۰۴۶	۰/۰۰۸۶	۰/۰۱۳۳	۰/۰۱۷۴	۰/۰۲۱۶	۰/۰۲۵۷
۴	$y_1(m)$	۰/۰۰۶۵	۰/۰۰۹۶	۰/۰۱۶	۰/۰۱۹۷	۰/۰۲۱۸	۰/۰۲۵۵	۰/۰۲۸۸
۵	$V_1(m/s)$	۰/۲۴۷	۰/۴۷۳	۰/۵۳۶	۰/۶۷۵	۰/۷۹۸	۰/۸۴۸۶	۰/۸۹۰۶
۶	F_r	۰/۹۷۹	۱/۵۴	۱/۳۵۳	۱/۵۳۵	۱/۷۲۶	۱/۶۹۷۵	۱/۶۷۶
۷	$H_1(m)$	۰/۰۰۹۶	۰/۰۲۱۱	۰/۰۳۰۶	۰/۰۴۲۹	۰/۰۵۴۳	۰/۰۶۲۲	۰/۰۶۹۳
۸	$\Delta H(m)$	۰/۹۹۹۹	۰/۹۹۸۲	۰/۹۹۹	۰/۹۹۶	۰/۹۹۳	۰/۹۹۲۲	۰/۹۹۲
۹	$\Delta H/H_1(\%)$	۹۹/۰۵	۹۷/۹	۹۷/۰۲	۹۵/۸۷	۹۴/۸	۹۴/۱	۹۳/۵
۱۰	$y_c(m)$	۰/۰۰۶۴	۰/۰۱۲۸	۰/۰۱۹۶	۰/۰۲۶۲	۰/۰۳۱۴	۰/۰۳۶۳	۰/۰۴۰۶
۱۱	y_c/h	۰/۰۶۴	۰/۱۲۸	۰/۱۹۶	۰/۲۶۲	۰/۳۱۴	۰/۳۶۳	۰/۴۰۶

۵: حالتی که لبه ۳ سانتی متری در ابتدای پله ثابت می باشد و لبه های وسط تغییر می کنند.



شکل ۴-۶- مقایسه درصد افت انرژی برای لبه ۳ سانتی متری در ابتدای پله و لبه های متغیر در وسط

شکل (۴-۶) نشان می دهد که در کلیه حالتها با افزایش دبی جریان افت انرژی کاهش می یابد. همچنین افزایش ارتفاع لبه در وسط پله باعث افزایش افت انرژی شده است. جداول (۴-۹)، (۴-۱۳) و (۴-۱۴) مربوط به شکل (۴-۶) می باشند.

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

سانتی متری در وسط پله

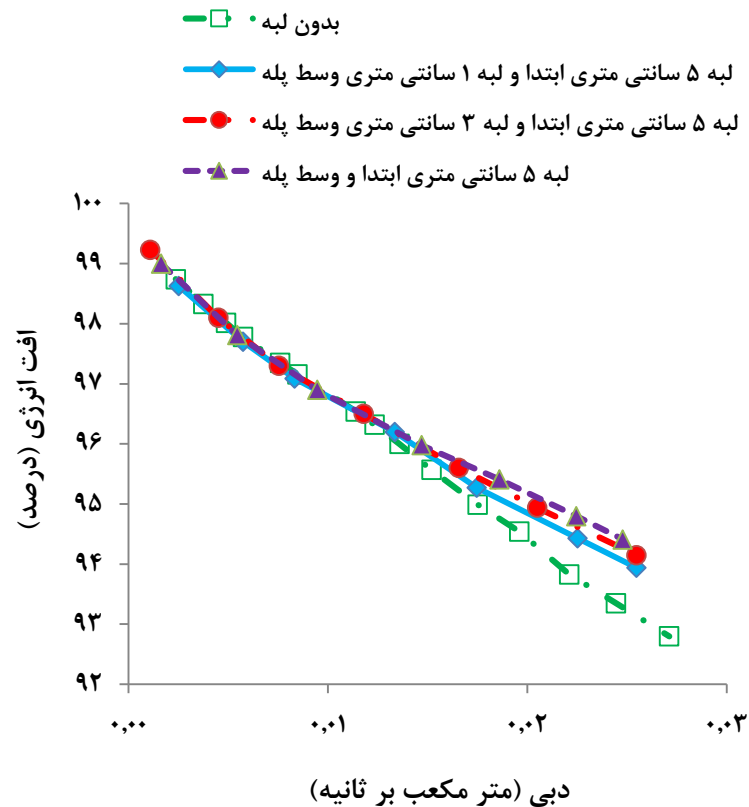
ردیف	شماره مشخصات	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷
۱	$Q(m^3/s)$	۰/۰۰۱۷	۰/۰۰۵۵	۰/۰۱۱۶	۰/۰۱۵۶	۰/۰۱۹۳	۰/۰۲۳۵	۰/۰۲۴۸
۲	$H_1(m)$	۱/۰۰۹۸	۱/۰۲۳	۱/۰۳۵۹	۱/۰۴۴	۱/۰۵۰۴	۱/۰۵۷۴	۱/۰۵۹۷
۳	$q(m^2/s)$	۰/۰۰۱۷	۰/۰۰۵۵	۰/۰۱۱۶	۰/۰۱۵۶	۰/۰۱۹۳	۰/۰۲۳۵	۰/۰۲۴۸
۴	$y_1(m)$	۰/۰۰۸۱	۰/۰۱۵۵	۰/۰۲۰۶	۰/۰۲۳	۰/۰۲۶۳	۰/۰۲۸۳۳	۰/۰۲۸۸
۵	$V_1(m/s)$	۰/۲۰۴	۰/۳۵۷۵	۰/۵۶۱	۰/۶۶۹۹	۰/۷۳۴	۰/۸۲۸۱	۰/۸۶۲
۶	F_r	۰/۷۲۴	۰/۹۱۷۳	۱/۲۴۷	۱/۴۰۲	۱/۳۹۹	۱/۵۷۲	۱/۶۲۳
۷	$H_1(m)$	۰/۰۱۰۲۷	۰/۰۲۲۰۲	۰/۰۳۷	۰/۰۴۶۲	۰/۰۵۴	۰/۰۶۳۳۲	۰/۰۶۶۷
۸	$\Delta H(m)$	۰/۹۹۹۶	۰/۹۹۹۹	۰/۹۹۹۲	۰/۹۹۸	۰/۹۹۶۶	۰/۹۹۴۱	۰/۹۹۳
۹	$\frac{\Delta H}{H_1}(\%)$	۹۸/۹۸	۹۷/۷۴	۹۶/۴۵	۹۵/۵۷	۹۴/۸	۹۴/۰۱	۹۳/۷۱
۱۰	$y_c(m)$	۰/۰۰۶۶	۰/۰۱۴۶۳	۰/۰۲۳۹	۰/۰۲۹۲	۰/۰۳۴	۰/۰۳۸۳	۰/۰۳۹۸
۱۱	$\frac{y_c}{h}$	۰/۰۶۵۶	۰/۱۴۶۳	۰/۲۳۹	۰/۲۹۲	۰/۳۳۶	۰/۳۸۳	۰/۳۹۸

جدول ۴-۱۴- اندازه گیری و محاسبه پارامترهای هیدرولیکی برای سرریز پلکانی با لبه ۳ سانتی متری در ابتدا و لبه ۵

سانتی متری در وسط پله

ردیف	شماره مشخصات	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷
۱	$Q(m^3/s)$	۰/۰۰۲۱	۰/۰۰۳۷	۰/۰۰۹۲	۰/۰۱۳۲	۰/۰۱۷۳	۰/۰۲۱۶	۰/۰۲۴۸
۲	$H_1(m)$	۱/۰۱۱۶	۱/۰۱۶۹	۱/۰۳۱	۱/۰۳۹	۱/۰۴۶۸	۱/۰۵۴۴	۱/۰۵۹۵
۳	$q(m^2/s)$	۰/۰۰۲۱	۰/۰۰۳۷	۰/۰۰۹۲	۰/۰۱۳۲	۰/۰۱۷۳	۰/۰۲۱۶	۰/۰۲۴۸
۴	$y_1(m)$	۰/۰۰۷	۰/۰۱۱۴۵	۰/۰۱۶۷	۰/۰۲۰۱	۰/۰۲۶۳	۰/۰۳۳۴۵	۰/۰۳۳۸
۵	$V_1(m/s)$	۰/۳۰۵۹	۰/۳۲۶۵	۰/۵۵۳	۰/۶۵۷	۰/۶۵۶	۰/۶۴۵۷	۰/۷۳۲۹
۶	F_r	۱/۱۶۷۹	۰/۹۷۴۶	۱/۸۳۱	۱/۴۸۱	۱/۲۹۲	۱/۱۲۸	۱/۲۷۴
۷	$H_1(m)$	۰/۰۱۱۷۷	۰/۰۱۶۸۸	۰/۰۳۲	۰/۰۴۲۱	۰/۰۴۸	۰/۰۵۴۷۲	۰/۰۶۱۱۷
۸	$\Delta H(m)$	۰/۹۹۹۹	۱	۰/۹۹۹	۰/۹۹۷	۰/۹۹۹	۰/۹۹۹۶	۰/۹۹۸۳
۹	$\frac{\Delta H}{H_1}(\%)$	۹۸/۸۴	۹۸/۳۴	۹۶/۸۷	۹۵/۹۴	۹۵/۳۹	۹۴/۸۱	۹۴/۲۲
۱۰	$y_c(m)$	۰/۰۰۷۷	۰/۰۱۱۲۶	۰/۰۲۰۶	۰/۰۲۶۱	۰/۰۳۱۲	۰/۰۳۶۲۴	۰/۰۳۹۷
۱۱	$\frac{y_c}{h}$	۰/۰۷۷	۰/۱۱۲۶	۰/۲۰۶	۰/۲۶۱	۰/۳۱۲	۰/۳۶۲۴	۰/۳۹۷

۶: حالتی که لبه ۵ سانتی متری در ابتدای پله ثابت می‌باشد و لبه‌های وسط تغییر می‌کنند.



شکل ۴-۷- مقایسه درصد افت انرژی برای لبه ۵ سانتی متری در ابتدای پله و لبه‌های متغیر در وسط

شکل (۴-۷) نشان می‌دهد که در کلیه حالت‌ها با افزایش دبی جریان افت انرژی کاهش می‌یابد. همچنین افزایش ارتفاع لبه در وسط پله باعث افزایش افت انرژی شده است. برای نمودار حالت‌های ۵ و ۶ به‌طور کلی می‌توان گفت که با افزایش ارتفاع لبه در وسط پله میزان افت انرژی بیشتر می‌شود و لبه با ارتفاع بلند در ابتدا و وسط پله مناسب‌تر می‌باشد. ولی در حالتی که لبه ابتدایی پله دارای ارتفاع کمی باشد، افزایش ارتفاع در وسط پله تاثیر ناچیزی در افزایش افت انرژی دارد. جداول (۴-۱۰)، (۴-۱۵) و (۴-۱۶) مربوط به شکل (۴-۷) می‌باشند.

