

بررسی تأثیر پروفیل طولی سرریز پلکانی بر استهلاک انرژی جریان

فرشته ترومیده^۱، رامین فضل‌اولی^{۲*}، علی‌رضا عمادی^۳ و محمد میرناصری^۴

تاریخ دریافت: ۱۳۹۶/۴/۱۶ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۶/۹/۲۸

چکیده

در سرریز پلکانی، پله‌ها می‌توانند به طور قابل ملاحظه‌ای انرژی جریان را کاهش دهند. هدف از انجام این تحقیق، بررسی و مقایسه میزان استهلاک انرژی در سرریزهای پلکانی برای چند مقطع طولی متفاوت با استفاده از مدل فیزیکی است. برای این منظور آزمایش‌ها در کانالی به طول ۱۲ متر و عرض ۰/۵ متر انجام شد. برای انجام تحقیق از چهار مدل سرریز پلکانی با نسبت‌های متفاوت $\frac{h}{L}$ (ارتفاع پله و L طول پله) معادل: ۰/۵، ۰/۶۷، ۱ و ۲ از جنس پلکسی گلاس استفاده شد. مقایسه مدل‌ها نشان داد میزان افت انرژی در $\frac{h}{L} = 1$ بیش‌ترین مقدار را دارد. مشخص شد برای $1 \leq \frac{h}{L}$ با افزایش ارتفاع پله‌ها، افت انرژی افزایش یافته است و به ازای $\frac{V_c}{h}$ ثابت، ضمن افزایش تعداد پله‌ها بر میزان استهلاک انرژی نسبی افزوده می‌شود، با افزایش پارامتر بی‌بعد $\frac{V_c}{h}$ میزان افت انرژی حدود ۵٪ کاهش می‌یابد. در نهایت روابطی با درجه سه برای تخمین افت انرژی نسبی استخراج شد که نتایج حاصل از شاخص‌های آماری حاکی از دقت بالای روابط می‌باشد. نتایج نشان داد روند تغییرات استهلاک انرژی نسبی تحقیق حاضر با روابط ارائه شده توسط چانسون و فراتینو - پیچی نی تقریباً مشابه است.

واژه‌های کلیدی: انرژی جریان، سرریز پلکانی، مدل فیزیکی

مقدمه

یکی از علل تخریب سدها به دلیل طراحی نادرست یا کافی نبودن ظرفیت سرریز می‌باشد. به هنگام مطالعه و طراحی پروژه‌های سدسازی و سایر پروژه‌های مشابه، هیدرولیک سرریز، کانال انتقال و حوضچه آرامش باید مورد توجه قرار گیرد. افت انرژی جریان آب از روی سرریز سدها معمولاً به یکی از سه صورت زیر اتفاق می‌افتد:

- ۱- احداث حوضچه آرامش استاندارد در پایین‌دست سرریز که در آن پرش هیدرولیکی موجب اتلاف انرژی می‌گردد.
- ۲- پرتاب جریان آب با سرعت زیاد از روی بکت جامی شکل^۵ و برخورد با حوضچه استغراق پایین‌دست
- ۳- احداث سرریز پلکانی (سلماسی و همکاران، ۱۳۹۲).

سرریزهای پلکانی از زمان‌های بسیار قدیم (حدود ۳۵۰۰ سال

پیش) مورد استفاده قرار گرفته‌اند (Chanson., 2001). نمونه‌هایی از سدهای ساخته شده اخیر که در آن‌ها بدنه سد و یا سرریز آن به صورت پلکانی به اجرا در آمده، در تحقیقات دیگر محققان اشاره شده است (Zaretsky and Korchevsky., 1997) و (سلماسی و همکاران، ۱۳۸۲).

گرچه آثار و بقایای موجود از سرریزهای پلکانی نشانگر شناخت و کاربرد این گونه سرریزها توسط نیاکان ما می‌باشد، لیکن توجه به این گونه سرریزها و بررسی‌های علمی بر روی آن به لحاظ تأثیر زیاد بر افت انرژی جریان، در سه دهه اخیر اتفاق افتاده است (حیدری ارجلو و همکاران، ۱۳۸۷). در هنگام وقوع سیلاب، جریان آب عبوری از روی سرریز با سرعت زیادی به پایین‌دست می‌رسد. انرژی جنبشی زیاد آب در پایین‌دست می‌تواند موجب فرسایش شدید کف رودخانه، آب‌شستگی زیر پی و یا خوردگی کف دال بتنی سرریز صاف یا حوضچه آرامش و ایجاد پدیده‌ی خللازیی گردد. در سرریز پلکانی، پله‌ها می‌توانند به طرز چشم‌گیری انرژی جریان را کاهش دهند.

میزان افت انرژی قابل ملاحظه ایجاد شده توسط پلکان‌ها باعث می‌گردد تا عمق حفاری حوضچه‌ی آرامش پایین‌دست، طول حوضچه آرامش و ارتفاع دیواره‌های جانبی آن کاهش یافته و از این نظر صرفه‌جویی اقتصادی زیادی در اجرای سد ایجاد گردد (Chanson.,

۱- دانش‌آموخته مقطع کارشناسی ارشد، گروه مهندسی آب، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری
۲- دانشیار، گروه مهندسی آب، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری
۳- دانشیار، گروه مهندسی آب، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری
۴- مربی گروه مهندسی آب، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری
* - نویسنده مسئول: (Email: raminfazl@yahoo.com)

ریزشی معمولاً در دبی‌های کم و پله‌های پهن اتفاق می‌افتد. افزایش جریان در سازه سرریز پلکانی ممکن است نوعی الگوی جریان واسط بین جریان ریزشی و غیرریزشی به وجود آورد که آن را جریان انتقالی می‌نامند. خصوصیات الگوی جریان انتقالی بر روی هر پله و نیز از هر پله به پله بعدی تغییرات طولی عمده‌ای را از خود نشان می‌دهند به نظر می‌رسد که جریان بسیار نامنظم است و ظاهر آن کاملاً با جریان غیرریزشی فرق دارد (فتحی و همکاران، ۱۳۸۸).

در جریان غیرریزشی آب به صورت یک نهر پیوسته و منسجم به سمت سطح پایین پله حرکت می‌کند. جریان آب بر روی پله‌ها به صورت یک لایه جاری می‌شود. لبه‌های خارجی پله‌ها نوعی کف کاذب فرضی یا «شبه‌کف» به وجود می‌آورند (Rajaratnam, 1990). گرداب‌های چرخشی در زیر این «شبه‌کف» قرار دارند. انتقال تنش برشی حاصل از جریان آب عبوری از پله‌ها در زیر کف فرضی باقی خواهد ماند (Amador et al., 2004). در این نوع رژیم، سه منطقه قابل تمایز وجود دارد که عبارتند از: ناحیه با جریان صاف^۷ و بدون هوا، ناحیه در حال گسترش^۸ و ناحیه کاملاً گسترش‌یافته^۹.

جریان در ابتدا و بالای سرریز صاف و بدون هوا است، با رشد لایه مرزی متلاطم و رسیدن به سطح آب، ورود هوا در پله‌های پایین دست صورت گرفته و میزان تلاطم به حداکثر می‌رسد. در صورت طولانی بودن طول سرریز، جریان در پاشنه سرریز به صورت کف‌آلود ظاهر می‌گردد (حیدری ارجلو و همکاران، ۱۳۸۷).

جعفر نیا و موسوی جهرمی (1384) به این نتایج رسیده‌اند که وجود پلکان‌ها تأثیر 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 تأثیر چندانی بر روی افت انرژی نخواهد داشت.

