

بهینه‌سازی ژئومتریک مدل سرریزهای پلکانی

امین رستمی راوری^۱ و حبیب موسوی جهرمی^۲

چکیده

سرریزهای پلکانی یکی از انواع سرریزها هستند که به صورت پله‌هایی از نزدیکی تاج سرریز شروع شده و تا پاشنه پایین دست سرریز ادامه دارند. کاربرد این سرریزها امروزه بیشتر به دلایل تأثیر قابل ملاحظه پله‌ها در میزان استهلاک انرژی و اقتصادی بودن آن است. این سرریزها به دلیل هوادهی و پالایش آب در طول سرریز، در کشاورزی نیز کاربرد دارند. در این تحقیق، با ساخت ۱۰ مدل سرریز پلکانی، از سرریز بدون پلکان تا سرریز پلکانی با ۳۱ پله درون فلوام آزمایشگاهی، سعی گردید تا با آنالیز نتایج به دست آمده از آزمایشات بر روی مدل‌ها، تأثیر پارامترهای مختلف مانند عدد فرود و عدد رینولدز بر افت نسبی انرژی در مدل سرریز پلکانی به دست آید. به همین منظور، با آنالیز داده‌ها و مشخص شدن پارامترهای مؤثر در این رابطه از جمله: y_c (عمق بحرانی)، H_{dam} (ارتفاع سرریز)، N (تعداد پلکان)، α (زاویه سرریز)، و همچنین h, l (به ترتیب ارتفاع پلکان و پیش آمدگی پلکان) و با استفاده از تکنیک بی بعد کردن پارامترها چندین کمیت مشخص شد. سپس با بررسی اثر و تجزیه و تحلیل آن‌ها، از جمله این که در مدل‌های مورد مطالعه بیشترین میزان افت انرژی در تعداد ۱۵ پله رخ می‌داد، پارامترهای مؤثر در بهینه‌سازی ژئومتریک سرریزهای پلکانی که اثر هندسی و هیدرولیکی داشتند، به صورت ارتباط بین نسبت $\frac{h}{l}$ یا $\frac{N}{\alpha}$ (کمیت‌های ژئومتریک) با نسبت $\frac{H_{dam}}{y_c}$ ارایه گردید. در ادامه با در نظر گرفتن پارامترهای به دست آمده و خصوصیات سرریز ۱۵ پله، معادله بهینه ژئومتریک سرریزهای پلکانی ارایه گردید.

واژه‌های کلیدی: سرریز پلکانی، بهینه‌سازی ژئومتریک، افت نسبی انرژی، مدل‌های فیزیکی و هیدرولیکی

تاریخ دریافت مقاله: ۸۷/۷/۱۶ تاریخ پذیرش: ۸۷/۱۰/۱۴

۱- دانشجوی دکتری سازه‌های آبی، دانشگاه آزاد اسلامی تهران، واحد علوم و تحقیقات

۲- عضو هیأت علمی دانشگاه آزاد اسلامی تهران، واحد علوم و تحقیقات

مقدمه و بررسی منابع

سرریز پلکانی متشکل از پله‌هایی است که از نزدیک تاج سرریز شروع و تا پاشنه پایین دست ادامه دارند. استفاده از سرریز پلکانی از زمان‌های قدیم رایج بوده است، لیکن به دلیل تأثیر قابل ملاحظه پلکان‌ها بر میزان استهلاک انرژی جریان، در سال‌های اخیر شناخت تکنولوژی جدید استفاده از بتن غلطکی و هم‌خوانی این روش ساخت با سرریز یاد شده، باعث کاربرد وسیع سرریزهای پلکانی در تعداد زیادی از پروژه‌ها گردیده است. هم‌چنین در طول مسیر پلکان‌های این سرریز نوعی جریان مخلوط با آب ایجاد می‌گردد که باعث پالایش آب می‌شود که از این پدیده می‌توان برای تصفیه آب‌های آلوده برای مصارف کشاورزی استفاده کرد.

تحقیقات نشان می‌دهند که میزان استهلاک انرژی در سرریزهای پلکانی بیشتر از سرریزهای صاف (بدون پلکان) با همان ابعاد می‌باشد. میزان افت انرژی زیاد ایجاد شده توسط پلکان‌ها باعث می‌گردد تا عمق حفاری حوضچه آرامش پایین دست سرریز و ارتفاع دیواره‌های جانبی آن به میزان قابل توجهی کاهش یافته و از این نظر صرفه‌جویی اقتصادی زیادی در اجرای سد به وجود آید.

به نظر چانسون^۱ (b ۱۹۹۴) سرریزهای پلکانی از زمان‌های بسیار قدیم (بیش از ۳۰۰۰ سال) مورد استفاده قرار می‌گرفته‌اند. ولی تاکنون برخی از جنبه‌های هیدرولیکی مربوط به آن‌ها ناشناخته باقی مانده است (۹).

در سرریزهای پلکانی سه نوع رژیم جریان متمایز تعریف شده است که عبارتند از:

رژیم جریان ریزشی^۱، رژیم جریان بینابینی و رژیم جریان غیر ریزشی^۲.

شایان ذکر است که رژیم جریان بینابینی در واقع حالتی گذرا بین دو حالت رژیم دیگر است اما دو رژیم دیگر دارای اهمیت بوده و در مطالعات اکثر محققین ذکر شده‌اند.

در رژیم جریان ریزشی، ارتفاع کل سرریز به تعدادی آبشار عمودی تقسیم شده و جریان آب در برخورد با پلکان‌های متوالی می‌تواند دارای پرش هیدرولیکی کامل و یا ناقص (بسته به طول افقی پلکان) باشد. رژیم جریان ریزشی در دبی‌های کم، و ارتفاع پله‌های بزرگ اتفاق می‌افتد. استهلاک انرژی بر اثر تماس جت جریان آب و هوا و اختلاط جت روی هر پله و تشکیل پرش هیدرولیکی کامل و یا ناقص روی هر پله حاصل می‌شود.