جدول ۴-۱۵- محاسبه پارامترهای هیدرولیکی برای سرریز پلکانی با لبه ۵ سانتی متری در ابتدا و لبه ۱

سانتی متری در وسط پله

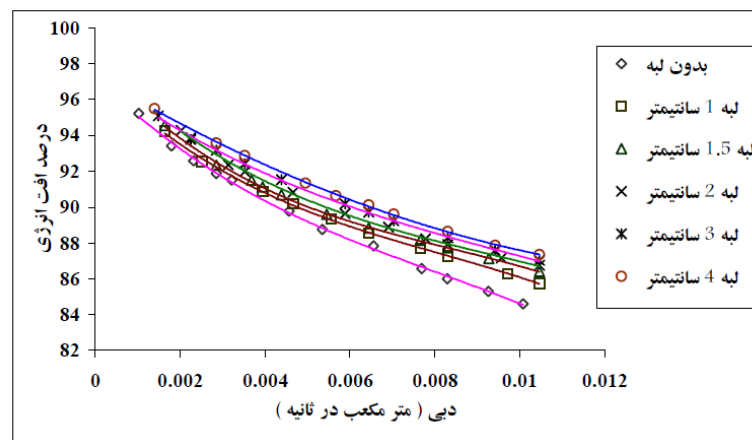
ردیف	شماره مشخصات	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷
۱	$Q(m^3/s)$	۰/۰۰۲۵	۰/۰۰۵۷	۰/۰۰۸۳	۰/۰۱۳۴	۰/۰۱۷۵	۰/۰۲۲۵	۰/۰۲۵۵
۲	$H_t(m)$	۱/۰۱۲۹	۱/۰۲۲۵	۱/۰۲۹	۱/۰۳۹۵	۱/۰۴۷۲	۱/۰۵۵۹	۱/۰۶۰۷
۳	$q(m^2/s)$	۰/۰۰۲۵	۰/۰۰۵۷	۰/۰۰۸۳	۰/۰۱۳۴	۰/۰۱۷۵	۰/۰۲۲۵	۰/۰۲۵۵
۴	$y_1(m)$	۰/۰۰۶۷۱	۰/۰۱۳۵	۰/۰۱۵۹	۰/۰۲۶۵	۰/۰۲۵۳	۰/۰۳	۰/۰۳۲
۵	$V_1(m/s)$	۰/۳۷۵۴	۰/۴۲۵۲	۰/۵۲۵	۰/۵۰۴	۰/۶۹۰۵	۰/۷۵۰۶	۰/۷۹۶۲
۶	F_r	۱/۴۶۳۹	۱/۱۶۹	۱/۳۳۳	۰/۹۸۹	۱/۳۸۸	۱/۳۸۴	۱/۳۶۳۹
۷	$H_1(m)$	۰/۰۱۳۹	۰/۰۲۲۷۲	۰/۰۲۹۹	۰/۰۳۹۵	۰/۴۹۶	۰/۵۸۷۵	۰/۶۴۳
۸	$\Delta H(m)$	۰/۹۹۹۱	۰/۹۹۹۷	۰/۹۹۹	۱	۰/۹۹۸	۰/۹۹۷۲	۰/۹۹۶۳
۹	$\frac{\Delta H}{H_t}(\%)$	۹۸/۶۳	۹۷/۱۷	۹۷/۰۸	۹۶/۲۰	۹۵/۲۶	۹۴/۴۳	۹۳/۹۳
۱۰	$y_c(m)$	۰/۰۰۸۶۵	۰/۰۱۴۹۸	۰/۰۱۹۲	۰/۰۲۶۳	۰/۰۳۱۵	۰/۰۳۷۳	۰/۰۴۰۵
۱۱	y_c/h	۰/۰۸۶۵	۰/۱۴۹۸	۰/۱۹۲۱	۰/۲۶۳	۰/۳۱۴۶	۰/۳۷۳	۰/۴۰۴۶

جدول ۴-۱۶- محاسبه پارامترهای هیدرولیکی برای سرریز پلکانی با لبه ۵ سانتی متری در ابتدا و لبه ۳

سانتی متری در وسط پله

ردیف	شماره مشخصات	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷
۱	$Q(m^3/s)$	۰/۰۰۱۰۹	۰/۰۰۴۵	۰/۰۰۷۵	۰/۰۱۱۸	۰/۰۱۶۶	۰/۰۲۰۵	۰/۰۲۵۵
۲	$H_t(m)$	۱/۰۰۷۵	۱/۰۱۹	۱/۰۲۶۹	۱/۰۳۶۳	۱/۰۴۵۶	۱/۰۵۲۵	۱/۰۶۱
۳	$q(m^2/s)$	۰/۰۰۱۰۹	۰/۰۰۴۵	۰/۰۰۷۵	۰/۰۱۱۸	۰/۰۱۶۶	۰/۰۲۰۵	۰/۰۲۵۵
۴	$y_1(m)$	۰/۰۰۶۱۲	۰/۰۱۰۷۵	۰/۰۱۵۲	۰/۰۲۲۴	۰/۰۲۷۱	۰/۰۳۱۱	۰/۰۳۴۵
۵	$V_1(m/s)$	۰/۱۷۹۶	۰/۴۱۹۲	۰/۴۹۸	۰/۵۲۶	۰/۶۱۱۴	۰/۶۵۸۸	۰/۷۳۶۴
۶	F_r	۰/۷۳۳۳	۱/۲۹۲	۱/۲۸۸	۱/۱۲۳۳	۱/۱۸۶	۱/۱۹۳۳	۱/۲۶۶۴
۷	$H_1(m)$	۰/۰۰۷۷۶	۰/۰۱۹۷۲	۰/۰۲۷۷	۰/۰۳۶۵	۰/۰۴۶۲	۰/۰۵۳۲	۰/۰۶۲۲
۸	$\Delta H(m)$	۰/۹۹۹۷	۰/۹۹۹۴	۰/۹۹۹۲	۰/۹۹۹۸	۰/۹۹۹۴	۰/۹۹۹۲۵	۰/۹۹۸۷
۹	$\frac{\Delta H}{H_t}(\%)$	۹۹/۲۳	۹۸/۱	۹۷/۳	۹۶/۵	۹۵/۵۸	۹۴/۹۴	۹۴/۱۳
۱۰	$y_c(m)$	۰/۰۰۴۹	۰/۰۱۲۷۵	۰/۰۱۷۹	۰/۰۲۴۲	۰/۰۳۰۴	۰/۰۳۵	۰/۰۴۰۵
۱۱	y_c/h	۰/۰۴۹	۰/۱۲۷۵	۰/۱۷۹۷	۰/۲۴۲	۰/۳۰۴	۰/۳۵	۰/۴۰۵

همچنین بارانی، رهنما و سهرابی پور با انجام آزمایش‌هایی بر روی سرریز پلکانی ساخته شده توسط چوب که دارای ۲۱ پله بود به این نتیجه رسیدند که ضخامت لبه روی پله‌ها می‌تواند بر میزان استهلاک انرژی تاثیرگذار باشد. آن‌ها از لبه‌هایی با طول ۳۰ سانتی‌متر، عرض ۱/۵ سانتی‌متر و ضخامت‌های متغیر ۱، ۱/۵، ۲، ۳ و ۴ سانتی‌متر استفاده نمودند و لبه‌ها را در ابتدای تمام پله‌ها نصب کردند. این محققین بیان نمودند که با افزایش دبی، هم در سرریز پلکانی ساده و هم لبه‌دار میزان افت انرژی کاهش می‌یابد. آن‌ها لبه با ضخامت ۲ سانتی‌متر را بهترین لبه معرفی کردند. همچنین نشان دادند که با اضافه کردن لبه به نوک هر پله، هر پله به شکل یک حوضچه عمل می‌کند و با افزایش ضخامت لبه شروع جریان غیرریزشی در دبی‌های بالاتر صورت می‌گیرد [۴]. در شکل (۴-۸) نمودار مربوط به این آزمایش‌ها نشان داده شده است.



شکل ۴-۸- مقایسه درصد افت انرژی بر روی سرریز پلکانی لبه‌دار و بدون لبه [۴]

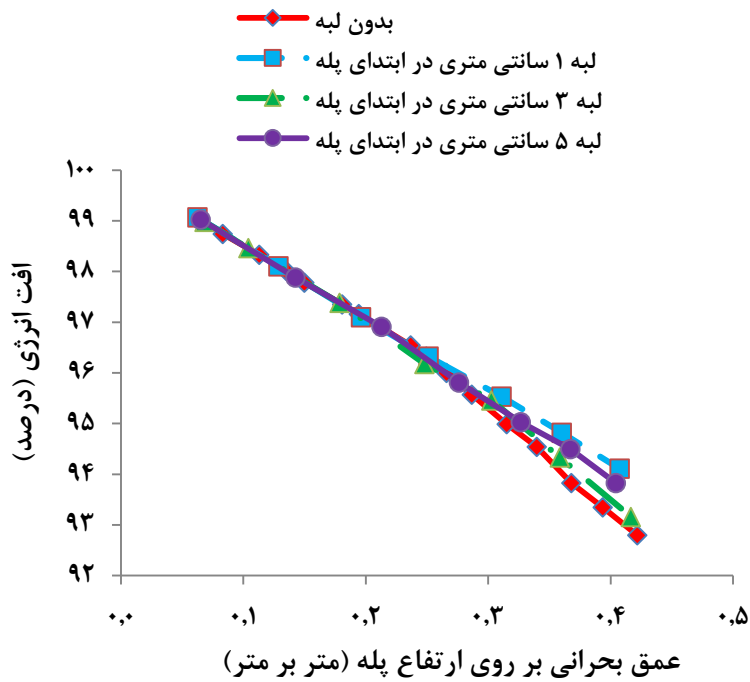
$$۴-۳-۱-۲- \text{نمودارهای } \frac{\Delta H}{H_t} \text{ بر حسب } \frac{y_c}{h} :$$

برای مقایسه افت انرژی بین این حالت، نمودارها را به ۲ قسمت به شرح زیر تقسیم بندی کردیم :

۱- حالتی که لبه‌های ۱، ۳ و ۵ سانتی‌متری در ابتدای پله قرار گرفتند.

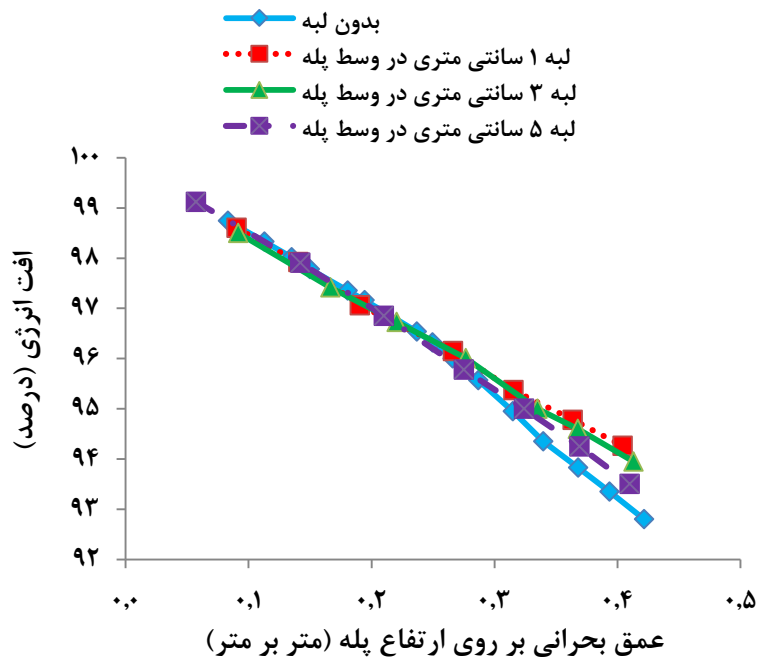
۲- حالتی که لبه‌های ۱، ۳ و ۵ سانتی‌متری در وسط پله قرار گرفتند.

۱- حالتی که لبه‌های ۱، ۳ و ۵ سانتی‌متری در ابتدای پله قرار گرفتند.



شکل ۹-۴- تاثیر پارامتر بی بعد $\frac{2c}{h}$ در استهلاک انرژی با لبه در ابتدای پله

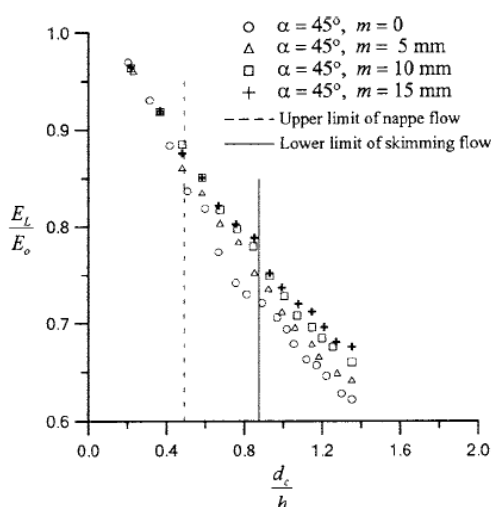
۱- حالتی که لبه‌های ۱، ۳ و ۵ سانتی‌متری در وسط پله قرار گرفتند.



شکل ۱۰-۴- تاثیر پارامتر بی بعد $\frac{2c}{h}$ در استهلاک انرژی با لبه در وسط پله

همانطور که شکل‌های (۹-۴) و (۱۰-۴) نشان می‌دهند با افزایش پارامتر بی بعد $\frac{y_c}{h}$ ، از استهلاك انرژی نسبی کاسته می‌شود. به عبارت دیگر استهلاك انرژی جریان از روی سرریزهای پلکانی با لبه در ابتدا و وسط پله و همچنین در حالت بدون لبه با دبی جریان یا (y_c) نسبت عکس دارد. جداول (۲-۴) تا (۷-۴) مربوط به شکل (۹-۴) و (۱۰-۴) می‌باشند.