حامدی و همکاران (۱۳۹۰) در تحقیق خود جهت افزایش استهلاک انرژی در رژیم جریان ریزشی سرریزهای پلکانی، به ایجاد شیب معکوس با زوایای مختلف در پله‌ها به روش آزمایشگاهی اقدام کردند و به کمک اعماق و سرعت‌های به‌دست آمده از آزمایش در مقاطع موردنظر، استهلاک انرژی جریان محاسبه شد. نتایج نشانگر تأثیر مناسب شیب معکوس بر افزایش میزان استهلاک انرژی نسبت به حالت پله‌های افقی بوده و هم‌چنین نتایج نشان داد که تغییر زاویه‌ی شیب معکوس اعمال شده روی پله تأثیر چندانی بر افزایش استهلاک انرژی جریان نخواهد داشت و حتی با توجه به خطای آزمایشگاهی می‌توان از تأثیر آن چشم‌پوشی کرد.

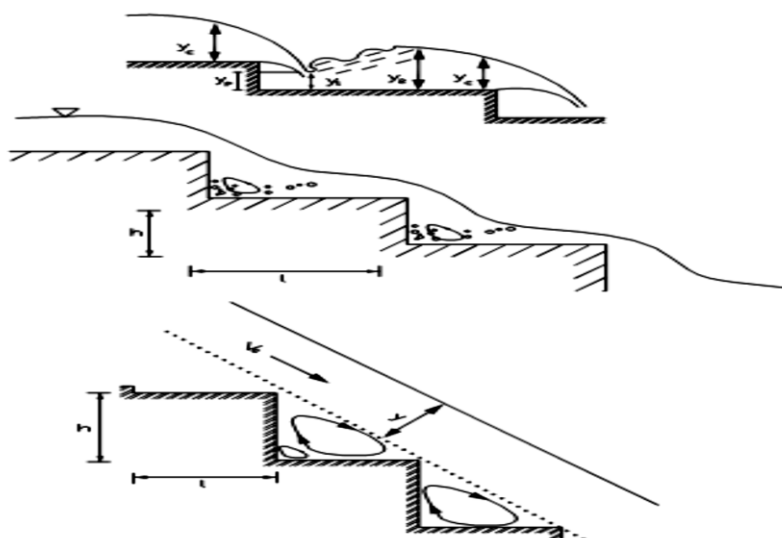
استفاده از این سرریزها بیش‌تر در سدهای خاکی معمول است و بزرگ‌ترین سیلاب محتمل^۱ را معمولاً به‌طور ایمن از تاج خود عبور می‌دهد (فتحی و همکاران، ۱۳۸۸). خطر وقوع خوردگی به دلیل فشارهای منفی در بیش‌تر سرریز سدها محتمل است. در سرریز پلکانی به علت کاهش چشم‌گیر سرعت در مسیر جریان، این پدیده قابل چشم‌پوشی است (Sorensen, 1985). سرریزهای پلکانی از سازه‌های هیدرولیکی هستند که به دلیل فناوری پیشرفته در ساخت سدهای بتن غلتکی^۲، هزینه نسبتاً کم، ساخت سریع و هم‌چنین استهلاک انرژی بالا مورد توجه مهندسان طراح و محققان قرار گرفته است (سلماسی، ۱۳۸۸). کاهش هزینه اجرای سرریز، کوتاه شدن زمان اجرا، بهره‌برداری و نگهداری آسان، کاهش فرسایش در بستر آبراهه پایین دست سرریز پلکانی، افزایش میزان پراکنش انرژی، کاهش هزینه اجرای حوضچه آرامش از جمله مزایای این سرریزها هستند (Chen et al., 2002).

از جمله معایب موجود در این نوع سرریزها به وجود آمدن پدیده کاویتاسیون است که باعث خسارت زیادی در سرریز می‌شود. مهم‌ترین روش‌های مقابله با پدیده کاویتاسیون در سرریزهای پلکانی هوادهی است. تاکنون تحقیقات بسیاری در زمینه‌ی هوادهی و تأثیر ابعاد پله‌ها در سرریزهای پلکانی توسط محققان مربوطه انجام شده است. هوادهی اولین بار در سد گراند گله^۳ در سال ۱۹۶۰ استفاده گردید. از اواسط دهه ۷۰ این سیستم بیش‌تر مطرح شد. از پارامترهای هیدرولیکی و هندسی موثر بر افت انرژی جریان در سرریزهای پلکانی می‌توان به دبی جریان، ورود هوا به داخل جریان، ارتفاع پلکان‌ها، تعداد پلکان‌ها، شیب سرریز و نوع رژیم جریان اشاره نمود. نوع جریان در یک سازه پلکانی به دبی و شکل هندسی پله بستگی دارد. الگوی جریان برای یک شکل هندسی مشخص سازه پلکانی، می‌تواند به صورت جریان ریزشی^۴ با دبی کم، جریان انتقالی^۵ دبی متوسط و جریان غیرریزشی^۶ با دبی زیاد باشد (شکل ۱).

در جریان ریزشی جریان به صورت یک جت از هر پله به پله پایین‌تر برخورد می‌کند. استهلاک انرژی، به واسطه شکست جت در هوا و مخلوط شدن آن در روی پله، همراه با ایجاد پرش هیدرولیکی جزئی انجام می‌شود بنابراین در جریان ریزشی، پله‌ها به عنوان مجموعه‌ای از آبشارها عمل می‌کنند که آب از روی یک پله بر روی پله دیگر ریزش می‌نماید (Chanson et al., 2001). افزایش تعداد پله‌ها با افزایش استهلاک انرژی باقی‌مانده جریان همراه است. جریان

- 1- Flood Maximum Probable
- 2- Roller Compacted Concrete
- 3- Grand Goulee
- 4- Nappe Flow
- 5- Transition Flow
- 6- Skimming Flow

- 7- Clear Water Region
- 8- Developing Region
- 9- Fully Developed Region



شکل ۱ - هندسه عمومی رژیم‌های جریان از روی سرریز پلکانی، از بالا به پایین: رژیم ریزشی، رژیم انتقالی و رژیم غیرریزشی

جریان غیرریزشی بین ۴۸ تا ۶۳ درصد تغییر می‌نماید (Chamani et al., 1999).

چانسون به بررسی تأثیرات ورود هوا بر خصوصیات جریان و نرخ اتلاف انرژی در سرریزهای پلکانی پرداخت و اعلام کرد که حضور هوا در لایه مرزی موجب کاهش تنش برشی بین لایه‌های جریان می‌شود و در هر دو جریان ریزشی و غیرریزشی، به‌کارگیری سرریزهای پلکانی را روش بسیار کارآمدی برای استهلاک انرژی تا ۹۹ درصد بیان کرد. (Chanson., 1993). اوهاتسو و یاسودا پارامتر مقاومت جریان بر روی سرریز پلکانی را مورد بررسی قرار دادند و بیان کردند که مقاومت جریان در دبی‌های بالا بستگی به گرداب‌های تشکیل شده در گوشه پله دارد و حداکثر مقاومت در سرریزهایی با شیب ۱۹ درجه به‌دست آمد (Ohatsu and Yasuda., 1998). فراتینو و پیچینی رابطه‌ی ۱ و ۲ را برای محاسبه افت انرژی نسبی در سرریز پلکانی ارائه داده‌اند:

$$\frac{\Delta H}{H_t} = 1 - \frac{\lambda + \frac{1}{2}(\lambda)^{-2}}{\frac{3}{2} + \frac{P}{y_c}} \quad (1)$$

y_c : عمق بحرانی، P : ارتفاع سرریز و λ یک پارامتر بدون بعد بوده و رابطه‌ی بین y_1 و y_c را نشان می‌دهد (Fratino and Piccinini., 2000):

$$\lambda = \frac{\sqrt{2}}{\frac{3}{2\sqrt{2}} + \sqrt{\frac{h}{y_c} + \frac{3}{2}}} \quad (2)$$