در رژیم جریان غیر ریزشی، پلکان‌ها مانند زبری بزرگ در برابر جریان عمل می‌کنند. در این نوع رژیم یک بستر کاذب که آستانه انتهایی پلکان‌های متوالی را به یکدیگر متصل می‌سازد، تشکیل می‌گردد. قسمت اعظم استهلاک انرژی در این نوع رژیم، بر اثر ایجاد جریان‌های چرخشی زیر بستر کاذب ایجاد می‌گردد (۵). راجاراتنام^۳ (۱۹۹۰) رابطه زیر را برای معرفی ضریب اصطکاک در سرریزهای پلکانی با رژیم جریان غیر ریزشی ارائه نمود:

$$C_f = \frac{2 y_n^3 g \sin \alpha}{q^2} \quad (1)$$

که در آن C_f ، ضریب افت انرژی در پله‌ها، و α شیب سرریز، g شتاب ثقل، q دبی در واحد عرض سرریز و y_n عمق نرمال در سرریز می‌باشد (۱۲).

1. Nappe flow
2. Skimming flow
3. Rajartnam

1. Chanson

به‌عنوان متغیرهای مورد بررسی انتخاب کرد و با انجام آزمایش بر روی شش گزینه شامل: شیب سرریز ۴۰، ۴۵، ۵۵ درجه و اندازه پله‌های ۲۵ و ۳۰ میلی‌متر نشان داد که، عدد فرود نقش مؤثری در میزان C_f دارد. یعنی با افزایش عدد فرود، C_f کاهش می‌یابد. وی هم‌چنین نشان داد که با افزایش شیب عمومی سرریز، C_f افزایش می‌یابد (۴).

سلماسی (۱۳۸۲ الف و ب) با ساخت تعداد زیادی مدل و انجام آزمایش با شیب‌ها و تعداد پلکان‌های متفاوت به این نتیجه رسد که استفاده از عمق آب قبل از پرش هیدرولیکی در پایین دست سرریز جهت تعیین افت انرژی، باعث برآورد بیشتر افت انرژی نسبی می‌گردد. هم‌چنین با افزایش دبی جریان از میزان استهلاك انرژی در طول سرریز کاسته می‌شود. افت انرژی در سرریز صاف کمتر از سرریز پلکانی بوده و با افزایش دبی این تفاوت بین مقدار انرژی نسبی در دو نوع سرریز صاف و پلکانی بیشتر می‌گردد. در صورتی‌که تمام پارامترهای هندسی مؤثر در افت انرژی در مطالعات مورد توجه قرار گیرد، می‌توان از تأثیر رژیم جریان صرف نظر کرد. در بررسی تأثیر پارامترهای بی‌بعد در افت انرژی با کاربرد رگرسیون چندمتغیره نیز مشخص شد که در سرریزهای پلکانی تمامی پارامترهای بی‌بعد مانند عدد رینولدز، عدد فرود، نسبت ارتفاع سرریز به عمق بحرانی جریان و تعداد پلکان معنی‌دار بوده و نمی‌توان آن‌ها را در معادله نهایی حذف نمود. در بررسی پارامتر بی‌بعد شیب سرریز بر افت انرژی با کاربرد رگرسیون چند متغیره مشخص گردید که در سرریزهای پلکانی تأثیر شیب غیر قابل چشم‌پوشی است (۲،۳).

کریستودولو^۱ (۱۹۹۳) نتایج آزمایش‌های مدل‌سازی خود و هم‌چنین سورنسن را به این‌صورت ارایه کرد که تأثیر تعداد پلکان‌ها بر روی استهلاك انرژی مشهود است و به‌ازای هر مقدار $\frac{y_c}{h}$ (نسبت عمق بحرانی به ارتفاع پلکان) مقدار افت انرژی با افزایش تعداد پلکان، افزایش می‌یابد و تأثیر تعداد پلکان در دبی‌های بالا بیشتر می‌شود. هم‌چنین به‌ازای یک دبی معین، استهلاك انرژی با افزایش ارتفاع کل سرریز کاهش می‌یابد (۱۱).

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

چانسون (c ۱۹۹۴) برای نقطه شروع رژیم جریان غیر ریزشی، با تجزیه و تحلیل نتایج حاصل از آزمایش‌های سایر محققین نشان داد که برای وقوع رژیم جریان غیر ریزشی دبی جریان بایستی از یک مقدار مشخص بیشتر شود و به همین‌منظور رابطه زیر را ارایه کرد.

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

در رابطه فوق $(y_c)_{onset}$ عمق بحرانی مشخصه یعنی مرز عمق بحرانی (دبی) که نشان‌دهنده تغییر وضعیت جریان است، می‌باشد (۱۰).

یزدانی (۱۳۷۷) در طراحی مدل‌های فیزیکی، دو پارامتر شیب سرریز و ارتفاع پله‌های سرریز را

توسط صفحه پلکسی گلاس پوشیده می‌شد به سرریز متصل گردید. پس از انجام آزمایش، پله بعدی با ارتفاع ۰/۱۵ متر به سرریز متصل گردید و به همین ترتیب تعداد پله‌ها افزایش داده شد. سرریز در تمام مراحل انجام آزمایشات مربوط به این تحقیق در فاصله ۱/۵ متری ابتدای فلوم نصب شد. ارتفاع این سرریز ثابت و برابر ۰/۶۰ متر بود که همان H_{dam} می‌باشد. دبی از طریق مخزن تغذیه و توسط یک شیر کنترل از مقادیر کم تا نزدیکی حداکثر دبی برای آزمایشات مورد استفاده قرار گرفت. در این آزمایشات عمق آب روی سرریز توسط یک خط کش میلی‌متری که بر روی جداره فلوم نصب شده بود در محل ایجاد عمق بحرانی قرائت می‌شد و دبی عبوری به وسیله یک سرریز مثلثی در انتهای فلوم محاسبه می‌شد. عمق آب قبل و بعد از پرش هیدرولیکی نیز توسط یک شاخص مدرج با دقت ۱ میلی‌متر قرائت گردید.