چیناراسری و ونگ و ایزز طی آزمایش‌هایی که بر روی سرریزهای پلکانی شیب‌دار، لبه‌دار و ساده انجام دادند به این نتیجه رسیدند که قرارگیری لبه بر روی پله‌ها بر استهلاك انرژی موثر می‌باشد و هر چه ارتفاع لبه‌ها افزایش یابد استهلاك انرژی بیشتر می‌گردد. آن‌ها لبه‌هایی با ارتفاع ۵، ۱۰ و ۱۵ میلی‌متر را آزمایش نمودند و نتیجه گرفتند که تاثیر لبه بیشتر از تاثیر شیب بر افزایش میزان استهلاك انرژی می‌باشد [۵۱].

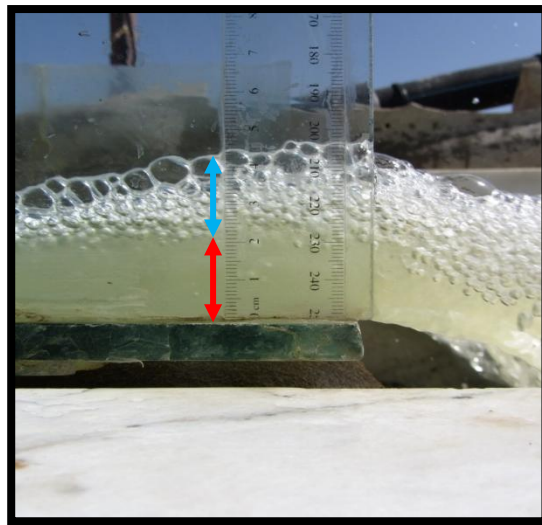


شکل ۴-۱۱- نمودار افت انرژی نسبی نسبت به عمق بحرانی جریان برای پله‌های لبه‌دار [۵۱]

۴-۳-۲- بررسی تاثیر ورود هوا در اندازه‌گیری عمق اولیه پرش هیدرولیکی

با افزایش دبی جریان میزان کف آلودگی در پنجه سرریز بیشتر شد. ورود حباب‌های زیاد هوا به داخل جریان، باعث کاهش تنش برشی شده و از خاصیت استهلاك انرژی می‌کاهد. زیرا اکثر استهلاك

انرژی بر اثر تنش برشی بین مولکول‌های آب است و با ورود حباب هوا به داخل جریان، از خاصیت استهلاک انرژی کاسته می‌شود. تحقیقات ماتوس و کویین تلا، پگرام و همکاران، سلماسی و رسائی و همکاران بیانگر این مطلب بود که کاربرد عمق آب هوادهی شده به جای عمق آب خالص، مقدار افت انرژی را جریان بیش از واقعیت تخمین می‌زند [۶۳، ۶۴، ۶، ۲۹]. این محققین بیان داشتند که استفاده از عمق ثانویه پرش هیدرولیکی (عمق آب تقریباً خالص) جهت تعیین عمق اولیه پرش هیدرولیکی مناسب‌تر می‌باشد. در این تحقیق خطای ناشی از ورود هوا در عمق اولیه پرش هیدرولیکی را در دو حالت که عمق اولیه پرش در قسمت زیرین جریان آب بدون حباب هوا بوده و در قسمت بالای جریان حباب‌دار بود، مورد بررسی قرار دادیم. در شکل (۴-۱۲) نمایی از اندازه‌گیری عمق اولیه پرش در دو حالت جریان بدون حباب هوا و جریان حباب‌دار نشان داده شده است.

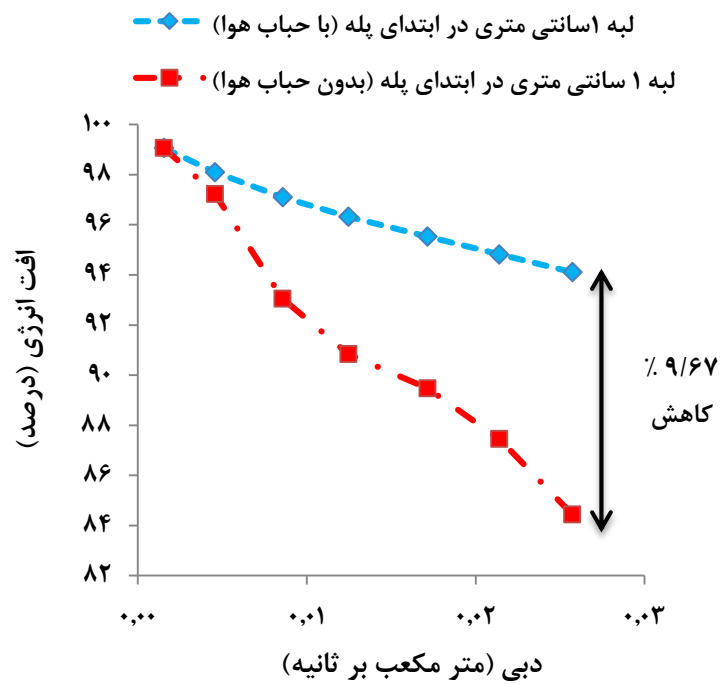


شکل ۴-۱۲- نمایی از اندازه‌گیری عمق اولیه پرش در دو حالت بدون حباب هوا و حباب‌دار

خطای ناشی از ورود هوا در جریان برای محاسبه استهلاک انرژی در ۶ حالت مختلف قرارگیری

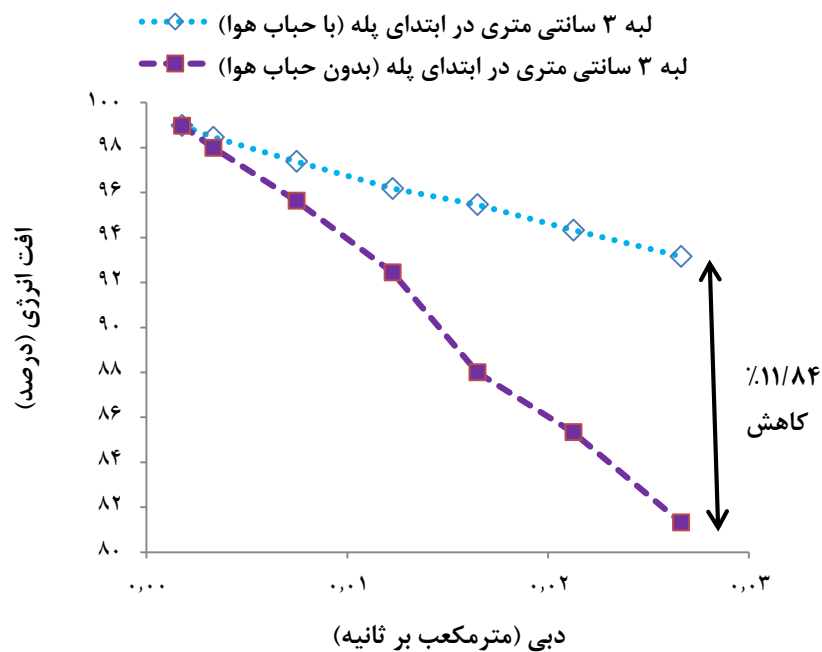
لبه‌ها در ابتدا و وسط پله با یکدیگر مقایسه شده است :

حالت اول: لبه ۱ سانتی متری در ابتدای پله (عمق بدون حباب هوا و حباب دار)



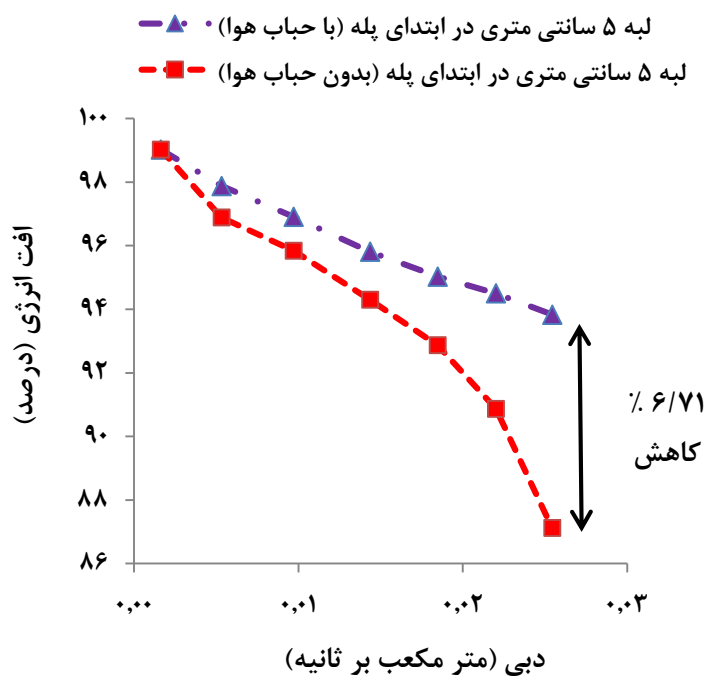
شکل ۴-۱۳- حالت اول

حالت دوم: لبه ۳ سانتی متری در ابتدای پله (عمق بدون حباب هوا و حباب دار)



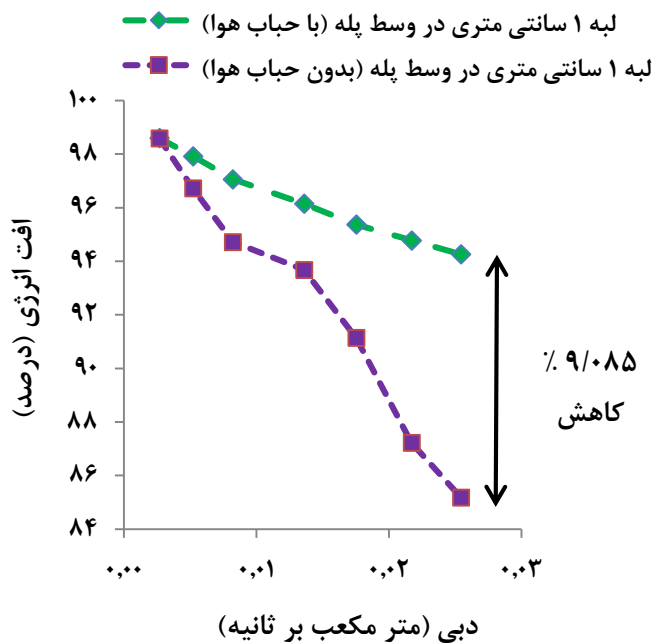
شکل ۴-۱۴- حالت دوم

حالت سوم: لبه ۵ سانتی متری در ابتدای پله (عمق بدون حباب هوا و حباب‌دار)



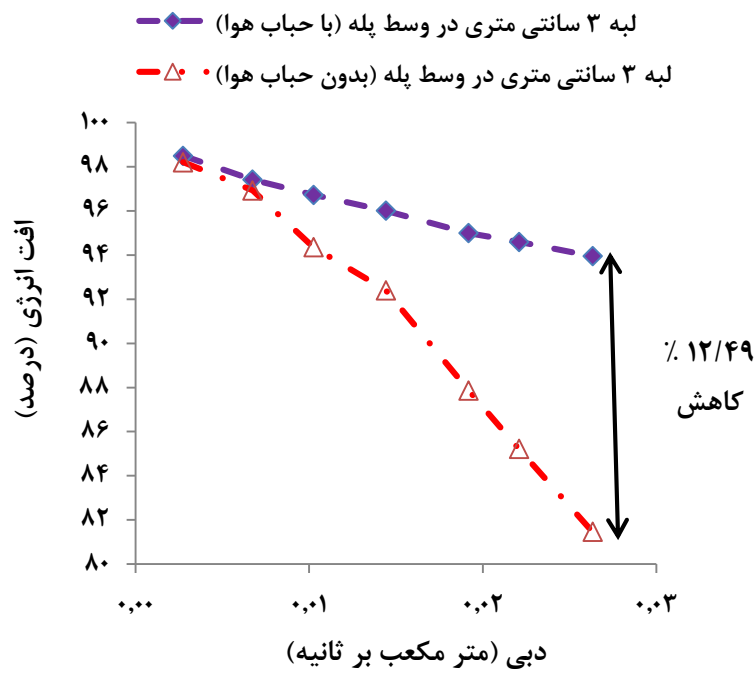
شکل ۴-۱۵ - حالت سوم

حالت چهارم: لبه ۱ سانتی متری در وسط پله (عمق بدون حباب هوا و حباب‌دار)