چانسون رابطه‌ی ۳ را جهت تعیین میزان افت انرژی نسبی در سرریزهای پلکانی با پله‌های افقی در رژیم جریان ریزشی ارائه نموده است:

$$\frac{\Delta H}{H_t} = 1 - \frac{0.54\left(\frac{y_c}{h}\right)^{0.275} + \frac{3.43}{2}\left(\frac{y_c}{h}\right)^{-0.55}}{\frac{3}{2} + \frac{P}{y_c}} \quad (3)$$

بینا و همکاران (۱۳۹۲) در بررسی مرزهای رژیم جریان انتقالی به این نتایج رسیدند که این نوع رژیم بستگی به دبی جریان و شیب عمومی سرریز پلکانی دارد. همچنین نتایج نشان داد که تقریباً محدوده تعریفی برای رژیم انتقالی در این پژوهش با محدوده رژیم انتقالی اشاره شده توسط سایر محققین یکسان بوده است. سلماسی و ارونقی (۱۳۹۲) اثر شیب سرریز روی استهلاک انرژی، ۱۲ مدل فیزیکی سرریز پلکانی در شیب‌های مختلف را مورد آزمایش قرار دادند. نتایج نشان داد افزایش شیب سرریز باعث افزایش استهلاک انرژی می‌گردد.

ازهدری (۱۹۹۷) هیدرولیک جریان روی سرریز پلکانی با ۴ شکل مختلف پله و ۳ شیب را بررسی کرد و با توجه به تأثیر شکل پله و شیب‌های مختلف سرریز به ارزیابی فاکتورهای اصطکاک و اتلاف انرژی پرداخت و همچنین شکل بهینه پله را تعیین نمود.

راجاراتنام رابطه‌ای برای معرفی ضریب اصطکاک در سرریزهای پلکانی با رژیم جریان غیرریزشی ارائه نمود. رژیم غیرریزشی در دبی‌های بالا اتفاق افتاده، بنابراین طراحی سرریزهای پلکانی بر اساس رژیم غیرریزشی انجام می‌گیرد (Rajaratnam., 1990). نتایج آزمایش‌های پگرم و همکاران نشان داد که میزان استهلاک انرژی با تخمین تئوری توسط راجاراتنام که این میزان را ۸۹ درصد اعلام کرده بود، تناقض دارد (Pegram et al., 1999). چمنی و راجاراتنام آزمایش‌هایی بر روی سرریز پلکانی با شیب ۵۹ درجه انجام دادند. با اندازه‌گیری غلظت حباب‌های هوای وارد شده به داخل جریان و تأثیر آن در افزایش عمق جریان، محققان مذکور عمق آب خالص (بدون هوا) را محاسبه و سپس با کاربرد آن، مقدار افت انرژی نسبی را تعیین نمودند. نتایج آزمایش‌ها نشان داد که میزان افت انرژی نسبی در رژیم

فیزیکی و تبدیل آن‌ها به تعداد کم‌تری گروه بی‌بعد از همان متغیرها. با استفاده از آنالیز ابعادی می‌توان به انتخاب پارامترهای موثر در مساله مورد مطالعه پرداخت. به‌منظور یافتن رابطه بین عوامل موثر بر استهلاک انرژی سرریز پلکانی، تحلیل ابعادی روی پارامترهای موثر انجام شده است. استهلاک انرژی سرریز را می‌توان به‌صورت یک متغیر وابسته به متغیرهای هندسی، سینماتیکی و دینامیکی رابطه ۵ نوشت:

$$\frac{\Delta H}{H_t} = f(N, g, \rho, \beta, V, \mu, h, L, y_c) \quad (5)$$

g: شتاب ثقل دارای بعد $[LT^{-2}]$ ، y_c : عمق بحرانی دارای بعد $[L]$ ، ρ : جرم مخصوص دارای بعد $[ML^{-3}]$ ، β : شیب وجه بالادست سرریز [بدون بعد]، V: سرعت آب در کانال دارای بعد $[LT^{-1}]$ ، μ : لزجت دینامیکی دارای بعد $[ML^{-1}T^{-1}]$ ، N: تعداد پله [بدون بعد]، h: ارتفاع پله دارای بعد $[L]$ و L: طول پله دارای بعد $[L]$ است.

آنالیز ابعادی بر مبنای روش ماتریسی تابع افت انرژی نسبتی $\frac{\Delta H}{H_t}$ را برای سرریزهای پلکانی می‌توان به صورت رابطه ۶ نشان داد:

$$\frac{\Delta H}{H_t} = f(Re, Fr, \frac{h}{L}, \frac{y_c}{h}, N, \beta) \quad (6)$$

همان‌طور که نشان داده شده است افت انرژی نسبتی تابعی از ۸ پارامتر بدون بعد $Re, Fr, \frac{h}{L}, \beta, \frac{y_c}{h}$ و N می‌باشد.

معرفی مدل‌های مورد استفاده

در این تحقیق، از ۴ مدل سرریز پلکانی با نسبت (h/L) متفاوت که از جنس پلکسی گلاس استفاده شد. مشخصات مدل‌های سرریز پلکانی در جدول ۱ ارائه شده است. با توجه به تفاوت نسبت (h/L) بنابراین تعداد پله‌ها متفاوت می‌باشد. قطعات پلکسی گلاس که دارای ضخامت‌های $0/3$ ، $0/5$ و 1 سانتی‌متر بودند، به‌وسیله لیزر برش داده شد و بعد از چسباندن قطعات پلکسی گلاس به هم برای آب‌بندی مدل از چسب آکواریوم استفاده شد. شکل‌های ۳ و ۴ به ترتیب نما از بالا و طرح شماتیک از مدل سرریز پلکانی مورد مطالعه را نشان می‌دهد. در شکل ۴ جهت حرکت جریان آب از روی سرریز پلکانی نشان داده شده است.

که در رابطه ۳، ΔH : افت انرژی، y_c : عمق بحرانی، h : ارتفاع پله، P: ارتفاع سرریز و H_t : انرژی کل می‌باشند که از رابطه ۴ محاسبه می‌شود (Chanson., 2001):

$$H_t = (P + 3.2 y_c) \quad (4)$$

هدف عمده این تحقیق مقایسه مقادیر استهلاک انرژی و بررسی اثر نسبت ارتفاع پله به طول آن (h/L) در سرریزهای پلکانی با ۱۶ مقطع طولی مختلف به کمک مدل فیزیکی می‌باشد که در ادامه روابطی برای محاسبه افت انرژی نسبتی در این نوع سرریزها ارائه شد و نتایج تحقیق حاضر با نتایج تحقیقات سایر محققین مورد مقایسه قرار گرفت.