پس از برقراری جریان، اندازه‌گیری عمق آب قبل از پرش هیدرولیکی مخصوصاً در دبی‌های بالا به علت ورود هوا به داخل جریان به سختی قابل اندازه‌گیری بود، لذا به دلیل نوسانات شدید سطح آب معمولاً اندازه‌گیری از چند نقطه مسیر انجام شده و متوسط آن‌ها در انجام محاسبات مورد استفاده قرار گرفت. اندازه‌گیری عمق آب بعد از پرش هم در محلی که حباب‌های هوای کمی در جریان آب مشاهده می‌شد انجام می‌شد.

در دبی‌های کم، جریان به صورت ریزشی بوده و با افزایش دبی، رژیم ریزشی به تدریج به غیر ریزشی تبدیل می‌شد. در این آزمایشات سرعت توسط یک لوله پیتوت اندازه‌گیری می‌شد و محاسباتی به صورت زیر انجام گردید.

در این تحقیق با ساخت ۱۰ مدل سرریز پلکانی سعی گردید تأثیر پارامترهای مختلف بر افت نسبی انرژی در مدل سرریز پلکانی مشخص گردد.

مواد و روش‌ها

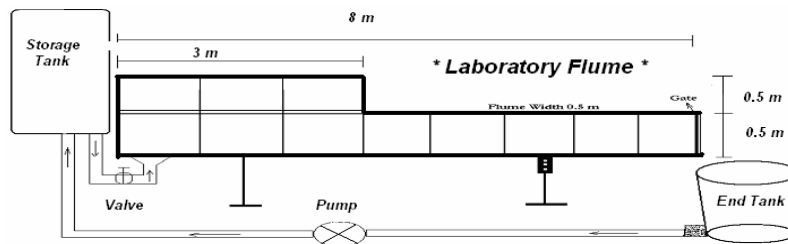
مشخصات فلوم مورد استفاده

فلوم مورد استفاده در این تحقیق دارای اسکلت فلزی و دیواره‌ها و کف آن از جنس شیشه سکوریت با ضخامت ۱۰ میلی‌متر، طول ۸ متر، عرض ۰/۵ متر و ارتفاع آن در ۳ متر اول ۱ متر در ۵ متر باقی‌مانده ۰/۵ متر بود (شکل ۱). فلوم دارای یک سیستم بسته جریان آب بود که آب توسط یک لوله وارد فلوم شده و پس از طی طول فلوم به مخزن انتهایی می‌ریخت. آب از این مخزن توسط یک پمپ سانتریفیوژ به مخزن اصلی دستگاه برگردانده می‌شد. مخزن اصلی دستگاه امکان فراهم نمودن دبی تا حداکثر ۳۵ - ۳۰ لیتر در ثانیه را فراهم کرد.

مدل‌های فیزیکی و روش آزمایش

کلیه مدل‌های ساخته شده جهت انجام این آزمایشات با استفاده از صفحات پلکسی گلاس با ضخامت ۳ میلی‌متر ساخته شد و جهت اتصال و آب‌بندی کلیه قسمت‌ها از چسب شیشه شفاف استفاده شد. تاج سرریز به صورت افقی بوده و ارتفاع کل سرریز در تمام آزمایشات، ثابت در نظر گرفته شد. در ابتدا این سرریز، بدون پله در نظر گرفته شد، و برای مرحله بعد یک پله تحت زاویه ۴۵ درجه، سپس تعداد ۳ و ۵ و ۷ و ۱۱ و ۱۵ و ۲۳ پله اضافه و ۳۱ پله اضافه شد.

در این آزمایشات، با عبور دادن دبی از مقادیر کم تا حداکثر دبی داده‌برداری انجام گردید. برای پلکان‌ها اولین پله با ارتفاع ۰/۳ متر بر روی یک پایه چوبی که



شکل ۱- نمایی از فلوم مورد استفاده جهت نصب مدل‌ها در آزمایشگاه

جدول ۱- جدول آنالیز ابعادی و واحد پارامترهای مؤثر در سرریز پلکانی

ردیف	پارامتر	نماد	واحد	بعد براساس سیستم M.L.T
۱	لزجت دینامیکی	μ	$Kg / m.s$	$M.L^{-1}.T^{-1}$
۲	چگالی سیال	ρ	Kg / m^3	$M.L^{-3}$
۳	شتاب ثقل	g	m / s^2	$L.T^{-2}$
۴	عمق جریان	y	m	L
۵	سرعت جریان	V	m / s	$L.T^{-1}$
۶	ارتفاع سرریز	H_{dam}	m	L
۷	پیش آمدگی پله	l	m	L
۸	ارتفاع پله	h	m	L
۹	تعداد پله	N	---	---

در آن‌ها y_1, y_2 به ترتیب اعماق ثانویه و اولیه پرش هیدرولیکی هستند. افت انرژی نسبی هم به صورت زیر محاسبه گردید:

$$\frac{\Delta H}{H_t} = \frac{H_t - H_1}{H_t} \quad (۷)$$

تعیین پارامترهای مؤثر در جریان عبوری از سرریزهای پلکانی با انجام آنالیز ابعادی

با توجه به نوع سرریز و مطالعاتی که توسط اکثر محققین بر روی این سازه صورت گرفته است، عوامل و پارامترهای مهم و مؤثر بر جریان از روی سرریزهای پلکانی به شرح ذیل می‌باشد:

الف- خصوصیات مربوط به سیال شامل: لزجت دینامیکی (μ)، جرم مخصوص سیال (ρ) و شتاب ثقل (g).

