

# بررسی تأثیر شیب کف پله ها در سرریزهای پلکانی

داود احمدیار

عضو هیأت علمی دانشکده عمران

دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

حبیب ... بیات

استادیار دانشکده عمران دانشگاه صنعتی امیرکبیر

## چکیده:

یک سری مطالعات مدل فیزیکی، بر روی سرریز پلکانی انجام شده است تا اثرات تغییر شیب کف پله ها در میزان استهلاک انرژی جریان بر روی این سرریزها و عوامل مؤثر در افت انرژی بررسی گردند. با انتخاب چهار گزینه از ارتفاع پله ها به عنوان متغیر اول و تغییر چهار زاویه کف پله ها به عنوان متغیر دوم، مجموعاً ۱۶ گزینه مورد آزمایش قرار گرفته است. نتایج حاصل از مطالعات عینی، حاکی از آنست که با افزایش زاویه کف پله در هر یک از گزینه های مفروض از ارتفاع پله ها، میزان استهلاک انرژی کاهش می یابد. همچنین با استفاده از تحلیل ابعادی و نتایج آزمایش ها، تأثیر پارامترهای مختلف در افت انرژی بررسی گردیده است. در همین راستا ضریب کسش شکل در سرریزهای پلکانی مورد بررسی قرار گرفته و عوامل مؤثر در آن محاسبه شده است. بررسی آماری نشان می دهد که عدد فرود در بین متغیرهای دیگر، بیشترین ضریب همبستگی را با ضریب کسش شکل دارد، لذا رابطه ای برای محاسبه ضریب کسش شکل بر اساس عدد فرود جریان در سرریزهای پلکانی به دست آمده است. آزمایش های این تحقیق در آزمایشگاه هیدرولیک دانشگاه صنعتی امیرکبیر انجام گرفته است.

## AN INVESTIGATION INTO THE EFFECTS OF STEP'S BOTTOM SLOPE ON STEPPED SPILLWAYS

DAVOOD. AHMADYAR, MS.c.

Lecturer of civil Engineering Dept.  
K.N.Toosi Univ. of Technology

Habib o Bayat, Ph.D.

Assistant Professor of Civil Engineering Dept.  
Amirkabir Univ. of Technology

## ABSTRACT:

A Physical model investigation was conducted to evaluate the effects of step's bottom stope changes on the energy dissipation characteristics of this type of spillways and to assess the affecting parameters on energy losses. By means of four selected alternatives of steps heights as the first variable and by adapting four bottom slope angles as the second variable, a series of sixteen experiments were carried out.

Observation indicate that the higher the bottom slope angle for any given step height, the lower the energy dissipation would be.

More over, the effect of different factors on energy loss was studied using a dimensional analysis method. In this regard, the so called form drag coefficient on stepped spillways was assessed and related parameters computed. Statistical analysis showed that amongst different parameters, the Froude number has the greatest bearing on the drag coefficient, and an expression for estimating drag coefficient, hence, was developed using Froude number as a basis. Experimental studies of the present project were conducted at the Hydraulic Laboratory of the Amirkabir University of Technology.

## (۱) مقدمه

ایالات متحده اشاره کرد. مطالعات مدلی سرریزهای اخیرالذکر که بعد از سال ۱۹۸۰ صورت گرفته، مبین آن است که استهلاک انرژی در این سرریزها، حدود ۷۵ درصد بیشتر از سرریز غیر پلکانی اوجی می باشد. همچنین ابعاد حوضچه آرامش مورد نیاز به مقدار نصف طول متعارف کاهش یافته و انرژی جنبشی جریان در پنجه سرریز کاهشی به میزان ۸۴ درصد را نشان می دهد (۵).

علیرغم بررسیهای متعدد انجام یافته بر روی سرریز پلکانی، هنوز عوامل مؤثر بر استهلاک انرژی و ملاک طراحی هیدرولیکی برای بهینه کردن ابعاد پله های سرریز معرفی نشده است، لذا به منظور تحقق اهداف فوق بررسی مدل فیزیکی (هیدرولیکی) این سرریزها امری ضروری است، که تحقیق حاضر گامی در این جهت می باشد.