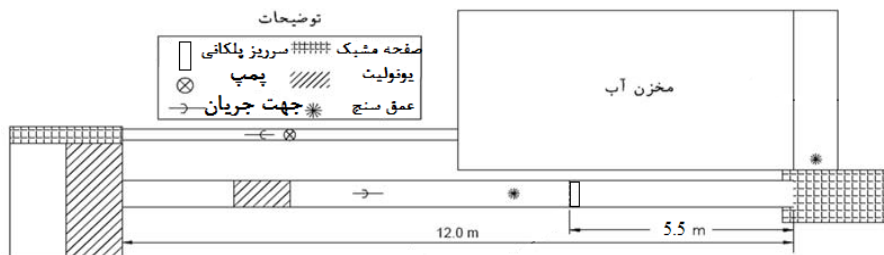
مواد و روش‌ها

معرفی فلوم مورد استفاده جهت انجام آزمایش‌ها

فلوم آزمایشگاهی مورد استفاده در این بخش، دارای سطح مقطع مستطیل شکل با اسکلت فلزی است. ابعاد این فلوم به ترتیب طول، عرض و ارتفاع برابر با 12 ، $0/5$ و $0/7$ متر است که دیواره‌ها از جنس شیشه شفاف به‌منظور مشاهده جریان از دو طرف می‌باشد (شکل ۲). در قسمت ورودی این فلوم مخزنی وجود دارد که آشفتگی جریان آبی که از پمپ‌های گریز از مرکز وارد می‌شود را می‌گیرد و جریان آرامی را وارد فلوم آزمایشگاهی می‌کند. دبی فلوم از سه پمپ با مجموع دبی 60 لیتر بر ثانیه تامین و با سرریز مثلی در خروجی اندازه‌گیری شد. قبل از شروع آزمایش‌ها، سرریز مثلی به‌صورت حجمی واسنجی و رابطه دبی - اشل برای محاسبه دبی به‌دست آمد. صفحه‌های یونولیت برای کاهش موج‌های سطحی در 6 متری بالادست مدل قرار داده شد. در انتهای فلوم نیز، جریان بر روی صفحه‌های مشبک که برای کاهش انرژی جنبشی آب در بالادست سرریز مثلی قرار دارد، به‌صورت آبشار آزاد ریزش می‌کند سپس، آب وارد یک مخزن مکعب مستطیل می‌شود و از قسمت کف این مخزن پمپاژ می‌گردد و در ادامه وارد لوله شده و سیستم آب مجدداً به گردش در می‌آید.

آنالیز ابعادی

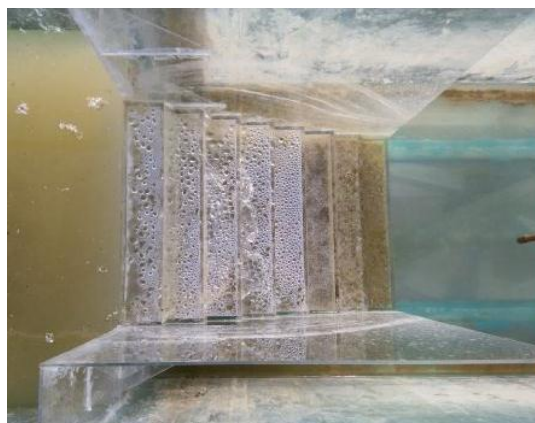
آنالیز ابعادی عبارت است از کاهش تعداد متغیرهای مؤثر در پدیده



شکل ۲- سیستم گردش آب در فلوم مورد استفاده

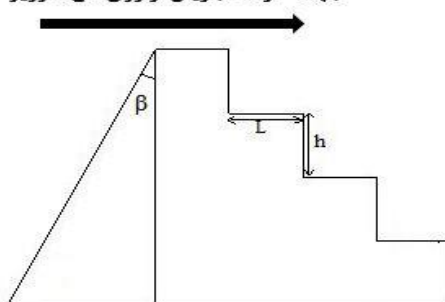
جدول ۱- مشخصات مدل‌های فیزیکی ساخته شده

مدل	عرض تاج سرریز B (سانتی‌متر)	ارتفاع سرریز p (سانتی‌متر)	ارتفاع پله‌ها h (سانتی‌متر)	طول افقی پله‌ها L (سانتی‌متر)	$\frac{h}{L}$	تعداد پله N	شیب وجه بالا دست β (درجه)
۱	۳۰	۲۰	۴/۰	۲	۲/۰۰	۵	بدون شیب، ۳۰، ۴۵ و ۶۰
۲	۳۰	۲۰	۲/۵	۵	۰/۵۰	۸	بدون شیب، ۳۰، ۴۵ و ۶۰
۳	۳۰	۲۰	۴/۰	۶	۰/۶۷	۵	بدون شیب، ۳۰، ۴۵ و ۶۰
۴	۳۰	۲۰	۵/۰	۵	۱/۰۰	۴	بدون شیب، ۳۰، ۴۵ و ۶۰



شکل ۳- نما از بالای سرریز پلکانی (مدل ۲)

جهت حرکت جریان از روی تاج سرریز



شکل ۴- نمای شماتیک پروفیل طولی یک سرریز پلکانی با شیب وجه بالادست (β)

روش انجام آزمایش‌ها

عرض سرریز پلکانی ساخته شده در این تحقیق با توجه به آزمایشات انجام شده، و برآورد بهتر نتایج ۳۰ سانتی‌متر در نظر گرفته شد. هر سرریز پلکانی در قسمت تاج سرریز از طرفین با استفاده از صفحه‌های پلکسی گلاس با عرض ۱۰ و ارتفاع ۴۵ سانتی‌متر که به صورت عمود بر مسیر جریان نصب گردید مهار شد همچنین هر سرریز در طول کل پله‌های مربوط به آن سرریز با توجه به طول کل سازه در امتداد جریان با استفاده از صفحاتی با ارتفاع ۴۵ سانتی‌متر از جنس پلکسی گلاس از طرفین مهار شد. لازم به ذکر است که به منظور کاهش اثر کشش سطحی، ارتفاع آب بالادست سازه بر روی

اندازه‌گیری دبی و عمق جریان

دبی فلوم توسط سه پمپ که دارای حداکثر دبی ۶۰ لیتر بر ثانیه می‌باشد، تامین و به وسیله یک سرریز مثلثی ۹۰ درجه در خروجی که قبلاً به صورت حجمی واسنجی شده بود، اندازه‌گیری گردید. برای محاسبه دبی، عمق آب بالای سرریز مثلثی به وسیله یک عمق‌سنج نقطه‌ای با دقت $\pm 0/1$ میلی‌متر قرائت و در رابطه دبی - اشل جاگذاری شد. جهت اندازه‌گیری عمق آب در بالادست سرریز پلکانی (H)، از عمق‌سنج با دقت $\pm 0/1$ میلی‌متر در فاصله یک متری بالادست سازه، استفاده شد.

بحث و نتایج

در هر یک از مدل‌های سرریز پلکانی در شیب وجه بالادست مختلف، مقدار دبی آستانه که در آن جریان ریزشی به جریان غیرریزشی تبدیل می‌شود در جدول ۲ ارائه شده است. برای تشخیص نوع جریان ریزشی و غیرریزشی در سرریزهای پلکانی از رابطه ۹ استفاده شد. با توجه به جدول ۲ با افزایش شیب وجه بالادست، میزان دبی آستانه کاهش یافته است. در شکل ۵ نمودار بین شیب وجه بالادست و دبی آستانه جریان ریزشی و غیرریزشی در هر ۴ مدل سرریز پلکانی ارائه شده است. با توجه به شکل ۵ بیش‌ترین مقدار دبی آستانه در مدل ۱ مشاهده شد. سرریز پلکانی با شیب وجه بالادست ۶۰ درجه کم‌ترین میزان دبی آستانه و سرریز پلکانی بدون شیب بیش‌ترین میزان دبی آستانه را دارد.