مقدار کل انرژی در بالادست سرریز یعنی H_t ، به این صورت محاسبه شد:

$$H_t = El + \frac{3}{2} y_c \quad (۳)$$

در این رابطه El ، رقوم تاج سرریز (۶/۰ متر) است. برای کنترل دبی، علاوه بر سرریز مثلثی از رابطه ذیل نیز استفاده گردید:

$$q = (Y_c^3 \cdot g)^{0.5} \quad (۴)$$

محاسبه انرژی در پائین دست سرریز و قبل از پرش هیدرولیکی با استفاده از روابط ذیل، محاسبه گردید:

$$H_1 = y_1 + \frac{V_1^2}{2g} = y_1 + \frac{q^2}{2gy_1^2} \quad (۵)$$

$$\frac{q^2}{g} = y_1 y_2 \left(\frac{y_1 + y_2}{2} \right) \quad (۶)$$

نتایج و بحث

مقایسه افت نسبی انرژی در آزمایشات

بررسی افت نسبی انرژی نسبت به y_c :

با توجه به این نکته که عمق بحرانی در کانال‌های مستطیلی نشان‌دهنده دبی نیز می‌تواند باشد، لذا افت نسبی انرژی در تمام سرریزهای مورد آزمایش با افزایش عمق بحرانی (دبی)، کاهش یافت. با توجه به نمودار (۱) به تدریج از سرریز بدون پلکان تا سرریز با تعداد ۷ پلکان، کاهش نسبی افت انرژی مشهود بود اما از آن به بعد تا سرریز با ۱۵ پلکان مجدداً افزایش میزان افت نسبی را شاهد بودیم. علت این است که پس از سرریز با ۱۵ پلکان اندازه پلکان‌های بعدی به حدی کم می‌شود که امکان تشکیل جریان‌های گردابی که عامل اصلی افت در سرریزهای پلکانی هستند به‌خوبی فراهم نمی‌شود و در واقع اثر پلکان‌ها به‌عنوان زبری کاهش می‌یابد.

بیشترین میزان افت نسبی انرژی در سرریز با ۱۵ پلکان مشاهده گردید و در سرریز با تعداد ۷ پلکان کمترین میزان افت انرژی اتفاق افتاد. علت افت نمودارها در عمق بحرانی ۰/۱۵ متر به‌دلیل، ابتدای ورود هوا به داخل جریان می‌باشد و به همین دلیل در این محاسبات از عمق ثانویه پرش در محاسبات استفاده شده است (۲).

در نمودار (۱)، با افزایش دبی جریان (عمق بحرانی)، جریان از حالت ریزشی به غیر ریزشی تبدیل شد. البته براساس نتایج سلماسی و موسوی (۱۳۸۲ ب)، با در نظر گرفتن پارامترهای هندسی مؤثر در افت نسبی انرژی می‌توان از اثر رژیم جریان صرف‌نظر کرد (۳).

ب- خصوصیات مربوط به هیدرولیک جریان شامل: عمق جریان (y) و سرعت جریان (V).

ج- خصوصیات شکل و هندسه سرریز، شامل: ارتفاع پله (h)، پیش آمدگی پله (l)، تعداد پله (N) و ارتفاع سرریز (H_{dam}).

بنابراین آنالیز ابعادی سرریز پلکانی تابع پارامترهای: $F(H_{dam}, N, l, h, V, y, g, \rho, \mu) = 0$ می‌باشد. برای آنالیز ابعادی بایستی واحد و ابعاد هر کدام از این پارامترها را بر اساس سیستم M.L.T تعیین نمود. در آنالیز ابعادی به‌روش تئوری π باکینگهام، با توجه به جدول پارامترهای مؤثر در سرریز پلکانی و ابعاد آن‌ها و تشکیل پارامترهای بدون بعد آن‌ها، سه متغیر ρ, V, y را که در اکثر پارامترها حضور دارند، انتخاب کردیم.

پارامترهای بدون بعد به‌صورت زیر تعریف می‌شوند: نسبت ارتفاع پلکان به پیش آمدگی پله: $\pi_1 = \frac{h}{l}$ و تعداد پله‌ها: $\pi_2 = N$ و استهلاک نسبی انرژی:

$$\pi_3 = \frac{\Delta H}{H_t}$$

با در نظر گرفتن اثر لزجت سیال:

$$\pi_4 = \rho^a V^b y^c \mu = (ML^{-3})^a (LT^{-3})^b (L)^c (ML^{-1}T^{-1}) \Rightarrow a = 0, b = -2, c = 1$$

$$\pi_4 = \frac{\mu}{\rho V y} = \frac{1}{R_e}$$

حال با در نظر گرفتن اثر ثقل:

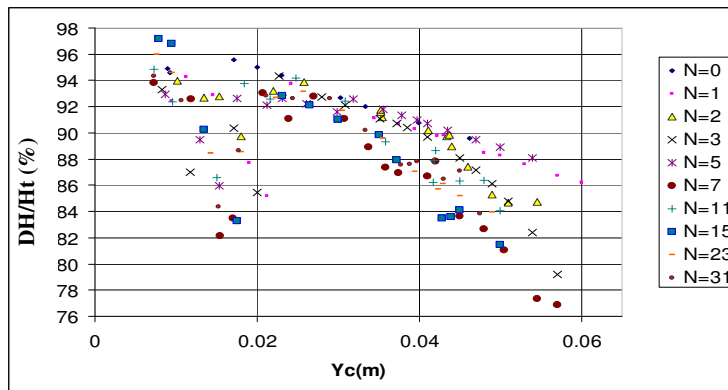
$$\pi_5 = \rho^a V^b y^c g = (ML^{-3})^a (LT^{-3})^b (L)^c (LT^{-2}) \Rightarrow a = 0, b = -2, c = 1$$

$$\pi_5 = \frac{gy}{V^2} = \frac{1}{Fr^2}$$

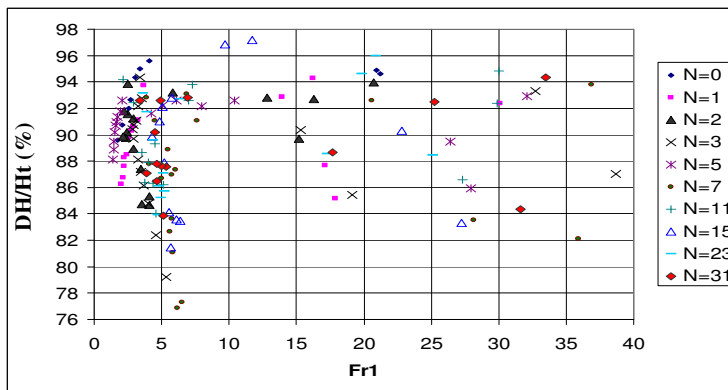
$$\pi_5 = f\left(\frac{h}{l}, N, Fr, R_e\right)$$

$$\frac{\Delta H}{H_t} = g\left(\frac{h}{l}, Fr, R_e, \frac{y_c}{H_{dam}}\right)$$