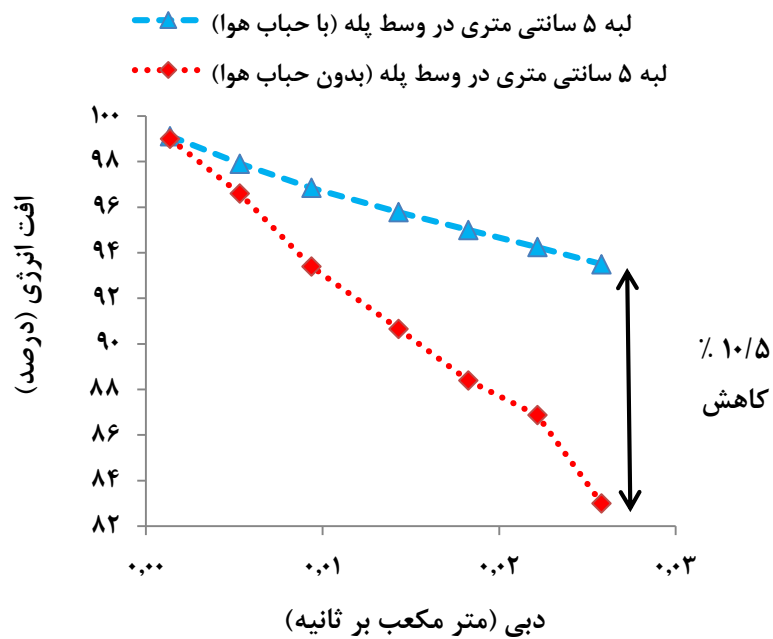
شکل ۴-۱۶ - حالت چهارم

حالت پنجم: لبه ۳ سانتی متری در وسط پله (عمق بدون حباب هوا و حباب دار)



شکل ۴-۱۷ - حالت پنجم

حالت ششم: لبه ۵ سانتی متری در وسط پله (عمق بدون حباب هوا و حباب دار)



شکل ۴-۱۸ - حالت ششم

با توجه به شکل‌های (۴-۱۳) تا (۴-۱۸) می‌توان به نتایج زیر اشاره نمود :

۱- با افزایش دبی جریان میزان کف آلودگی در حوضچه آرامش بیشتر شد و ورود حباب‌های هوا به درون جریان باعث ایجاد اختلاف در استهلاک انرژی در حالت عمق با حباب هوا و عمق بدون حباب هوا گردید.

۲- مقایسه دو به دو حالت‌ها در ابتدا و وسط پله نشان داد که لبه با ارتفاع ۱ سانتی‌متری در ابتدای پله باعث استهلاک انرژی بیشتری شده است. همچنین لبه با ارتفاع‌های ۳ و ۵ سانتی‌متری در وسط پله باعث استهلاک انرژی بیشتری شده اند.

۴-۴- مقایسه بین استهلاک انرژی نسبی در سرریز پلکانی به عرض ۲۵، ۵۰ و ۱۰۰ سانتی‌متری به ازای تعداد پله‌های ۱۰ عدد و شیب ۴۵ درجه

برای مقایسه نتایج به دست آمده در تحقیق حاضر با سایر محققان، از نتایج تحقیقات سلماسی [۶] که از سرریز پلکانی ۴۵ درجه با تعداد پله‌های ۱۰ عدد استفاده نموده است، استفاده شده است. ایشان آزمایش‌هایی را در حالت بدون لبه بر روی سرریز پلکانی با تعداد ۱۰ پله و شیب ۴۵ درجه در دو فلوم به عرض ۲۵ و ۵۰ سانتی‌متری انجام داد و نتایج ایشان با سرریز مورد استفاده در تحقیق حاضر در حالت بدون لبه در فلوم به عرض ۱۰۰ سانتی‌متر مقایسه گردید. نتیجه این مقایسه در شکل (۴-۱۹) نشان داده شده است. نتایج شکل (۴-۱۹) نشان می‌دهد که تغییر عرض فلوم تاثیر معنی‌داری در کاهش افت انرژی نداشته است. به عبارتی تاثیر مقیاس مدل در برآورد استهلاک انرژی ناچیز بوده است. جداول (۴-۱۷) تا (۴-۱۹) مربوط به شکل (۴-۱۹) می‌باشند.

جدول ۴-۱۷- داده های سلماسی برای سرریز با عرض ۲۵ سانتی متر [۶]

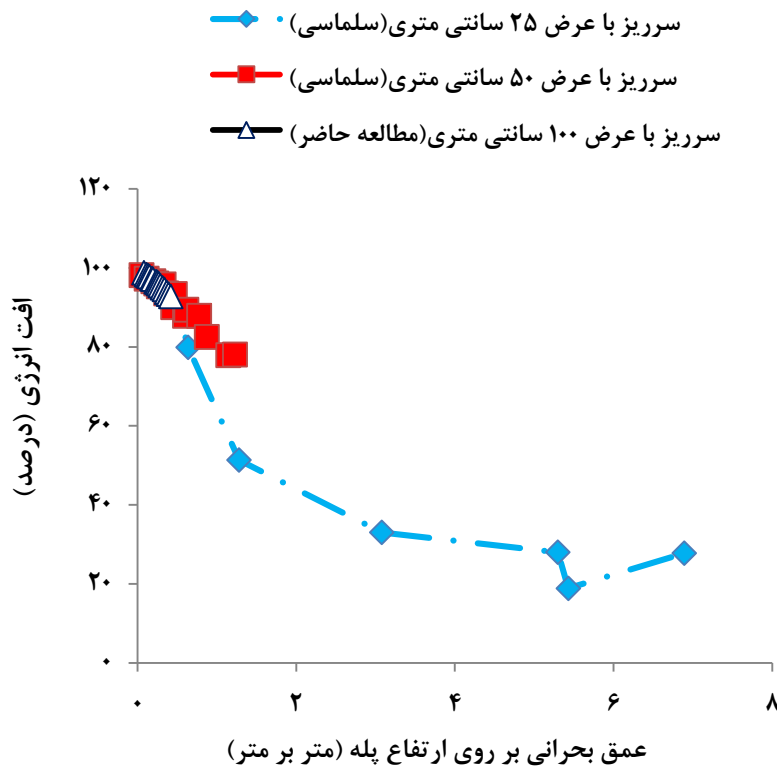
۳/۰۸	۱/۲۸	۰/۶۴	۰/۵۲	۰/۲۱	y_c/h	سرریز با عرض ۲۵ (سانتی متر)
۳۳/۰۲	۵۱/۳۲	۷۹/۸۷	۸۸/۶۵	۹۷	$\Delta H/H_i$ (%)	
		۶/۸۹	۵/۴۳	۵/۳	y_c/h	
		۲۷/۷۶	۱۸/۸۹	۲۷/۹۹	$\Delta H/H_i$ (%)	

جدول ۴-۱۸- داده های سلماسی برای سرریز با عرض ۵۰ سانتی متر [۶]

۰/۲۷	۰/۲۳۷	۰/۲۰۱	۰/۱۱۸	۰/۰۵۵	y_c/h	سرریز با عرض ۵۰ (سانتی متر)
۹۵/۳۱	۹۵/۹۹	۹۶/۵۹	۹۷/۲۱	۹۸/۱۲	$\Delta H/H_i$ (%)	
۰/۴۷۳	۰/۴۵۴	۰/۴۴۲	۰/۳۶۴	۰/۳۳۳	y_c/h	
۹۳/۳۲	۹۰/۰۲	۹۲/۸	۹۳/۵۳	۹۵/۷۵	$\Delta H/H_i$ (%)	
۱/۱۴۵	۰/۸۷۸	۰/۷۸	۰/۶۱۹	۰/۶۰۱	y_c/h	
۷۷/۸۷	۸۲/۴۸	۸۷/۸۴	۸۹/۳۹	۸۷/۸۷	$\Delta H/H_i$ (%)	
				۱/۲۳۱	y_c/h	
				۷۷/۹۹	$\Delta H/H_i$ (%)	

جدول ۴-۱۹- پارامترهای اندازه‌گیری برای سرریز با عرض ۱۰۰ سانتی‌متر

۰/۱۸۰۷	۰/۱۴۹۹	۰/۱۳۵	۰/۱۱۳	۰/۰۸۳۲	y_c/h	سرریز با عرض ۱۰۰ (سانتی متر)
۹۷/۳۵	۹۷/۷۸	۹۸/۰۱۵	۹۸/۳۳	۹۸/۷۴	$\Delta H/H_t$ (%)	
۰/۲۸۶۷	۰/۲۶۶	۰/۲۴۹۵	۰/۲۳۶۷	۰/۱۹۴۴	y_c/h	
۹۵/۵۷	۹۶	۹۶/۳۲	۹۶/۵۴	۹۷/۱۶	$\Delta H/H_t$ (%)	
۰/۴۲۱۷	۰/۳۹۳۵	۰/۳۶۸	۰/۳۳۹۷	۰/۳۱۵	y_c/h	
۹۲/۸	۹۳/۳۵	۹۳/۸۳	۹۴/۵۴	۹۴/۹۹	$\Delta H/H_t$ (%)	



شکل ۴-۱۹- مقایسه اثر مقیاس در فلوم به عرض‌های ۲۵، ۵۰ و ۱۰۰ سانتی‌متری

۴-۵- بررسی تاثیر لبه‌دار شدن سرریز پلکانی در کاهش طول حوضچه آرامش پایین‌دست

در این بخش از تحقیق به بررسی تاثیر لبه‌دار شدن سرریز پلکانی در کاهش طول حوضچه آرامش پایین‌دست پرداخته شده است. با اندازه‌گیری فاصله طولی سقوط آب بر روی کف حوضچه آرامش و مقایسه حالت‌های مختلف قرارگیری لبه‌ها بر روی پله‌های مورد نظر به مقایسه موثر بودن لبه‌ها در کاهش طول حوضچه آرامش پرداخته شد. برای این منظور لبه‌ها بر روی دو نوع پله نصب شدند :

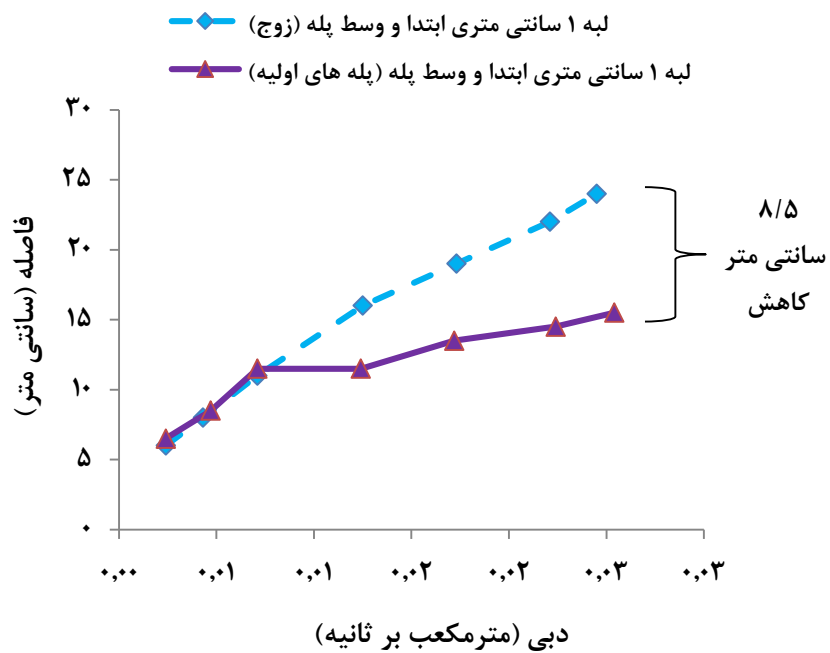
۱- پله‌های ۲، ۳، ۴ و ۵ (اولیه)

۲- پله‌های ۲، ۴، ۶، ۸ و ۱۰ (زوج)

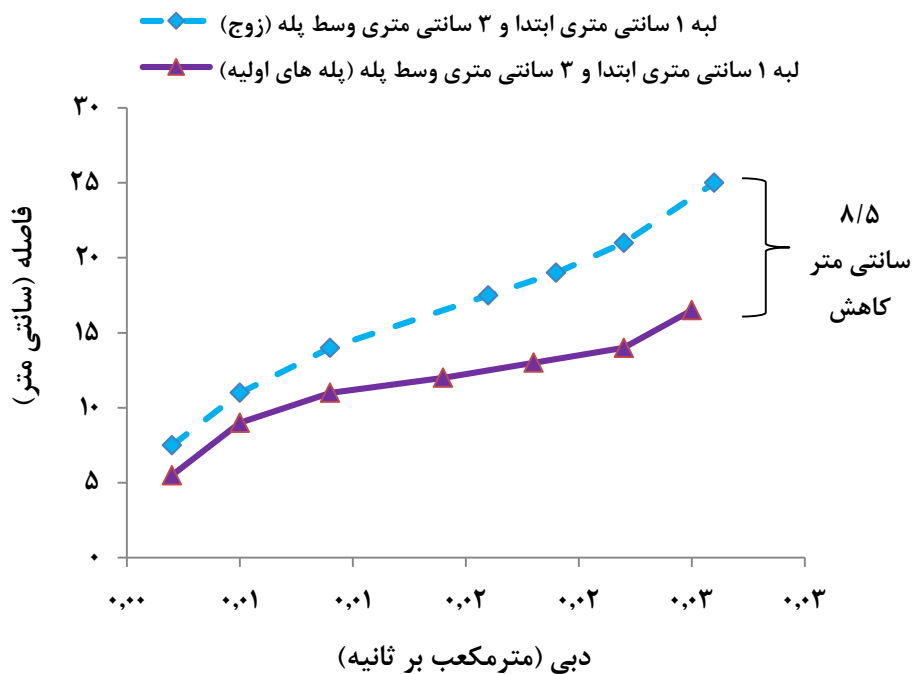
در شکل (۴-۲۰) نمایی از محل اندازه‌گیری فاصله طولی سقوط آب در کف حوضچه آرامش نشان داده شده است. همچنین نمودارهای فاصله طولی سقوط آب در مقابل دبی جریان در شکل‌های (۴-۲۱) تا (۴-۲۹) رسم شده است.