بررسی تأثیر پارامتر بی بعد $\frac{h}{L}$ بر افت انرژی

در این قسمت تأثیر پارامتر بی بعد $\frac{h}{L}$ بر افت انرژی نسبی بررسی شد. با توجه به شکل ۶ مشاهده می‌شود که میزان افت انرژی در $\frac{h}{L} = 1$ بیش‌ترین مقدار را دارد و در $\frac{h}{L} = 0.5$ میزان افت انرژی کم‌ترین مقدار را دارد، به عبارتی دیگر می‌توان این‌گونه بیان کرد، وقتی طول پله با ارتفاع پله برابر باشد میزان افت انرژی بیش‌ترین مقدار را خواهد داشت.

تاج سرریز برای عمق‌های بیش‌تر از ۳ سانتی‌متر قرائت شد.

در این مطالعه منظور از استهلاک انرژی عبارت از اختلاف انرژی در بالادست سرریز و انرژی در پایین دست آن (پنجه) بوده و با استفاده از رابطه ۷ محاسبه شد:

$$\Delta H = H_t - H_1 = (1.5 Y_C + P) - \left[Y_1 + \frac{V_1^2}{2g} \right] \quad (7)$$

همچنین افت انرژی نسبی $\frac{\Delta H}{H_t}$ به صورت رابطه ۸ تعریف شد:

$$\frac{\Delta H}{H_t} = \frac{H_t - H_1}{H_t} = 1 - \frac{H_1}{H_t} = 1 - \frac{\left[Y_1 + \frac{V_1^2}{2g} \right]}{(1.5 Y_C + P)} \quad (8)$$

در رابطه‌های فوق ΔH (m): افت انرژی، H_t (m): انرژی کل در بالادست سرریز، H_1 (m): انرژی در پنجه سرریز، P (m): ارتفاع کل سرریز، h (m): ارتفاع پله، Y_C (m) و Y_1 (m): به ترتیب عمق بحرانی و عمق اولیه بعد از سرریز و V_1 (m/s): سرعت متوسط اولیه می‌باشند (رسایی و همکاران، ۱۳۸۸).

نحوه‌ی تشخیص نوع جریان در انواع سرریز پلکانی

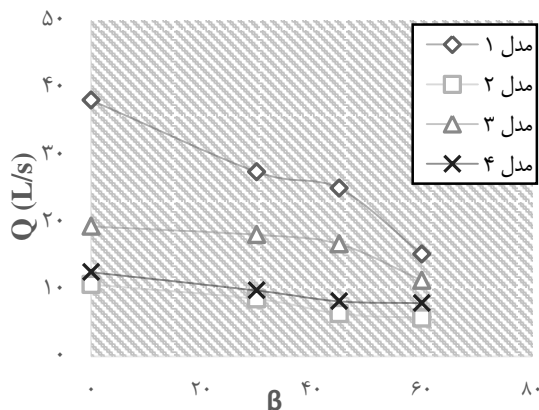
چانسون رابطه ۹ را برای تشخیص نوع جریان در سرریزهای پلکانی ارائه نمود. در این رابطه Y_C (m) عمق بحرانی مورد نیاز برای شروع جریان غیرریزشی، h (m) ارتفاع پله و L (m) طول پله می‌باشد (Chanson., 1994).

$$\frac{Y_C}{h} = 1.057 - 0.465 \left(\frac{h}{L} \right) \quad (9)$$

در صورتی که نسبت عمق بحرانی به ارتفاع پله $\left(\frac{Y_C}{h} \right)$ اندازه‌گیری شده از رابطه ۹ بزرگ‌تر باشد جریان غیرریزشی و اگر نسبت عمق بحرانی به ارتفاع پله $\left(\frac{Y_C}{h} \right)$ اندازه‌گیری شده از رابطه ۹ بزرگ‌تر نباشد جریان ریزشی خواهد بود.

جدول ۲ - مقدار دبی آستانه به منظور تمایز جریان ریزشی از غیرریزشی به ازای شیب وجه بالادست مختلف

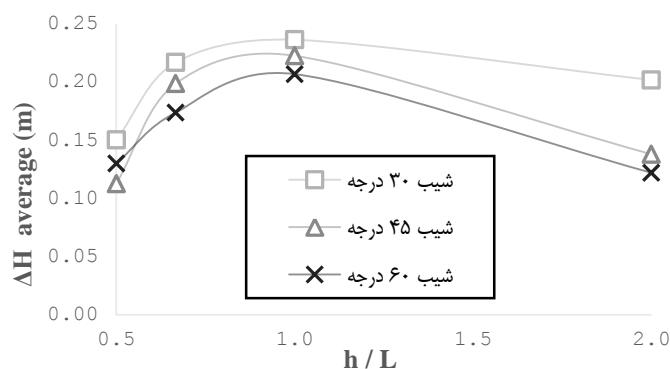
مدل	$\frac{h}{L}$	شیب وجه بالادست β (درجه)	Q (L/s)
۱	۲/۰۰	بدون شیب	۳۸/۱۴
		۳۰	۲۷/۴۸
		۴۵	۲۵/۰۲
		۶۰	۱۵/۲۳
۲	۰/۵۰	بدون شیب	۱۰/۷۲
		۳۰	۸/۵۸
		۴۵	۶/۳۷
		۶۰	۵/۷۳
۳	۰/۶۷	بدون شیب	۱۹/۳۶
		۳۰	۱۸/۱۲
		۴۵	۱۶/۷۳
		۶۰	۱۱/۳۲
۴	۱/۰۰	بدون شیب	۱۲/۵۴
		۳۰	۹/۸۳
		۴۵	۸/۲۲
		۶۰	۷/۹۵



شکل ۵- رابطه بین مقدار دبی آستانه جریان ریزشی و غیرریزشی با شیب وجه بالادست در ۴ مدل سرریز پلکانی

میزان افت انرژی نسبی در سرریزهای با شیب تند بیش تر از سرریزهای با شیب ملایم است. یعنی در شیب ۳۰ درجه که شیب تندتر است استهلاك انرژی بیش تر از شیب های دیگر است.

همچنین نتایج نشان داد که برای $\frac{h}{L} \leq 1$ با افزایش نسبت $\frac{h}{L}$ میزان افت انرژی افزایش می یابد، به عبارتی وقتی ارتفاع پله کم تر از طول پله باشد با نزدیک شدن ارتفاع پله به طول پله میزان افت انرژی افزایش می یابد. همچنین با توجه به شکل ۶ مشاهده می شود که



شکل ۶- رابطه میان پارامتر $\frac{h}{L}$ با متوسط افت انرژی در ۳ شیب وجه بالادست سرریز پلکانی

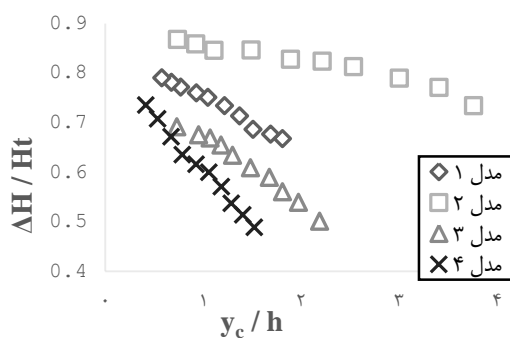
یعنی آن که با محاسبه نسبت بدون بعد $\frac{y_c}{h}$ می توان با دقت بسیار خوبی، میزان افت انرژی نسبی را در سازه های مورد مطالعه محاسبه نمود.