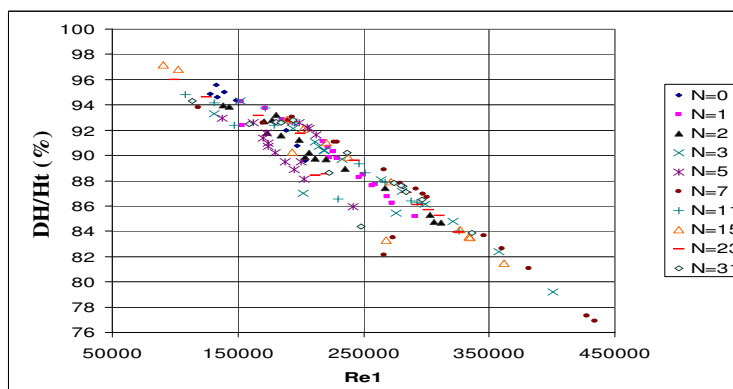
پس از مشخص شدن پارامترهای اساسی و لازم فوق، در ادامه از آن‌ها جهت بررسی‌های مورد نیاز استفاده گردید.



نمودار ۱- نمودار بررسی افت نسبی انرژی نسبت به Y_c



نمودار ۲- نمودار بررسی افت نسبی انرژی نسبت به Fr_1



نمودار ۳- نمودار بررسی افت نسبی انرژی نسبت به Re_1

به سرریزهای با تعداد پلکانهای ۳ و ۷ بود. علت تجمع اکثر نقاط در حول عدد فرود ۵ به علت محدودیت‌های انجام آزمایش از نظر میزان دبی می‌باشد (نمودار ۲).

بررسی افت نسبی انرژی نسبت به Fr_1 :

در آنالیز ابعادی سرریز پلکانی به پارامتر عدد فرود رسیدیم. بیشترین میزان افت نسبی انرژی در این سرریز در تعداد ۱۵ پله و در حدود عدد فرود ۱۳ به دست آمد. بیشترین عدد فرود به دست آمده مربوط

بررسی افت نسبی انرژی نسبت به R_e :

در آنالیز ابعادی سرریز پلکانی به پارامتر عدد رینولدز رسیدیم، محدوده توزیع اعداد رینولدز بین ۱۰۰۰۰۰ تا ۴۳۰۰۰۰ بود که نشان‌دهنده رژیم متلاطم در این نوع سرریز است. اکثر تجمع در حول عدد ۲۰۰۰۰۰ دیده شد که به علت محدودیت‌های آزمایش از نظر میزان دبی می‌باشد.

بیشترین عدد رینولدز برای تعداد پله ۷ و ۳ و کمترین آن برای تعداد پله ۱۵ مشاهده شد، این در حالی است که بیشترین میزان افت نسبی انرژی در تعداد ۱۵ پله و کمترین میزان افت نسبی برای ۷ و ۳ پله بود.

با توجه به نمودار (۳) مشاهده می‌شود که با افزایش عدد رینولدز، کاهش میزان افت نسبی را داریم. با دقت در نمودار (۳) از تعداد پلکان ۱۵ پله به بعد، کاهش میزان افت نسبی مشاهده می‌شود، اما عدد رینولدز افزایش می‌یابد.

بررسی افت نسبی انرژی نسبت به $\frac{y_c}{h}$:

علت در نظر گرفتن پارامتر $\frac{y_c}{h}$ (نسبت عمق بحرانی به ارتفاع پله)، استفاده از یک کمیت بدون بعد است که البته در آنالیز ابعادی نیز به‌دست آمد. در ضمن، این نسبت فقط برای تعداد پلکان‌هایی که با ارتفاع پله و پیش‌آمدگی یکسان هستند قابل محاسبه است و در سایر موارد نمی‌توان از این نسبت استفاده کرد.

با توجه به نمودار (۴) با افزایش میزان $\frac{y_c}{h}$ میزان افت نسبی در تمام موارد کاهش می‌یابد. با افزایش تعداد پلکان‌ها تا ۱۵ پله، افت نسبی بازای نسبت $\frac{y_c}{h}$ بیشتری رخ می‌دهد، ولی بعد از آن برای ۳۱ پلکان، مجدداً روند مشاهده می‌شود. با توجه به این نمودار

بیشترین افت نسبی برای تعداد پلکان ۱۵ رخ داده است.