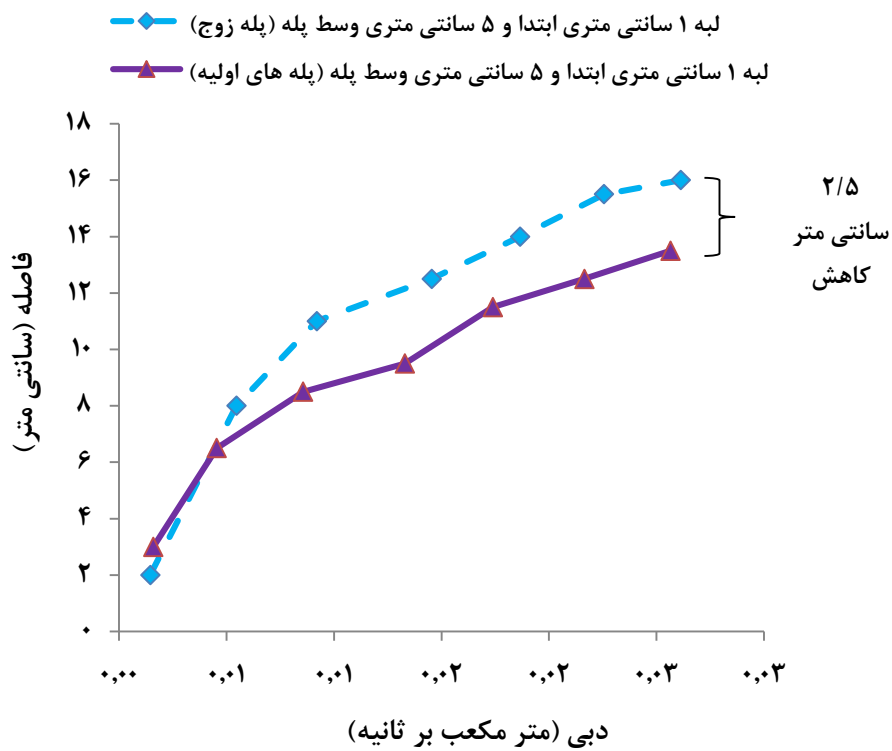
شکل ۴-۲۰- نمایی از محل اندازه‌گیری فاصله طولی سقوط آب در حوضچه آرامش



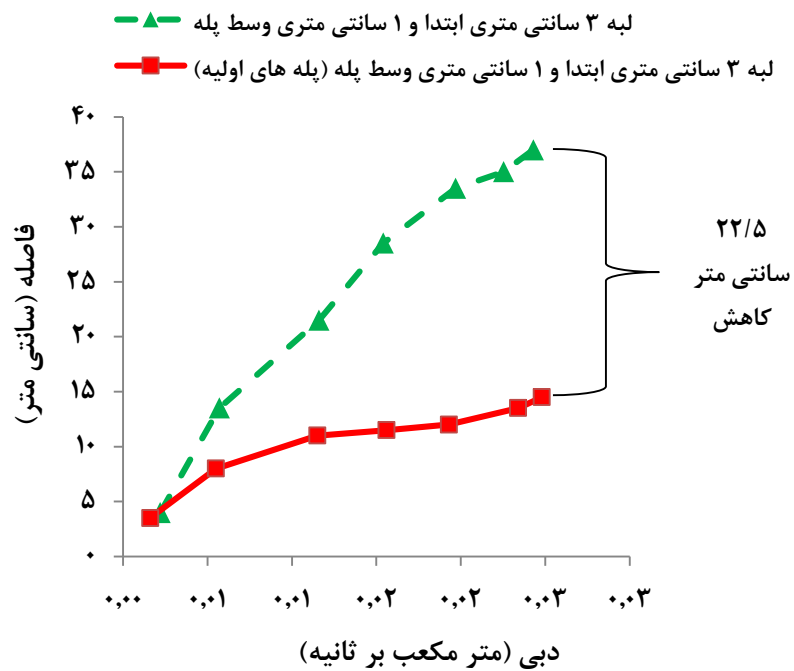
شکل ۴-۲۱- فاصله طولی سقوط آب برای لبه ۱ سانتی متری ابتدا و وسط پله



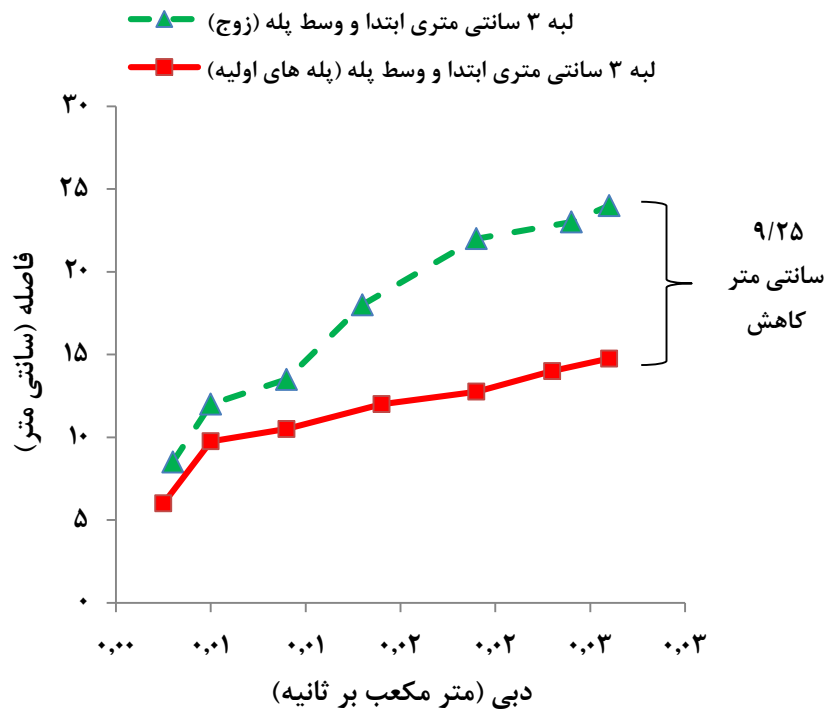
شکل ۴-۲۲- فاصله طولی سقوط آب برای لبه ۱ سانتی متری ابتدا و لبه ۳ سانتی متری وسط پله



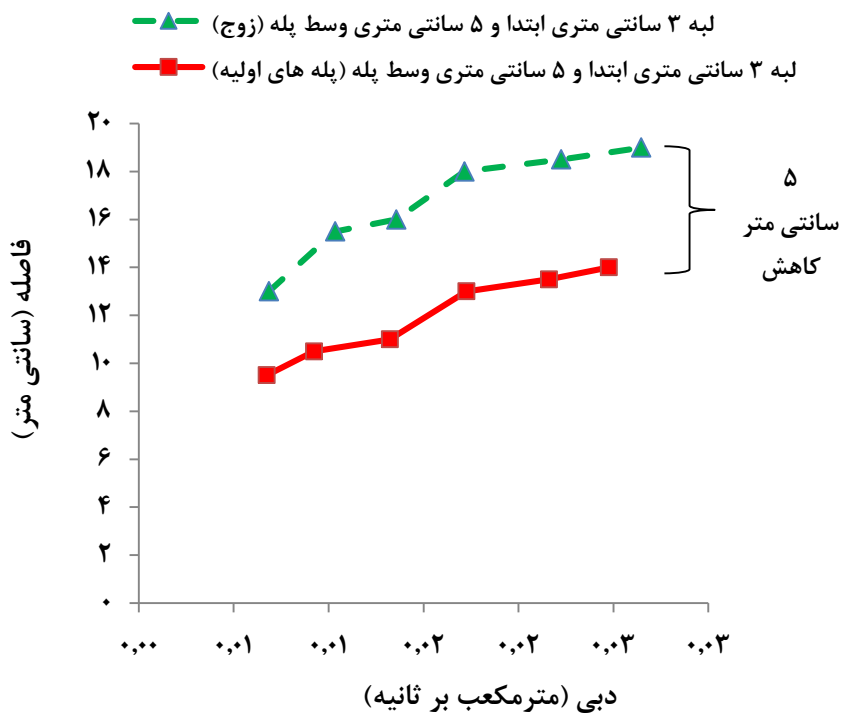
شکل ۴-۲۳- فاصله طولی سقوط آب برای لبه ۱ سانتی متری ابتدا و لبه ۵ سانتی متری وسط پله



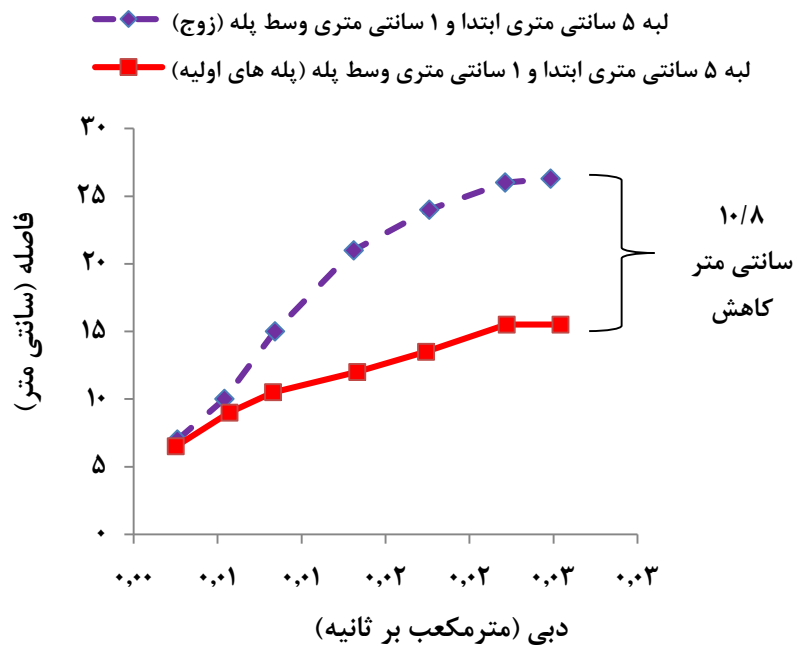
شکل ۴-۲۴- فاصله طولی سقوط آب برای لبه ۳ سانتی متری ابتدا و لبه ۱ سانتی متری وسط پله