مقایسه نتایج تحقیق حاضر با تحقیق چانسون و فراتینو- پیچی نی

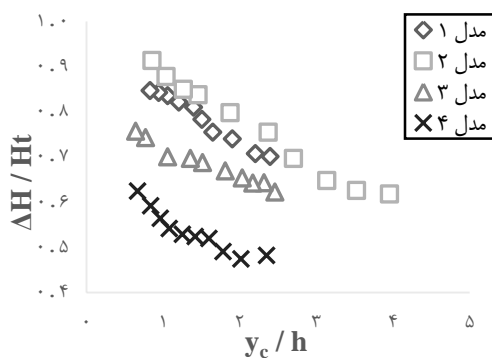
در این قسمت تأثیر پارامتر بی بعد $\frac{y_c}{h}$ (نسبت عمق بحرانی به ارتفاع پلکان) در افت انرژی نسبی در هر ۴ مدل مورد بررسی قرار گرفت و با رابطه ارایه شده توسط چانسون (رابطه ۳) مقایسه شد که نتایج در شکل ۱۱ ارایه شده است. مطابق شکل ۱۱ روند تغییرات استهلاك انرژی نسبی، نسبتا مشابه بود و با افزایش دبی، استهلاك انرژی نسبی نیز کاهش یافت.

بررسی تأثیر پارامتر بی بعد $\frac{y_c}{h}$ بر افت انرژی نسبی

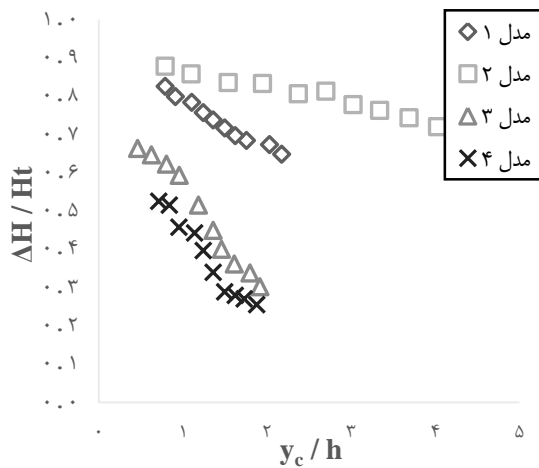
به دلیل کاربرد گسترده پارامترهای بی بعد در نمودارها و روابط همبستگی، تأثیر پارامتر بی بعد $\frac{y_c}{h}$ (نسبت عمق بحرانی به ارتفاع پلکان) بر میزان افت انرژی نسبی مورد بررسی قرار گرفت. با توجه به شکل های ۷ تا ۱۰ می توان ملاحظه نمود با افزایش $\frac{y_c}{h}$ استهلاك انرژی نسبی کاهش می یابد، به تعبیر دیگر افزایش دبی، سبب کاهش اثر زبری پله ها در استهلاك انرژی می شود. شکل ۱۰ بیانگر این واقعیت است که به ازای $\frac{y_c}{h}$ ثابت، با افزایش تعداد پله ها بر میزان استهلاك انرژی نسبی افزوده می شود. در نهایت در جدول ۳، بهترین روابط با بزرگترین مقادیر ضریب تبیین (R^2) برای سرریزهای پلکانی با مقادیر ۲ و ۱، $\frac{h}{L} = 0.5, 0.67, 1$ به منظور محاسبه میزان افت انرژی ارایه شد. بررسی آماری نتایج نشان داد که کلیه روابط استخراج شده (در جدول ۳) در سطح آماری ۹۵ درصد معنی دار شده اند و این



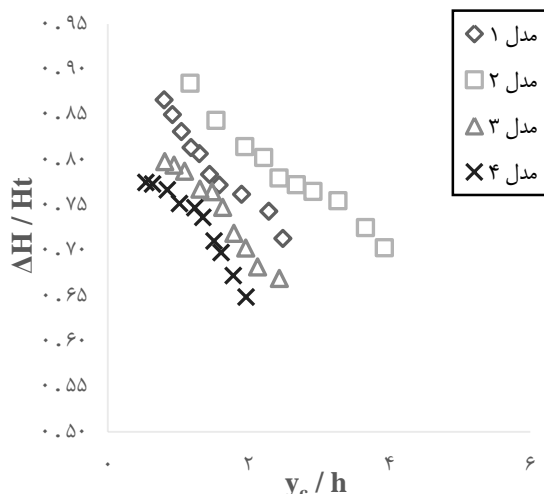
شکل ۷- تأثیر پارامتر $\frac{y_c}{h}$ بر میزان افت انرژی نسبی در مدل سرریز پلکانی با شیب وجه بالادست ۳۰ درجه



شکل ۸- تأثیر پارامتر $\frac{y_c}{h}$ در میزان افت انرژی نسبی در مدل سرریز پلکانی با شیب بالادست ۴۵ درجه



شکل ۹- تأثیر پارامتر $\frac{y_c}{h}$ بر میزان افت انرژی نسبی در مدل سرریز پلکانی با شیب وجه بالادست ۶۰ درجه



شکل ۱۰- پارامتر $\frac{y_c}{h}$ بر میزان افت انرژی نسبی در ۴ مدل سرریز پلکانی بدون شیب وجه بالادست

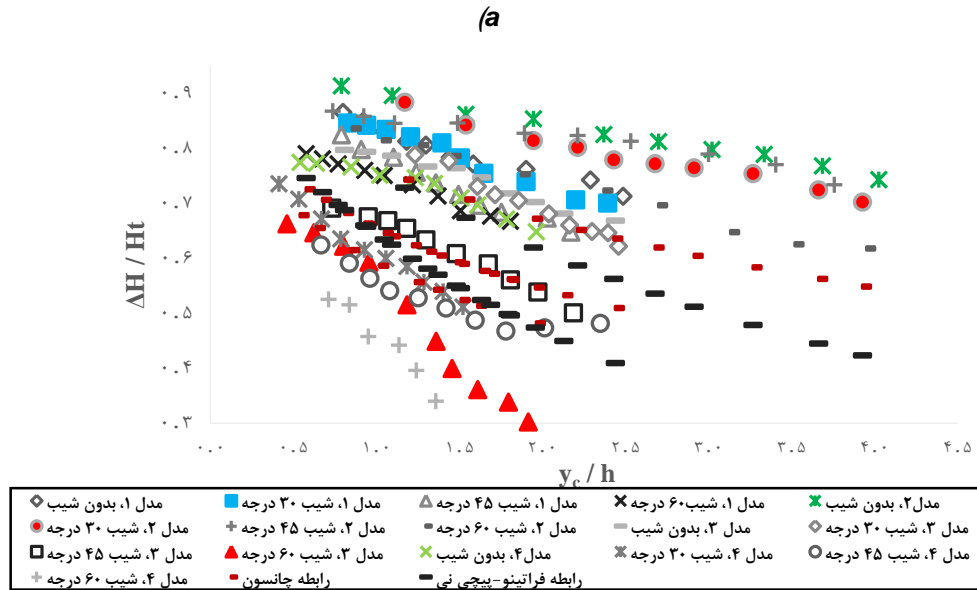
جدول ۳- روابط با بهترین ضریب رگرسیونی جهت محاسبه میزان افت انرژی در سرریزهای پلکانی