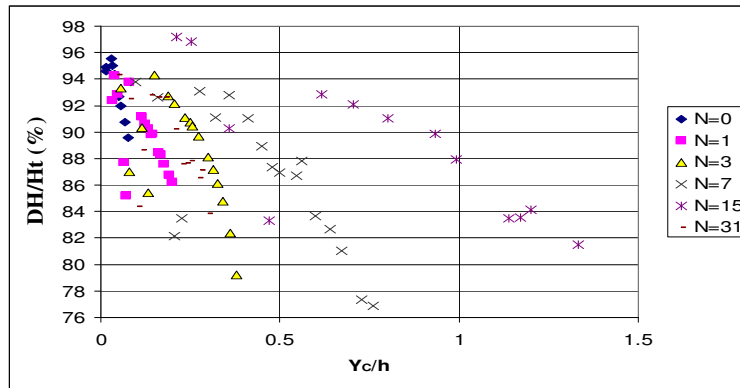
بررسی افت نسبی انرژی نسبت به $\frac{H_{dam}}{y_c}$:

علت در نظر گرفتن پارامتر نسبی $\frac{H_{dam}}{y_c}$ (ارتفاع سرریز به نسبت عمق بحرانی)، استفاده از یک کمیت بدون بعد است که البته این کمیت در آنالیز ابعادی نیز به‌دست آمده است. تراکم نقاط حدود نسبت $\frac{H_{dam}}{y_c}$ از ۱۰ تا ۳۰ بود که علت آن داده برداری‌های بیشتر در دبی‌های بالا یا در واقع در محدوده حداکثر دبی آزمایش می‌باشد، زیرا مقدار H_{dam} ثابت است، پس کاهش نسبت آن به عمق بحرانی، یعنی افزایش عمق بحرانی، که در واقع افزایش دبی را نشان می‌دهد. علاوه بر این در دبی‌های بالا رژیم جریان نیز غیر ریزشی می‌باشد (نمودار ۵).

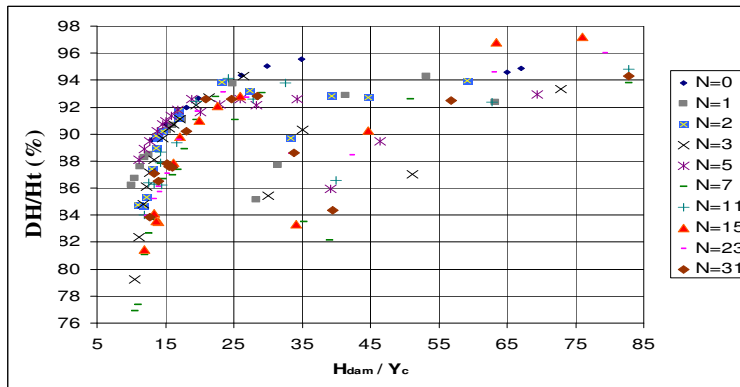
در ادامه، شکل واضح‌تر این محدوده جهت روشن‌تر شدن مباحث در نمودار (۶) آمده است. بیشترین میزان افت نسبی در تعداد پلکان ۱۵ دیده می‌شود که در نسبت $\frac{H_{dam}}{y_c}$ در حدود ۶۰ تا ۷۵ رخ داده است.

با توجه به نمودار (۵) در تعداد پلکان ۲۳ و ۳۱ کاهش میزان افت انرژی نسبی را داریم که این مسئله برای تعداد پلکان ۳۱ به وضوح آشکار است.

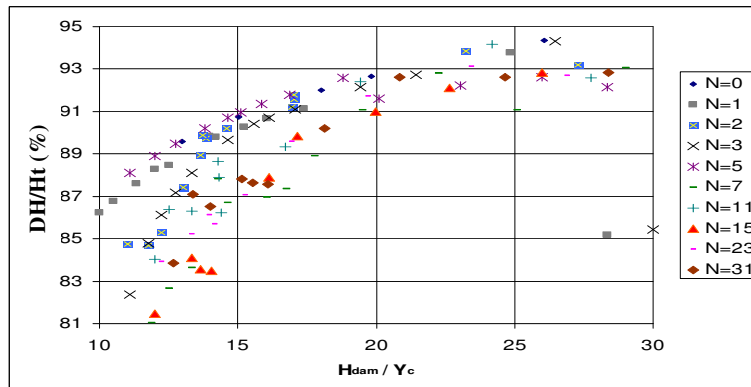
با توجه به نمودار (۶)، که قسمتی از نمودار شکل (۵) را جهت روشن‌تر شدن مطلب ارایه می‌کند، واضح است که برای تمام تعداد پلکان‌ها با افزایش نسبت $\frac{H_{dam}}{y_c}$ مقدار افت نسبی انرژی نیز افزایش می‌یابد.



نمودار ۴- بررسی نسبت افت به $\frac{y_c}{h}$



نمودار ۵- بررسی افت نسبی انرژی نسبت به $\frac{H_{dam}}{y_c}$



نمودار ۶- بررسی افت نسبی انرژی نسبت به $\frac{H_{dam}}{y_c}$

این تحقیق به دنبال تعیین مدل بهینه ژئومتریکی از سرریز پلکانی بودیم که این مدل بهینه در زاویه ۴۵ درجه با در نظر گرفتن مدل هیدرولیکی این سازه، در تعداد ۱۵ پله به دست آمد. بنابراین با توجه به عوامل مؤثر در

نتیجه گیری کلی

با توجه به نمودارهای (۲) تا (۶) و همچنین مشاهدات و بحث‌های انجام شده، بیشترین افت نسبی در مدل‌ها برای تعداد پلکان ۱۵ رخ داده است. البته در

محققین به‌خصوص نتایج کار سلماسی (۱۳۸۲) الف و ب) هم‌چنین سازه‌های ساخته شده از این سرریز در نقاط مختلف، یک بانک اطلاعاتی جهت بهینه‌سازی ژئومتریک این سرریز تشکیل گردید (۲،۳).

با استفاده از برازش معادلات چند متغیره غیر خطی از تعداد ۵۴ مدل ریاضی مورد استفاده ۵۰ مدل تطابق داده شد، که در نهایت گزینه‌های بهینه به‌صورت دو معادله زیر به‌دست آمد:

$$\frac{N}{\alpha} = \frac{\frac{H_{dam}}{y_c}}{4123.8 + 664.9894 \frac{H_{dam}}{y_c} - 3320.37 \sqrt{\frac{H_{dam}}{y_c}}} \quad (۸)$$

$$\frac{h}{l} = 0.935886 + 0.011809 \frac{H_{dam}}{y_c} - \frac{0.36082}{\left(\frac{H_{dam}}{y_c}\right)^2}$$

البته چون هدف اصلی از طرح سرریزهای پلکانی افت انرژی است، پس با ارایه این روابط بایستی بحث افت انرژی نیز مورد توجه قرار گیرد، که به همین علت در ادامه جدول ارتباط بین میزان افت نسبی انرژی و پارامتر بدون بعد $\frac{H_{dam}}{y_c}$ که به‌صورت بررسی منحنی برازش آن است ارایه می‌شود.