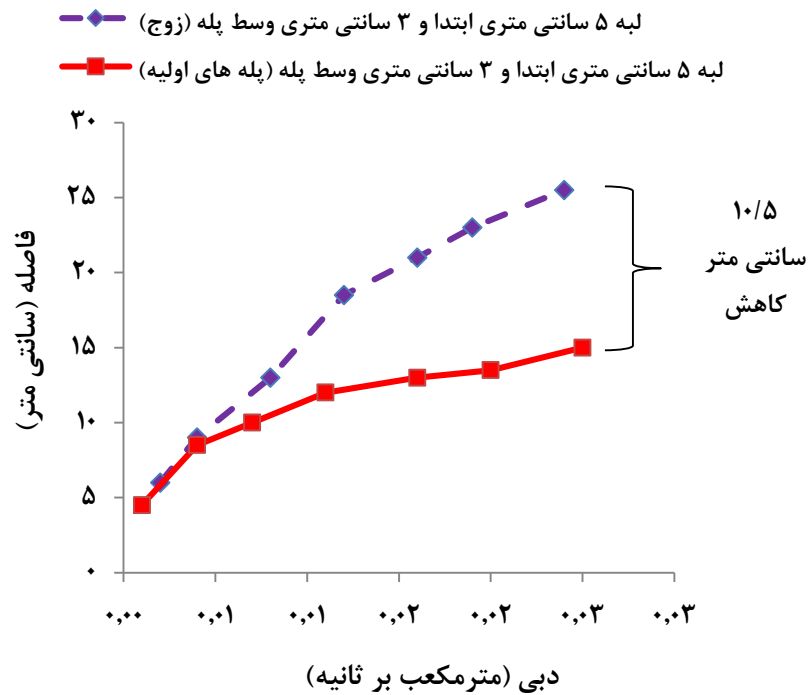
شکل ۴-۲۵- فاصله طولی سقوط آب برای لبه ۳ سانتی متری ابتدا و وسط پله



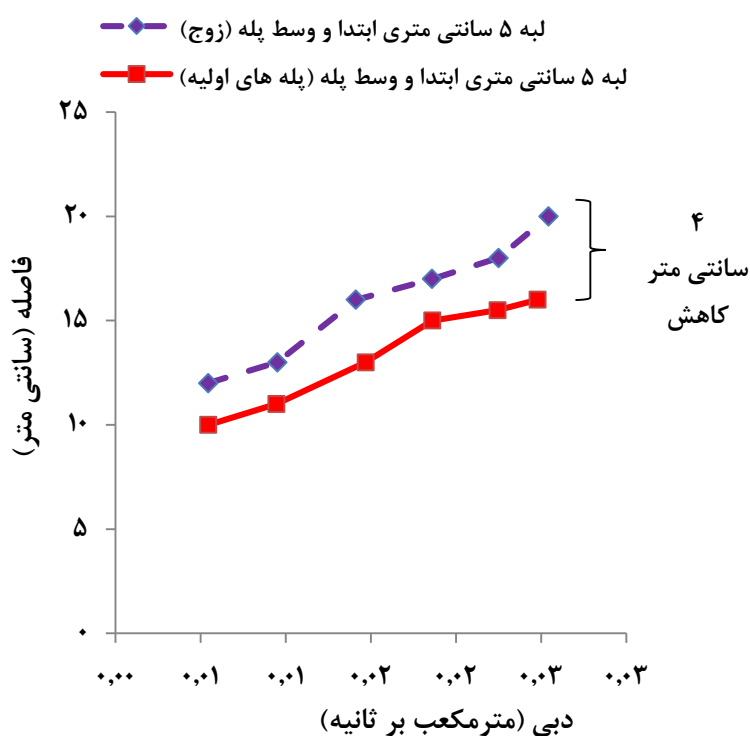
شکل ۴-۲۶- فاصله طولی سقوط آب برای لبه ۳ سانتی متری ابتدا و لبه ۵ سانتی متری وسط پله



شکل ۴-۲۷- فاصله طولی سقوط آب برای لبه ۵ سانتی متری ابتدا و لبه ۱ سانتی متری وسط پله



شکل ۴-۲۸- فاصله طولی سقوط آب برای لبه ۵ سانتی متری ابتدا و لبه ۳ سانتی متری وسط پله



شکل ۴-۲۹- فاصله طولی سقوط آب برای لبه ۵ سانتی متری ابتدا و وسط پله

همانطور که شکل‌های (۴-۲۱) تا (۴-۲۹) نشان می‌دهند، با افزایش دبی جریان سقوط آب در فاصله طولی دورتری در حوضچه آرامش اتفاق می‌افتد. همچنین مشاهده می‌شود که زمانی لبه‌ها بر روی پله‌های اولیه سرریز یعنی پله‌های ۲، ۳، ۴ و ۵ نصب می‌شوند در مقایسه با پله‌های زوج، سقوط آب در فاصله طولی نزدیکتری اتفاق می‌افتد و این بدان معنی است که با قرارگیری لبه بر روی پله‌های اولیه به حوضچه آرامش با طول کمتری نیاز داریم. ساخت چنین حوضچه آرامشی از نظر اقتصادی و فنی قابل توجیه و مقرون به صرفه‌تر می‌باشد.

۴-۶- تعیین مکان مناسب برای قرارگیری لبه‌ها بر روی پله‌های سرریز

همانطور که قبلاً ذکر شده است این تحقیق بر پایه بررسی افت انرژی در سرریز پلکانی لبه‌دار انجام پذیرفته است. در این تحقیق از سه ارتفاع مختلف ۱، ۳ و ۵ سانتی متری استفاده شده است. لبه‌ها در ابتدا و وسط پله‌ها تعبیه شدند. در این قسمت با مقایسه افت انرژی بین حالت‌های مختلف

قرارگیری لبه‌ها بر روی پله‌های ۲، ۳، ۴ و ۵ در دبی‌های تقریباً مشابه مناسب‌ترین مکان برای قرارگیری لبه‌ها تعیین شده است.

جدول ۴-۲۰- مقایسه سرریز با لبه ۵ در ابتدا و وسط پله با سرریز با لبه ۳ در ابتدا و وسط پله

۰/۰۱۴۶	۰/۰۰۹۳	۰/۰۵۶	$Q(m^3/s)$	لبه ۳ ابتدا و وسط پله
۹۵/۷۸	۹۶/۹۶	۹۷/۷۶	$\Delta H/H_t$ (%)	
۰/۰۱۴۷	۰/۰۰۹۵	۰/۰۰۵۵	$Q(m^3/s)$	لبه ۵ ابتدا و وسط پله
۹۵/۹۵	۹۸/۹۶	۹۷/۸۱	$\Delta H/H_t$ (%)	

همانطور که در جدول (۴-۲۰) ملاحظه می‌شود در دبی‌های مشابه افت انرژی در سرریز با لبه ۵ (در ابتدا و وسط پله) بیشتر از سرریز با لبه ۳ (در ابتدا و وسط پله) می‌باشد.

جدول ۴-۲۱- مقایسه سرریز با لبه ۵ در ابتدا و وسط پله با سرریز با لبه ۱ در ابتدا و وسط پله

۰/۰۲۵	۰/۰۲۲۵	۰/۰۰۵	$Q(m^3/s)$	لبه ۱ ابتدا و وسط پله
۹۴/۰۷	۹۴/۵۳	۹۸/۰۵	$\Delta H/H_t$ (%)	
۰/۰۲۵	۰/۰۲۲۵	۰/۰۰۵	$Q(m^3/s)$	لبه ۵ ابتدا و وسط پله
۹۴/۳۳	۹۴/۷	۹۸/۱۱	$\Delta H/H_t$ (%)	

همانطور که در جدول (۴-۲۱) ملاحظه می‌شود در دبی‌های مشابه افت انرژی در سرریز با لبه ۵ (در ابتدا و وسط پله) بیشتر از سرریز با لبه ۱ (در ابتدا و وسط پله) می‌باشد.

جدول ۴-۲۲- مقایسه سرریز با لبه ۵ در ابتدای پله و سرریز با لبه ۵ در وسط پله

۰/۰۲۵۶	۰/۰۲۲	۰/۰۱۸۵	۰/۰۱۴۴	۰/۰۰۹۷	۰/۰۰۵	$Q(m^3/s)$	لبه ۵ ابتدای پله
۹۳/۸۴	۹۴/۵۵	۹۵/۰۳	۹۵/۸۱	۹۶/۹۱	۹۷/۹۸	$\Delta H/H_t$ (%)	
۰/۰۲۵۸	۰/۰۲۲	۰/۰۱۸۳	۰/۰۱۴۳	۰/۰۰۹۵	۰/۰۰۵	$Q(m^3/s)$	لبه ۵ وسط پله
۹۳/۵	۹۴/۲۵	۹۵	۹۵/۷۸	۹۶/۸۵	۹۷/۹۱	$\Delta H/H_t$ (%)	

همانطور که در جدول (۴-۲۲) ملاحظه می‌شود در دبی‌های مشابه افت انرژی در سرریز با لبه ۵ (در ابتدای پله) بیشتر از سرریز با لبه ۵ (در وسط پله) می‌باشد.

جدول ۴-۲۳- مقایسه سرریز با لبه ۳ در ابتدای پله و سرریز با لبه ۳ در وسط پله

۰/۰۲۶	۰/۰۰۷	۰/۰۰۳۳	$Q(m^3/s)$	لبه ۳ ابتدای پله
۹۳/۱۶	۹۷/۳۸	۹۸/۴۶	$\Delta H/H_t$ (%)	
۰/۰۲۶	۰/۰۰۷	۰/۰۰۳	$Q(m^3/s)$	لبه ۳ وسط پله
۹۳/۹۵	۹۷/۴۲	۹۸/۵	$\Delta H/H_t$ (%)	

همانطور که در جدول (۴-۲۳) ملاحظه می‌شود در دبی‌های مشابه افت انرژی در سرریز با لبه ۳ (در وسط پله) بیشتر از سرریز با لبه ۳ (در ابتدای پله) می‌باشد.

جدول ۴-۲۴- مقایسه سرریز با لبه ۱ در ابتدای پله و سرریز با لبه ۱ در وسط پله

۰/۰۲۵۷	۰/۰۲۱۴	۰/۰۱۷۲	۰/۰۰۸	۰/۰۰۵	$Q(m^3/s)$	لبه ۱ ابتدای پله
۹۴/۳۱	۹۴/۸۲	۹۵/۵۳	۹۷/۱	۹۸/۱۰	$\Delta H/H_t$ (%)	
۰/۰۲۵۵	۰/۰۲۱۵	۰/۰۱۷۲	۰/۰۰۸	۰/۰۰۵	$Q(m^3/s)$	لبه ۱ وسط پله
۹۴/۲۶	۹۴/۷۸	۹۵/۳۷	۹۷/۰۶	۹۷/۹۲	$\Delta H/H_t$ (%)	

همانطور که در جدول (۴-۲۴) ملاحظه می‌شود در دبی‌های مشابه افت انرژی در سرریز با لبه ۱ (در ابتدای پله) بیشتر از سرریز با لبه ۱ (در وسط پله) می‌باشد.

به‌طور کلی می‌توان گفت در تمامی حالت‌ها استفاده از لبه با ارتفاع بیشتر در ابتدا و وسط مناسب‌تر می‌باشد. در حالت‌هایی که دو لبه مشابه به طور جداگانه در ابتدا و وسط پله قرار گرفتند در مورد لبه با ارتفاع ۱ و ۵ سانتی‌متری، قرارگیری لبه در ابتدای پله مناسب‌تر بود ولی برای لبه ۳ سانتی‌متری قرارگیری لبه در وسط پله مناسب‌تر بود.

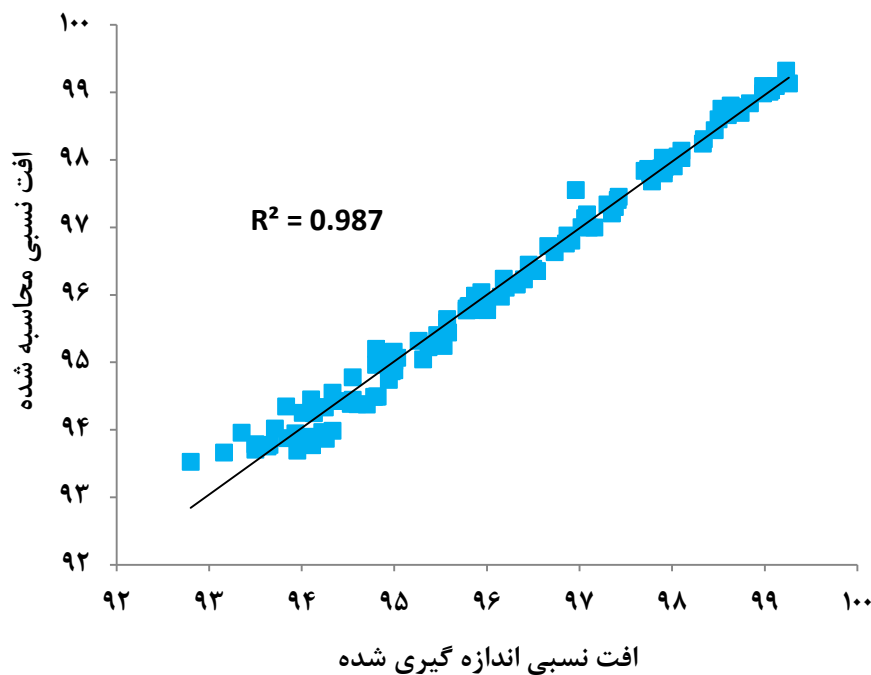
۷-۴- ارایه روابط رگرسیون خطی و غیرخطی برای برآورد محاسبه افت انرژی

SPSS معروفترین نرم افزار آماری برای تحلیل داده‌ها به شمار می‌آید. این نرم افزار به واسطه سادگی و پوشش نسبتاً مطلوب روش‌های آماری، تبدیل به یکی از پرکاربردترین نرم افزارهای آماری در کشور ما شده است [۶۵].