مدل	شیب وجه بالادست β (درجه)	رابطه	R^2
۱	بدون شیب	$-.1 \left(\frac{y_c}{h}\right) + .05/4 \left(\frac{y_c}{h}\right)^2 - .025 \left(\frac{y_c}{h}\right)^3 - .1 \frac{\Delta H}{H_t} =$	۰/۹۹
۲		$-.1 \left(\frac{y_c}{h}\right) + 31/13 \left(\frac{y_c}{h}\right)^2 - .09 \left(\frac{y_c}{h}\right)^3 - .1 \frac{\Delta H}{H_t} =$	۰/۹۹
۳		$-.1 \left(\frac{y_c}{h}\right) + 37/6929 \left(\frac{y_c}{h}\right)^2 + .1 \left(\frac{y_c}{h}\right)^3 + 2 \frac{\Delta H}{H_t} =$	۰/۹۹
۴		$-.1 \left(\frac{y_c}{h}\right) - .1 \left(\frac{y_c}{h}\right)^2 + .6 \left(\frac{y_c}{h}\right)^3 + .67/76 \frac{\Delta H}{H_t} =$	۰/۹۹
۱	۳۰	$-.1 \left(\frac{y_c}{h}\right)^3 - .32/10 \left(\frac{y_c}{h}\right)^2 - .11/10 \left(\frac{y_c}{h}\right)^1 + .4/9 \frac{\Delta H}{H_t} =$	۰/۹۸
۲		$-.1 \left(\frac{y_c}{h}\right) + .8/9 \left(\frac{y_c}{h}\right)^2 - .1 \left(\frac{y_c}{h}\right)^3 - .1 \frac{\Delta H}{H_t} =$	۰/۹۸
۳		$-.1 \left(\frac{y_c}{h}\right)^3 - 22/ \left(\frac{y_c}{h}\right)^2 + 83/ \left(\frac{y_c}{h}\right)^1 + 67/49 \frac{\Delta H}{H_t} =$	۰/۹۹
۴		$-.1 \left(\frac{y_c}{h}\right)^3 - 34/1 \left(\frac{y_c}{h}\right)^2 + 26/ \left(\frac{y_c}{h}\right)^1 + .1/18 \frac{\Delta H}{H_t} =$	۰/۹۸
۱	۴۵	$-.1 \left(\frac{y_c}{h}\right)^3 - .7/10 \left(\frac{y_c}{h}\right)^2 + .4/10 \left(\frac{y_c}{h}\right)^1 + 33/17 \frac{\Delta H}{H_t} =$	۰/۹۹
۲		$-.1 \left(\frac{y_c}{h}\right)^3 - .1/10 \left(\frac{y_c}{h}\right)^2 - .5/10 \left(\frac{y_c}{h}\right)^1 + .1/94 \frac{\Delta H}{H_t} =$	۰/۹۹
۳		$-.1/89 \left(\frac{y_c}{h}\right) - .1/31 \left(\frac{y_c}{h}\right)^2 + .1/16 \left(\frac{y_c}{h}\right)^3 - .1/3 \frac{\Delta H}{H_t} =$	۰/۹۸
۴		$-.1 \left(\frac{y_c}{h}\right) + 39/82 \left(\frac{y_c}{h}\right)^2 - .1/16 \left(\frac{y_c}{h}\right)^3 - .1/3 \frac{\Delta H}{H_t} =$	۰/۹۷
۱	۶۰	$-.1 \left(\frac{y_c}{h}\right)^3 - .5/10 \left(\frac{y_c}{h}\right)^2 + 21/10 \left(\frac{y_c}{h}\right)^1 + 15/76 \frac{\Delta H}{H_t} =$	۰/۹۹
۲		$-.1 \left(\frac{y_c}{h}\right) - .4/10 \left(\frac{y_c}{h}\right)^2 + .9/2 \left(\frac{y_c}{h}\right)^3 - .1/10 \frac{\Delta H}{H_t} =$	۰/۹۹
۳		$-.1 \left(\frac{y_c}{h}\right)^3 - .2/10 \left(\frac{y_c}{h}\right)^2 + 13/10 \left(\frac{y_c}{h}\right)^1 + .9/68 \frac{\Delta H}{H_t} =$	۰/۹۹
۴		$-.1 \left(\frac{y_c}{h}\right) + 52/9 \left(\frac{y_c}{h}\right)^2 - .1/33 \left(\frac{y_c}{h}\right)^3 - .1/11 \frac{\Delta H}{H_t} =$	۰/۹۹

بین جریان چرخشی زیر هر پله و جریان غیرریزشی است. در شکل ۱۱ به وضوح اثر شیب‌های تندتر در افزایش استهلاک انرژی، نسبت به شیب‌های دیگر مشاهده می‌گردد. احتمالاً اثر ناشی از شیب تند

نتیجه دیگر این که افزایش شیب، باعث افزایش استهلاک انرژی می‌گردد، در واقع هرچه شیب وجه بالادست تندتر باشد استهلاک انرژی نسبی افزایش می‌یابد و علت آن افزایش اندازه حرکت تبادلی

مربوط به تلاطم ایجاد شده، سرعت جریان بیش تر بر روی هر پله (در حالت رژیم ریزشی) می باشد.



شکل ۱۱- مقایسه بین استهلاك انرژی نسبی نتایج تحقیق حاضر با تحقیق جانسون و فراتینو - پیچی نی

فهرست علائم

h	ارتفاع پله (m)
P	ارتفاع کل سرریز (m)
ΔH	افت انرژی (m)
H ₁	انرژی در پنجه سرریز (m)
H _{max}	انرژی کل (m)
H _t	انرژی کل در بالادست سرریز (m)
N	تعداد پله
Q	دبی و دبی آستانه جریان ریزشی و غیرریزشی (m ³ s ⁻¹)
V ₁	سرعت متوسط اولیه (ms ⁻¹)
g	شتاب ثقل (ms ⁻²)
L	طول افقی پله ها (m)
B	عرض تاج سرریز (m)
Y _C	عمق بحرانی (m)
Y ₁	عمق اولیه بعد از سرریز (m)

علائم یونانی

β	شیب وجه بالا دست سرریز (degree)
α	شیب وجه پایین دست سرریز (degree)

نتیجه گیری

برای بررسی اثر شیب سرریز روی استهلاك انرژی، ۴ مدل فیزیکی از سرریزهای پلکانی با شیبهای وجه بالادست ۳۰، ۴۵ و ۶۰ درجه ساخته و مورد آزمایش قرار گرفت. نتایج این پژوهش نشان داد که:

- بیشترین مقدار دبی آستانه جریان ریزشی و غیرریزشی در مدل ۱ مشاهده شد. سرریز پلکانی با شیب وجه بالادست ۶۰ درجه کمترین میزان دبی آستانه و سرریز پلکانی بدون شیب بیشترین میزان دبی آستانه را دارد.

- برای $\frac{h}{L} \leq 1$ با افزایش نسبت $\frac{h}{L}$ میزان افت انرژی افزایش می یابد و یا به بیان دیگر می توان گفت که برای $\frac{h}{L} \leq 1$ با افزایش ارتفاع پله ها، افت انرژی افزایش خواهد یافت.

- به ازای $\frac{Y_C}{h}$ ثابت، ضمن افزایش تعداد پله ها بر میزان افت انرژی نسبی افزوده شد.

- با افزایش پارامتر بی بعد $\frac{Y_C}{h}$ میزان افت انرژی کاهش یافت.
- افزایش شیب سرریز باعث افزایش استهلاك انرژی می گردد که علت آن افزایش اندازه حرکت تبدالی بین جریان چرخشی زیر هر پله و جریان غیرریزشی است.