در یک سرریز پلکانی با معلوم بودن ارتفاع کل سرریز (H_{dam})، و دبی عبوری از روی سرریز یا عمق بحرانی مربوط به آن (y_c)، می‌توان با استفاده از این روابط نسبت $\frac{N}{\alpha}$ یا $\frac{h}{l}$ را تعیین کرد که این نسبت در واقع همان خصوصیات هندسی سرریز است. با در نظر گرفتن شیب خاص برای سرریز که معمولاً به‌عنوان یک عامل محدودکننده توسط طبیعت و محل ساخت سرریز به ما دیکته می‌شود، می‌توان تعداد پله مناسب و بهینه را برای این سرریز پلکانی تعیین کرد. البته این روابط با توجه به داده‌های خروجی از نرم‌افزار Data fit می‌باشد، که این

بهینه‌سازی ژئومتریک این سرریز و هم‌چنین با توجه به نتایج به‌دست آمده از آنالیز نمودارهای ترسیمی در این تحقیق، پارامترهای مؤثر به قرار زیر بودند:

y_c : عمق بحرانی که نشان‌دهنده دبی است، و از عوامل مؤثر در افت نسبی انرژی در سرریزهای پلکانی می‌باشد.

H_{dam} : ارتفاع سرریز از عوامل مؤثر در افت نسبی انرژی و هم‌چنین از جمله عوامل هندسی در سرریزها می‌باشد.

N : تعداد پلکان، که مؤثر در افت انرژی نسبی و از پارامترهای هندسی در مورد سرریزهای پلکانی می‌باشد.

α : به‌عنوان شیب امتدادی سرریز، که از جمله مسایل هندسی مورد اهمیت در سرریزهای پلکانی می‌باشد.

می‌توان به‌جای پارامترهای N و α از دو پارامتر شکل هندسی پلکان یعنی h و l که به‌ترتیب ارتفاع و پیش آمدگی پلکان هستند، استفاده نمود. برای حذف اثر مقیاس که در مدل‌های مختلف و در سازه‌های ساخته شده متفاوت می‌باشند، با تکنیک بدون‌بعد کردن پارامترها، به پارامترهای بدون بعدی در مدل بهینه‌سازی سرریز پلکانی می‌رسیم.

$\frac{H_{dam}}{y_c}$ - که نسبت ارتفاع کل سرریز به عمق بحرانی جریان (دبی جریان) است.

$\frac{N}{\alpha}$ - که نسبت تعداد پلکان‌ها در سرریز به شیب امتدادی سرریز است.

$\frac{h}{l}$ - که نسبت ارتفاع هر پلکان به پیش آمدگی هر پلکان است و می‌توان از آن به‌جای نسبت $\frac{N}{\alpha}$ استفاده کرد.

با استفاده از این کمیت‌های بدون بعد و نتایج حاصل از این تحقیق و جمع‌آوری اطلاعات سایر

با مقایسه نتایج تطابق به دست آمده از این تحقیق معادله (۸) با $R^2 = ۹۷/۶۶۶۳\%$ و خطای استاندارد $۰/۸۹۲$ معادله مناسب تری نسبت به معادله (۹) با $R^2 = ۴۰/۶۳۴۵\%$ و خطای استاندارد $۰/۴۵۱$ می باشد. لذا کاربرد معادله (۸) جهت انجام بهینه سازی ژئومتریک نسبت به معادله (۹) توصیه می شود.

نرم افزار بهترین برازش با حداقل خطای نسبی و حداکثر R^2 را ارایه می نماید.

نکته کاربردی در استفاده از این روابط این است که اگر نتیجه خروجی برای تعداد پله به صورت غیر صحیح باشد بایستی عدد را رند کرده و با دو حد بالا و پایین آن مورد مطالعه قرار داد، اما می توان با دقت مناسبی تعداد پله به دست آمده را در سرریز به کار برد.

جدول ۲- نتایج حاصل از برازش دو پارامتر $\frac{\Delta H}{H_t}$ و $\frac{H_{dam}}{y_c}$ برای پلکان های مختلف