در این بخش از تمامی اطلاعات حاصل از آزمایش‌ها برای سرریز با شیب ۴۵ درجه و در حالت پله‌های بدون لبه و پله‌های لبه‌دار در رگرسیون چند متغیره استفاده شده است. همانطور که در فصل سوم نیز ذکر شد رابطه (۲-۳) حاصل از آنالیز ابعادی به صورت زیر می‌باشد :

$$\frac{\Delta H}{H_t} = f_1\left(\frac{x_1 + l}{h_s + h}, \frac{x_2 + l}{h_s + h}, \frac{y_c}{h}\right)$$

نتایج رگرسیون خطی و غیرخطی برای سرریز مورد آزمایش در تمامی حالت‌ها توسط نرم افزار SPSS انجام شده است. در شکل زیر رابطه بین مقادیر محاسبه شده و مقادیر اندازه‌گیری شده نشان داده شده است :



شکل ۴-۳۰- نمودار پراکندگی و ضریب تعیین برای تمامی داده‌های آزمایشگاهی

رابطه خطی :

$$\frac{\Delta H}{H_t} = 100.024 + (-15.276) \times \frac{y_c}{h} + (-0.252) \times \frac{x_1 + l}{h_s + h} + (0.198) \times \frac{x_2 + l}{h_s + h} \quad (1-4)$$

$$R^2 = 0.987$$

رابطه غیر خطی :

$$\frac{\Delta H}{H_t} = 0.732 \left(\frac{X_1 + L}{h_{s1} + h} \right)^{0.003} \left(\frac{X_2 + L}{h_{s2} + h} \right) \left(\frac{y_c}{h} \right)^{-0.059} \quad (2-4)$$

$$R^2 = 0.913$$

فصل پنجم

نتیجه‌گیری و پیشنهادات

۵-۱- نتایج

تحقیق حاضر بر روی سرریز پلکانی لبه‌دار و بدون لبه انجام گرفت و اهم نتایج حاصل از تحقیق به صورت زیر می‌باشد.

۱- استفاده از عمق آب قبل از پرش هیدرولیکی در حالتی که جریان همراه با حباب هوا می‌-

باشد باعث برآورد بیشتر (غیر واقعی) افت انرژی می‌گردد. ولی در حالتی که جریان بدون

حباب هوا می‌باشد این مقدار افت کمتر و به واقعیت نزدیک‌تر می‌باشد.

۲- با افزایش دبی جریان اختلاف در افت انرژی نسبی در حالت عمق جریان با حباب هوا و

عمق جریان بدون حباب هوا بیشتر می‌شود.

۳- با افزایش ارتفاع لبه در ابتدا و وسط پله تفاوت بین افت انرژی ایجاد شده در حالت عمق با

حباب هوا و عمق بدون حباب هوا نیز بیشتر می‌شود. ولی زمانی که لبه با ارتفاع‌های

کمتر در ابتدا و وسط پله قرار می‌گیرد درصد این تفاوت ناچیز می‌باشد.

۴- با افزایش دبی جریان در هر دو حالت پله‌های لبه‌دار و بدون لبه میزان افت انرژی کاهش

می‌یابد.

۵- افت انرژی در حالت لبه‌دار بودن پله‌ها بیشتر از حالت بدون لبه می‌باشد.

۶- در حالتی که لبه‌ها در ابتدای پله نصب شدند، لبه با ارتفاع ۱ سانتی‌متری به عنوان لبه

مناسب معرفی شد.

۷- در حالتی که لبه‌ها در وسط پله نصب شدند، لبه با ارتفاع ۱ سانتی‌متری به عنوان لبه

مناسب معرفی شد.

۸- در حالتی که لبه‌ها در ابتدا و وسط پله نصب شدند، لبه با ارتفاع ۵ سانتی‌متری به عنوان

لبه مناسب معرفی شد.

- ۹- در حالتی که لبه ابتدایی پله ثابت بود و لبه وسط تغییر می‌کرد، با افزایش ارتفاع لبه در وسط پله افت انرژی هم بیشتر شد.
- ۱۰- استهلاک انرژی جریان از روی سرریزهای پلکانی با لبه در ابتدا و وسط پله و همچنین در حالت بدون لبه با دبی جریان یا (V_c) نسبت عکس دارد.
- ۱۱- با قرارگیری لبه بر روی پله‌های اولیه سرریز به حوضچه آرامش با طول کمتری نیاز داریم. ساخت چنین حوضچه آرامشی از نظر اقتصادی و فنی قابل توجیه و مقرون به صرفه‌تر می‌باشد.
- ۱۲- مقایسه بین استهلاک انرژی نسبی در سرریز پلکانی به عرض ۲۵، ۵۰ و ۱۰۰ سانتی‌متری نشان داد که تغییر عرض فلوم تاثیر معنی‌داری در کاهش افت انرژی ندارد. به عبارتی تاثیر مقیاس مدل در برآورد استهلاک انرژی ناچیز می‌باشد.
- ۱۳- در بررسی تاثیر پارامترهای بی‌بعد بر استهلاک انرژی با کاربرد رگرسیون چند متغیره مشخص شد که پارامتر بی‌بعد $\frac{V_c}{h}$ دارای بزرگترین ضریب رگرسیون و تاثیر می‌باشد.

۵-۲- پیشنهادات

- تحقیق حاضر بر روی سرریز پلکانی لبه‌دار و بدون لبه انجام گرفت. در این قسمت به بیان پیشنهاداتی در رابطه با تحقیقات آینده پرداخته شده است.
- ۱- بررسی استهلاک انرژی در رژیم جریان غیرریزشی و در شیب‌های مختلف و اندازه‌گیری عمق بعد از پرش هیدرولیکی
- ۲- بررسی حالت‌های مختلف قرارگیری لبه‌ها بر روی پله‌های سرریز
- ۳- بررسی شکل‌های مختلف لبه با ارتفاع‌های متفاوت

منابع

- [۱] چانسون ه، (۱۳۸۴) "هیدرولیک شوتها و سرریزهای پلکانی" ترجمه شمسایی ا و پاک‌نهاد ف، چاپ اول، انتشارات علمی دانشگاه صنعتی شریف، تهران، ۴۵۲ صفحه.
- [۲] حیدرزاده م، بنی‌هاشمی م.ع، (۱۳۸۴)، "بررسی تحلیلی از سرریزهای پلکانی در ساخت سدهای کشور"، دومین کنگره ملی مهندسی عمران، تهران
- [۳] پدرام ا.ج، (۱۳۸۷)، پایان نامه ارشد: "بررسی و تجزیه و تحلیل استهلاک انرژی روی سرریز پلکانی لبه‌دار"، دانشکده تحصیلات تکمیلی، دانشگاه آزاد واحد تهران جنوب.
- [۴] بارانی غ، رهنما م.ب و سهرابی‌پور ن، (۱۳۸۲) "بررسی استهلاک انرژی بر روی سرریزهای پلکانی لبه‌دار"، ششمین کنفرانس بین‌المللی مهندسی عمران، اصفهان
- [5] Chanson H. (2000) "Forum article, Hydraulic of Stepped Spillways : Current Status" **J. Hydr. Engrg.**, 126, pp 636-637.
- [۶] سلماسی ف، (۱۳۸۲)، پایان نامه دکتری: "ارزیابی هیدرولیکی سرریزهای پلکانی با استفاده از مدل فیزیکی"، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهید چمران اهواز.
- [7] 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.
- [۸] نادری‌راد ا، طالب‌بیدختی ن، نیک‌سرشت ا.ج، (۱۳۸۸)، "بررسی استهلاک انرژی در انواع سرریز پلکانی ساده، شیب‌دار و لبه‌دار با استفاده مدل عددی"، **مجله مهندسی عمران و محیط زیست**، شماره ۱، دوره ۵۷، ص ۵۳.
- [9] Aigner D. (2000) "Hydraulic Design of Step Cascades" Technische Universitaet Dresden, 01309 Germany, 6pp
- [10] Chamani M.R. and Rajaratnam N. (1999) " Characteristics of skimming flow over stepped spillways" **J. Hydr. Engrg.**, 125, 4, PP 361-368.
- [11] Rajaratnam N. (1990) "Skimming Flow in Stepped Spillway" **J. Hydr. Engrg.**, 116, pp 587-591.

[12] Ohtsu I. Yasuda Y. and Takahashi M. (2004) "Flow Characteristics of Skimming Flows in Stepped Channels" **J. Hydr. Engrg.**, 130, pp 860-869.

[13] Chanson H. (1994a) "Comparison of energy dissipation between nappe and skimming flow regimes on stepped chutes" **J. Hydr. Res.**, 32, 2, pp 213-218.

[14] Chamani M.R. and Rajaratnam N. (1994) "Jet Flow on Stepped Spillways" **J. Hydr. Engrg.**, 120, 2, pp 254-259.

[15] Chamani M.R. and Rajaratnam N. (1999) "Onset of Skimming Flow on Stepped Spillway" **J. Hydr. Engrg.**, 125, pp 969-971.

[۱۶] حسنعلی پور شهرآبادی، اژدری مقدم م، کاویان پور اصفهانی م، (۱۳۹۱)، "بررسی آزمایشگاهی آستانه بالا و پایین جریان انتقالی در سرریزهای پلکانی"، هفتمین کنفرانس هیدرولیک ایران، ارومیه

[17] Chinnarasri Ch. (2002) "Assessing Flow Resistance of Skimming Flow on the Stepped Spillways" **Journal of Dam Engineering.**, 7, 7, pp 303-321.

[۱۸] حیدری ارجلو س، موسوی جهرمی س.ح، فرازمند س، (۱۳۸۷)، "بررسی هیدرولیک جریان در سرریزهای پلکانی با استفاده از مدل‌های فیزیکی"، دومین همایش ملی مدیریت شبکه‌های آبیاری و زهکشی، اهواز

[۱۹] حیدری ارجلو س، موسوی جهرمی س.ح، فرازمند س، (۱۳۸۸)، "بررسی شروع جریان غیرریزشی (Skimming Flow) در سرریزهای پلکانی با استفاده از مدل‌های فیزیکی"، هشتمین کنگره بین‌المللی مهندسی عمران، شیراز

[۲۰] سلماسی ف، بینا م، موسوی جهرمی ح، (۱۳۸۲)، "بررسی آزمایشگاهی افت انرژی جریان از روی سرریزهای پلکانی"، ششمین کنفرانس بین‌المللی مهندسی عمران، اصفهان

[۲۱] موسوی جهرمی ح، بینا ح، سلماسی ف، (۱۳۸۴)، "تاثیر هندسه سرریزهای پلکانی در افت انرژی"، پنجمین کنفرانس هیدرولیک ایران، کرمان

[۲۲] سلماسی ف، بینا م، موسوی جهرمی ح، (۱۳۸۴)، "بررسی آزمایشگاهی رژیم جریان انتقالی در سرریزهای پلکانی"، پنجمین کنفرانس هیدرولیک ایران، کرمان

[۲۳] کاویانپور م.ر، معصومی ح.ر، (۱۳۸۶)، "بررسی افت کلی انرژی در سرریزهای پلکانی"، ششمین

کنفرانس هیدرولیک ایران، شهرکرد

[۲۴] جمشیدی م، عطاری ج، (۱۳۸۷)، "بررسی کفایت روابط مختلف هیدرولیکی برای طراحی

سرریز پلکانی سد سیاه بیشه"، هفتمین کنفرانس هیدرولیک ایران، تهران

[۲۵] حیدری ارجلو س، موسوی جهرمی ح، فرازمنند س، (۱۳۸۸)، "بررسی تاثیر شیب، بر میزان افت

انرژی نسبی صورت گرفته در سرریزهای پلکانی با استفاده از مدل‌های فیزیکی"، هشتمین کنگره بین

المللی مهندسی عمران، شیراز

[۲۶] سلماسی ف، (۱۳۸۸)، "اثر تعداد پله‌ها بر استهلاک انرژی در سرریزهای پله‌ای براساس روش

جدید طراحی"، مجله دانش آب و خاک، شماره ۱، ص ۲۷.