منابع

- Characterization of the flow field in a stepped Spillway by PIV. Proc. 12th Symposium., Applications Laser to Fluid Mechanics, Lisbon, Portugal, July 12-15, 10 p.
- Azhdary, M. 1997. The hydraulics of flow on stepped ogee-profile spillways. P.H.D thesis, Ottawa, Canada, 76 p.
- Chamani, M.R and Rajaratnam, N. 1999. Characteristics of skimming flow over stepped spillways. Journal of Hydraulic Engineering. ASCE. 125. 4: 361-368.
- Chanson, H. 1993. Stepped Spillway Flows and Air Entrainment. Department of Civil Engineering. The University of Queensland, St Lucia QLD 4072, Australia, Canadian Journal of Civil Engineering. 20.3: 422-435.
- Chanson, H. 1994. Comparison of energy dissipation between nappe and skimming flow regimes on stepped chutes. Journal of Hydraulic Research. 32.2: 213-218.
- Chanson, H. 2001. The hydraulics of stepped chutes and spillway. Library of Congress Cataloging in Publication Data, the Netherlands, 231 p.
- Chanson, H and Toombes, L. 2001. Experimental investigation of air entrainment in transition and skimming flows down a stepped chute. Department of civil Engineering. The University of Queensland. Research . 158: 1-73.
- Chen, Q., Dai, G and Iiu, H. 2002. Volume of fluid model for turbulence numerical simulation of stepped spillway overflow, Journal of hydraulic Engineering. 128.7: 683-688.
- Fratino, U and Piccini, A. 2000. Dissipation efficiency of stepped spillways. Proceedings of the International workshop on Hydraulics of Stepped spillways. IAHR, Zurich, Switzerland, 110 p.
- Ohatsu, I and Yasuda, Y. 1998. Flow resistance of skimming flow in stepped channels. Depth of Civil Engineering. Ninon. 130.9: 860-869.
- Pegram, G.G.S., Officer, A.K and Mottram, S.R. 1999. Hydraulic of skimming flow on modeled stepped spillways. Journal of Hydraulic Engineering. ASCE 125.5: 500-509.
- Rajaratnam, N. 1990. Skimming flow in stepped spillways. Journal of hydraulic Engineering. 116.4: 587-591.
- Sorensen, R.M. 1985. Stepped model investigation. Journal of Hydraulic Engineering. 111.12: 1461-1472.
- Zaretsky, Y and Korchevsky, V. 1997. Kowsar dam project (Tang-e-Duk). Joint Final Report. International Institute of Geomechanics and Hydrostructures, Moscow, Russia, 150 p.
- بینام، سلماسی، ف و موسوی جهرمی، س. ح. ۱۳۹۲. تعیین مرزهای هیدرولیکی رژیم‌های جریان ریزشی، غیرریزشی و انتقالی در سرریزهای پلکانی با استفاده از مدل فیزیکی، نشریه دانش آب و خاک. ۲۳: ۳: ۶۵-۵۷.
- جعفری‌نبار، و 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، دانشگاه کرمان، ص ۸.
- حامدی، ا، منصوری، ع،، ملک‌محمدی، ا،، کتابدار، م و رحمانیان، ح. ۱۳۹۰. بررسی آزمایشگاهی استهلاك انرژی در رژیم جریان تیغه‌ای سرریزهای پلکانی با پله‌های شیب‌دار. ششمین کنگره ملی مهندسی عمران، دانشگاه سمنان، ۸ ص.
- حیدری‌ارجلوس، و موسوی جهرمی، س. ح و فرازمنده، س. ۱۳۸۷. بررسی هیدرولیک جریان در سرریزهای پلکانی با استفاده از مدل‌های فیزیکی. دومین همایش ملی مدیریت شبکه‌های آبیاری و زهکشی، دانشگاه شهید چمران اهواز، دانشکده مهندسی علوم آب، ۸ ص.
- رسایی، م، شیر افروس، ع و نادری‌راد، ا. ۱۳۸۸. بررسی و مقایسه میزان استهلاك انرژی در سرریزهای پلکانی قبل و بعد از پرش هیدرولیکی با استفاده از مدل آزمایشگاهی. همایش ملی علوم آب، خاک، گیاه و مکانیزاسیون کشاورزی، دانشگاه دزفول، ۶ ص.
- سلماسی، ف. ۱۳۸۸. اثر تعداد پله‌ها بر استهلاك انرژی در سرریزهای پله‌ای بر اساس روش جدید طراحی. مجله دانش آب و خاک. ۱۹: ۳۸-۲۷.
- سلماسی، ف، بینام و موسوی جهرمی، س. ح. ۱۳۸۲. بررسی آزمایشگاهی افت انرژی جریان از روی سرریزهای پلکانی. ششمین کنفرانس بین‌المللی مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی اصفهان، ۹ ص.
- سلماسی، ف و ارونقی، ه. ۱۳۹۲. اثر شیب در استهلاك انرژی جریان از روی سرریز پلکانی. مهندسی آب و محیط زیست ایران. ۱. ۱: ۴۷-۵۶.
- فتحی، ا، بینام و موسوی جهرمی، ح. ۱۳۸۸. بررسی تاثیر شیب تند آب پایین‌دست تاج بر محل هواگیری طبیعی در جریان غیرریزشی در سرریز پلکانی. نشریه آب و خاک (علوم و صنایع کشاورزی). ۲۳: ۳: ۱۶۷-۱۵۶.
- Amador, A., Van der Graaf, G., Sanchez- Juny, M., Dolz, J., Sanchez- Tembleque, F and Puertas, J. 2004.

Investigation the Effect of Longitudinal Profile of Stepped Spillway on Flow Energy Dissipation

F. Taroumideh¹, R. Fazloul^{2*}, A. R. Emadi,³ M. Mirnaseri⁴

Received: Jun.27, 2017

Accepted: Dec.19, 2017

Abstract

In a stepped spillway, the steps can considerably reduce the flow energy. The purpose of this study was to investigate and comparing the amounts of energy dissipation in stepped spillways with different longitudinal profiles using physical models. For this purpose the experiments were done in a channel with 12 meters of length, 0.5 meter of width and 0.8 meter of height. For doing this research, the stepped spillways that had plexi glass gender with 4 ratios of $\frac{h}{L} = 0.5, 0.67, 1$ and 2 was designed and constructed. The results showed that the amount of energy dissipation in $\frac{h}{L} = 1$ have maximum value, in the other words, when step length and step height be equal causes energy dissipation will be more. The results showed for $\frac{h}{L} \leq 1$, increasing height of steps has been increase the energy dissipation. In a constant $\frac{V_c}{h}$, the increase in the number of steps Increases relative energy dissipation and increasing dimensionless parameter $\frac{V_c}{h}$, reduces energy dissipation almost 5 %. Finally, third degree equations for relative energy dissipation extracted, that the calculated statistical parameters indicate high accuracy of equivalents. The results showed relative energy dissipation in our study was in agreement with Chanson equations and Fratino-Piccinni equations.

Keywords: Flow Energy, Physical Model, Stepped Spillway

1- M.Sc. Graduated, Water Engineering Department, Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University
2- Associate Professor, Water Engineering Department, Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University
3- Associate Professor, Water Engineering Department, Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University
4- Lecturer, Water Engineering Department, Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University
(*- Corresponding Author Email: raminfazl@yahoo.com)