بدون پله	تعداد پله
$\frac{\Delta H}{H_t} = 1.087 * 10^{-7} \left(\frac{H_{dam}}{y_c}\right)^5 - 2.01 * 10^{-5} \left(\frac{H_{dam}}{y_c}\right)^4 + 0.001517 \left(\frac{H_{dam}}{y_c}\right)^3 - 0.0646 \left(\frac{H_{dam}}{y_c}\right)^2 + 1.654 \left(\frac{H_{dam}}{y_c}\right) + 76.22$	معادله
یک پله	تعداد پله
$\frac{\Delta H}{H_t} = 1.032 * 10^{-6} \left(\frac{H_{dam}}{y_c}\right)^5 - 0.00021 \left(\frac{H_{dam}}{y_c}\right)^4 + 0.0167 \left(\frac{H_{dam}}{y_c}\right)^3 - 0.592 \left(\frac{H_{dam}}{y_c}\right)^2 + 9.4646 \left(\frac{H_{dam}}{y_c}\right) + 35.48$	معادله
دو پله	تعداد پله
$\frac{\Delta H}{H_t} = 1.032 * 10^{-7} \left(\frac{H_{dam}}{y_c}\right)^5 - 0.00015 \left(\frac{H_{dam}}{y_c}\right)^4 + 0.0131 \left(\frac{H_{dam}}{y_c}\right)^3 - 0.541 \left(\frac{H_{dam}}{y_c}\right)^2 + 10.2414 \left(\frac{H_{dam}}{y_c}\right) + 21.131$	معادله
سه پله	تعداد پله
$\frac{\Delta H}{H_t} = 1.829 * 10^{-6} \left(\frac{H_{dam}}{y_c}\right)^5 - 0.00037 \left(\frac{H_{dam}}{y_c}\right)^4 + 0.0284 \left(\frac{H_{dam}}{y_c}\right)^3 - 1.027 \left(\frac{H_{dam}}{y_c}\right)^2 + 17.347 \left(\frac{H_{dam}}{y_c}\right) - 17.31$	معادله
پنج پله	تعداد پله
$\frac{\Delta H}{H_t} = -1.2 * 10^{-6} \left(\frac{H_{dam}}{y_c}\right)^5 - 0.0002 \left(\frac{H_{dam}}{y_c}\right)^4 - 0.012 \left(\frac{H_{dam}}{y_c}\right)^3 + 0.2913 \left(\frac{H_{dam}}{y_c}\right)^2 - 2.576 \left(\frac{H_{dam}}{y_c}\right) + 94.74$	معادله
هفت پله	تعداد پله
$\frac{\Delta H}{H_t} = -1.631 * 10^{-6} \left(\frac{H_{dam}}{y_c}\right)^5 + 0.00028 \left(\frac{H_{dam}}{y_c}\right)^4 - 0.015 \left(\frac{H_{dam}}{y_c}\right)^3 + 0.2637 \left(\frac{H_{dam}}{y_c}\right)^2 + 4.902 \left(\frac{H_{dam}}{y_c}\right) + 57.52$	معادله
یازده پله	تعداد پله
$\frac{\Delta H}{H_t} = -8.17 * 10^{-7} \left(\frac{H_{dam}}{y_c}\right)^5 - 0.00016 \left(\frac{H_{dam}}{y_c}\right)^4 - 0.01 \left(\frac{H_{dam}}{y_c}\right)^3 + 0.2654 \left(\frac{H_{dam}}{y_c}\right)^2 - 1.797 \left(\frac{H_{dam}}{y_c}\right) + 83.42$	معادله
پانزده پله	تعداد پله
$\frac{\Delta H}{H_t} = 1.006 * 10^{-6} \left(\frac{H_{dam}}{y_c}\right)^5 - 0.00024 \left(\frac{H_{dam}}{y_c}\right)^4 + 0.022 \left(\frac{H_{dam}}{y_c}\right)^3 - 0.922 \left(\frac{H_{dam}}{y_c}\right)^2 + 17.5621 \left(\frac{H_{dam}}{y_c}\right) - 31.586$	معادله
بیست و سه پله	تعداد پله
$\frac{\Delta H}{H_t} = 6.83 * 10^{-8} \left(\frac{H_{dam}}{y_c}\right)^5 - 3.52 * 10^{-5} \left(\frac{H_{dam}}{y_c}\right)^4 + 0.005 \left(\frac{H_{dam}}{y_c}\right)^3 - 0.2921 \left(\frac{H_{dam}}{y_c}\right)^2 + 7.1157 \left(\frac{H_{dam}}{y_c}\right) + 31.27$	معادله
سی و یک پله	تعداد پله
$\frac{\Delta H}{H_t} = -1.36 * 10^{-6} \left(\frac{H_{dam}}{y_c}\right)^5 + 0.00026 \left(\frac{H_{dam}}{y_c}\right)^4 - 0.017 \left(\frac{H_{dam}}{y_c}\right)^3 + 0.4324 \left(\frac{H_{dam}}{y_c}\right)^2 - 3.8372 \left(\frac{H_{dam}}{y_c}\right) + 91.83$	معادله

منابع

- ۱- احمدیاری، د. و ا. بیات. ۱۳۷۲. بررسی تأثیر شیب کف پله‌ها در سرریزهای پلکانی. مجله دانشگاه امیر کبیر، سال ۶، شماره ۲۲، ۱۴۶ - ۵۴.
- ۲- سلماسی، ف. ۱۳۸۲. الف. هیدرولیک رژیم ریزشی جریان از روی سرریزهای پلکانی. مجله علمی پژوهشی دانشگاه شهید چمران اهواز، ۳۲-۵۶.
- ۳- سلماسی، ف. ۱۳۸۲. ب. بررسی آزمایشگاهی استهلاك انرژی از روی سرریزهای پلکانی، ششمین کنفرانس بین المللی مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی اصفهان، جلد ۳، هیدرولیک و منابع آب، ۲۷-۳۵.
- ۴- یزدانی، ع. ۱۳۷۷. بررسی تأثیر شیب نمای سرریز پلکانی بر استهلاك انرژی. مجله بین‌المللی علوم مهندسی، سال ۹، شماره ۵، ۱-۱۳.
5. Anonymous. 1961. Aerated flow in open channels. *Journal of Hydraulic Engineering* 87(3): 73-82.
6. Boes, R. M. 2000. Characteristics of skimming flow over stepped spillways. *Journal of Hydraulic Engineering* 125(4):860-863.
7. Chamani, M. R. and Rajaratnam, N. 1999. Characteristics of skimming flow over stepped spillways. *Journal of Hydraulic Engineering* 125(4): 361-368.
8. Chanson, H. 1994a. Comparison of energy dissipation between nappe and skimming flow regimes on stepped chutes. *Journal of Hydraulic Research* 32(2): 213-218.
9. Chanson, H. 1994b. Jet flow on stepped spillways, Discussion. *Journal of Hydraulic Engineering* 20(2):441-442.
10. Chanson, H. 1994c. Hydraulic design of stepped channels and spillways. The University of Queensland. Report No.CH43/94.
11. Christodoulou, G. C. 1993. Energy dissipation on stepped spillways, *Journal of Hydraulic Engineering* 119 (5): 644-649.
12. Rajaratnam, N. 1990. Skimming flow in stepped spillways. *Journal of Hydraulic Engineering* 116(5):587-591.