[۲۷] فتحی ا، بینا م. و موسوی جهرمی ح، (۱۳۸۸) "بررسی تاثیر شیب تنداب پایین دست تاج بر

محل هواگیری طبیعی در جریان غیرریزشی در سرریز پلکانی"، نشریه آب و خاک (علوم و صنایع

کشاورزی)، شماره ۳، ص ۱۵۶ تا ۱۶۷.

[۲۸] حیدری ارجلو س، موسوی جهرمی س.ح، (۱۳۸۹)، "مقایسه افت انرژی صورت گرفته در

رژیم‌های جریان ریزشی و غیرریزشی در سرریزهای پلکانی"، سومین همایش ملی مدیریت

شبکه‌های آبیاری و زهکشی، اهواز

[۲۹] رسائی م، شیر افروس ع، نادری راد ا، (۱۳۸۹)، "مقایسه میزان استهلاک 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

[۳۰] سرفراز م، عطاری ج، روشن ر، خراسانی زاده ع، (۱۳۸۹)، "مقایسه استهلاک انرژی از روابط

تجربی با اندازه‌گیری‌های مدل سرریزهای پلکانی ایران"، نهمین کنفرانس هیدرولیک ایران، تهران

[۳۱] اصغرزاده م، سعادت س، (۱۳۹۱)، "تحلیل جریان از روی حوضچه آرامش سرریزهای پلکانی و

اوجی به کمک مدل عددی"، همایش ملی عمران و توسعه پایدار، مشهد

[۳۲] فیل‌بند کشکولی م.ا، خراسانی‌زاده ع، (۱۳۹۲)، "مقایسه عملکرد حوضچه‌های آرامش بر روی

سد سیاه‌بیشه"، هفتمین کنگره ملی مهندسی عمران، زاهدان

[33] Chanson H. and Toombes L. (2002) "Energy Dissipation and Air Entrainment in Stepped Storm Waterway: Experimental Study" **ASCE.**, pp 305-315.

[34] Gonzalez C.A., Chanson H., (2004) "Scale Effects in Moderate Slope Stepped Spillways Experimental Studies in Air-Water Flows", 8th National Conference on Hydraulics in Water Engineering, Australia

[35] Musavi-Jahromi H. Bina, M. and Salmasi F. (2008) "Physical and Numerical Modeling of the Nappe Flow in the Stepped Spillways" **Journal of Applied Sciences.**, 8, 9, pp 1720-1725.

[36] Roshan R. Azamathulla H.MD. Marosi M. Sarkardeh H. Pahlavan H. and Ghani A.AB. (2010) "Hydraulics of stepped spillways with different numbers of steps" **Dams and Reservoirs.**, 20, 3, pp 131-136.

[37] Edijatno Anwar N. and Dermawan V. (2011) "Physical Hydraulic Model Investigation of Flow And Energy Dissipation on Smooth and Stepped Spillway With Steep Slope" **International Journal of Academic Research.**, 3, 1, pp 727-731.

[38] Dasstgheib A., Niksokhan M.H., and Nowroozpour A.R., (2012) "Comparing of Flow Pattern and Energy Dissipation over different forms of Stepped Spillway", World Environmental and Water Resources Congress 2012, p 1246-1259, USA

[39] Ominyi E.S. and Ituma E.E. (2012) "Energy Dissipation Over Different Fall Angles Through Rectangular Irrigation Canal, A Panacea For Sustainable Crop Production In Tropical Regions" **I.J.S.N.**, 3, 3, PP 599-603.

[۴۰] بارانی غ، صدری الف، (۱۳۸۲)، "استهلاک انرژی در سرریزهای پلکانی شیب‌دار"، ششمین

کنفرانس بین‌المللی مهندسی عمران، اصفهان

[۴۱] جعفری‌نیا ر، موسوی جهرمی ح، (۱۳۸۴)، "ارزیابی تلفات انرژی در سرریزهای پلکانی در رژیم

ریزشی و غیرریزشی"، دومین کنفرانس سراسری آبخیزداری و مدیریت منابع آب و خاک، کرمان

[۴۲] منصوری ع، پدرام ا.ح، (۱۳۸۷)، "بررسی استهلاک انرژی روی سرریز پلکانی لبه‌دار"، هفتمین

کنفرانس هیدرولیک ایران، تهران

[۴۳] صداقت‌نژاد س، (۱۳۸۸)، پایان‌نامه ارشد: "بررسی استهلاک انرژی در سرریزهای پلکانی با آستانه انتهایی"، دانشکده عمران، دانشگاه صنعتی شریف.

[۴۴] ترابی م، ترابی ا، فرهادی ع، (۱۳۸۹)، "بررسی آزمایشگاهی سرریز پلکانی: اثر شیب معکوس و آرایش پلکان‌ها در استهلاک انرژی"، نهمین کنفرانس هیدرولیک ایران، تهران

[۴۵] حامدی و همکاران، (۱۳۹۰)، "بررسی آزمایشگاهی استهلاک انرژی در رژیم جریان تیغه‌ای سرریزهای پلکانی با پله‌های شیب‌دار"، ششمین کنگره ملی مهندسی عمران، سمنان

[۴۶] فولادی‌پناه م، جعفری‌نیا ر، (۱۳۹۰)، "تاثیر شیب معکوس پله‌ها بر روی افت انرژی در سرریز پلکانی"، اولین کنفرانس بین‌المللی و سومین کنفرانس ملی سد و نیروگاه‌های برق آبی، تهران

[۴۷] سلماسی ف و ارونقی ه، (۱۳۹۲) "اثر شیب در استهلاک انرژی جریان از روی سرریز پلکانی" *مجله مهندسی آب و محیط زیست ایران، دانشگاه شاهرود، شماره ۱، دوره ۱، ص ۴۷ تا ۵۶.*

[48] Chinnarasri CH. and Wongwises S. (2004) "Flow regimes and energy loss on chutes with upward inclined steps" **Canadian Journal of Civil Engineering.**, 31, 5, PP 870-879.

[49] Andre S. Boillat H.L. Schleiss A.J. and Matos J. (2004) "Energy dissipation and hydrodynamic forces of aerated flow over macro-roughness lining for overtopped embankment dams" **Hydraulics of Dams and River Structures.**, pp 189-196.

[50] Barani G.A. Rahnema M.B. and Sohrabipoor N. (2005) "Investigation of Flow Energy over Different Stepped Spillways" **American Journal of Applied Sciences.**, 2, 1, pp 1101-1105.

[51] Chinnarasri CH. and Wongwises S. (2006) "Flow Patterns and Energy Dissipation over Various Stepped Chutes" **ASCE.**, 132, 1, pp 70-76.

[52] Carvalho R.F and Martins R. (2009) "Stepped Spillway with Hydraulic Jumps: Application of a Numerical Model to a Scale Model of a Conceptual Prototype" **J. Hydraul. Eng.**, pp 615-619.

[53] Hamed A.M., Mansoori A., Malekmohamadi I., and Roshanaei H., (2011)

"Estimating Energy Dissipation in Stepped Spillways with Revers Inclined Steps and End Sill", World Environmental and Water Resources Congress 2011, p 2528, USA

[54] Zare H.K. and Doering J.C. (2012) "Inception point of Air Entrainment and Training Wall Characteristics of Baffles and Sills on Stepped Spillways" **J. Hydraul. Eng.**, 138, pp 1119-1124.

[۵۵] طاهرشمسی ا، مجدزاده طباطبایی م، جمعه‌گی ع، (۱۳۸۸)، "بررسی تاثیر لبه‌دار کردن سرریزهای پلکانی در پراکنش انرژی سرریز با روش عددی"، هشتمین کنفرانس هیدرولیک ایران، تهران

[۵۶] منصوری ع، پیرستانی م، خضرائی علیزاده ک، (۱۳۸۹)، " بررسی استهلاك انرژی بر روی

سرریزهای پلکانی لبه‌دار با استفاده از مدل عددی فلوئنت"، نهمین کنفرانس هیدرولیک ایران، تهران

[۵۷] رفیع وحید م، جلال الدینی کرکی س.م، جعفری نیا ر، شیرازیان س، امینی‌پور م، (۱۳۹۰)،

"مقایسه تاثیر لبه‌دار کردن سرریز پلکانی با سرریز بدون لبه در پراکنش انرژی با استفاده از مدل

عددی Flow-3d"، پنجمین کنفرانس سراسری آبخیزداری و مدیریت منابع آب و خاک، کرمان

[۵۸] منصوری ع، حامدی ا.م، ملک‌محمدی ا، کتابدار ا، (۱۳۹۰)، "بررسی استهلاك انرژی در رژیم

جریان تیغه‌ای سرریزهای پلکانی با پله‌های شیب‌دار توسط مدل عددی فلوئنت"، ششمین کنفرانس

ملی مهندسی عمران، سمنان

[۵۹] رضائی م.ج، طالب بیدختی ن، (۱۳۹۰)، "مدل سازی عددی و بررسی تاثیرات مقیاس بر روی

جریان دوفازی انواع سرریزهای پلکانی"، ششمین کنگره ملی مهندسی عمران، سمنان

[۶۰] کشاورزیان م، نادری راد ا، شاملو ج، (۱۳۹۱)، "بررسی عددی احتمال کاویتاسیون در انواع

سرریزهای پلکانی"، دومین کنفرانس ملی سازه- زلزله- ژئوتکنیک، مازندران

[61] Rezaei M.J., Talebbeydokhti N., (2012) "Numerical Investigation of Energy Dissipation over Various Stepped Spillway", 9th International Congress on Civil Engineering , Isfahan, Iran

[62] Takahashi M. Yasuda Y. and Ohtsu I. (2006) "Discussion of " Flow Patterns and Energy Dissipation over Various Stepped Chutes" by Chaiyuth Chinnarasri and

Somchai Wongwises" **ASCE.**, 132, 1, pp 70-76.

[63] Matos J. and Quintela A. (1994) "Jet flow on stepped spillways" **J. Hydraul. Eng.**, ASCE, 120, 2, pp 443-444.

[64] Pegram G.G.S and Officer A.K. (1999) "Hydraulic of skimming flow on modeled stepped spillways" **J. Hydraul. Eng.**, ASCE, 125, 5, pp 500-509.

[۶۵] مومنی م، فعال قیومی ع، (۱۳۹۱) "تحلیل های آماری با استفاده از SPSS" چاپ هفتم،

گنج شایگان، تهران، ص ۱.

Abstract

Leaving behind a multi-millennial history, stepped spillways which consist of a series of steps from near the crest to the upstream toe, are generally used in reservoir dams in order to release floods securely. Due to their extraordinary ability on energy dissipation of the flow, using stepped spillways is now wide spread around the world. Current study was aimed to investigate excrementally the energy loss on edged and non-edged stepped spillways in Nappe flow regime. The research has carried out on a 10 step spillway sample with an angle of 45° . Designed edges were embedded in certain first and mid steps, and the rate of energy loss was calculated per different discharge. The research findings has been showed that in both cases, edged and non-edged steps, the relative energy loss reduced with the increasing discharge, also energy loss was more in the case of edged steps than the non-edged ones. In the case of installing edges separately in the first and mid step, an edge with 1cm height and in the case of simultaneous installation, the edge with 1cm height were introduced as the proper ones. When the step's first edge was fixed and the mid one was changing, the energy loss was also greater with increasing of edge height in the middle of step. Using water depth before hydraulic jump (in the case of bubbled flow) has led to greater estimate on relative energy loss, as well. In addition, locating edges on the spillway's initial steps decreased the stilling basin length. Research findings also showed that the effect of the sample scale on energy loss estimation was negligible. For the proper place to install the edges, results revealed that in all cases using a higher edge was more appropriate. In the cases that two similar edges located in the first and mid steps, locating edge in first step for an edge with 1 and 5 cm height was more proper; but for a 3 cm high edge, the case was different.

Keywords: Stepped Spillway, Energy Dissipation, Edge, Nappe Flow Regime, Edged steps.