## (۲) تئوری

با توجه به متغیرهای بسیاری که در افت انرژی جریان بر روی سرریز پلکانی دخالت دارند، شکل کلی معادله ابعادی قابل برقراری بین عوامل مذکور، با استفاده از روش باکینگهام و تشکیل گروههای بی بعد به صورت زیر در می آید:

$$\frac{E_L}{E_1} = f\left(\frac{P}{k}, \frac{H}{k}, \frac{\lambda}{k}, S, \frac{D}{k}, Re, Fr\right) \quad (1)$$

در رابطه فوق  $\frac{\lambda}{k}$  فاصله نسبی  $\frac{D}{k}$  عمق نسبی  $Re$  عدد رینولدز

به منظور استهلاک انرژی جریان عبوری از سرریز سدها و در نتیجه جلوگیری از آسیبهای احتمالی در پایین دست سد، معمولاً از سازه های مختلفی از قبیل باکت پرتابی، حوضچه های آرامش استاندارد و ... استفاده می شود.

سرریز پلکانی (stepped Spillway) یکی دیگر از روشهای مناسب به لحاظ فنی و اقتصادی می باشد که در آن قسمت عمده انرژی جریان در اثر مقاومت هیدرولیکی عناصر زیر (پله ها) بر روی سطح پلکانی شده سرریز مستهلک می شود لذا می توان از این سرریز جهت اتلاف انرژی جریان بدون بهره گرفتن از حوضچه آرامش به طور کلی و یا بهره گیری از یک حوضچه آرامش کوچک استفاده کرد. پروفیل طولی این نوع سرریز، از اصلاح پروفیل سرریزهای آبریز (ogee) استاندارد (WES) به دست می آید، به طوری که در پایین دست نقطه تماس، پله هایی با ابعاد یکسان در داخل پروفیل سرریز به گونه ای قرار می گیرند که نوک پله ها بر پروفیل طولی سرریز منطبق باشند. همچنین برای اجتناب از تأثیر هیدرولیکی پله های اصلی بر شرایط جریان در بالا دست نقطه تماس، چند پله با ابعاد کوچکتر از پله های اصلی به عنوان پله های تبدیل (Transition Steps) در نظر گرفته می شوند (۴).

سرریز پلکانی طرحی جدید نیست و تاکنون در چندین سد، سرریز پلکانی مورد استفاده قرار گرفته است، که می توان به سرریز برخی از سدهای قدیمی ایران با عمر متجاوز از ۷۰ سال و یا سدهای Upper Still Water و Monksville در

خواهد بود. بنابراین نیروی کشش شکل (Form Drag Force) روی هر پله به صورت زیر نوشته می شود:

$$F_B = C_D K B \frac{\rho V^2}{2} \quad (5)$$

از تقسیم کردن نیروی کشش ( $F_B$ ) بر سطحی که توسط هر پله اشغال می شود ( $\lambda_B$ ) تنش برشی بر حسب کشش شکل به دست می آید:

$$\tau''_b = \frac{F_B}{\lambda_B} = C_D \frac{k}{\lambda} \frac{\rho V^2}{2} \quad (6)$$

از طرفی تنش برشی متوسط در بستر کانال به صورت زیر نوشته می شود:

$$\tau_b = \gamma R_b \sin \alpha \quad (7)$$

که در آن  $R_b$  شعاع هیدرولیکی بستر می باشد و با رابطه زیر مشخص می شود:

$$R_b = D \left( 1 - \frac{2}{B} \left( \frac{V n_w}{S^{1/2}} \right)^{3/2} \right) \quad (8)$$

از تساوی روابط (6) و (7) داریم:

$$\gamma R_b \sin \alpha = C_D \frac{k}{\lambda} \frac{\rho V^2}{2} \quad (9)$$

با قرار دادن  $\gamma = \rho g$  و ساده کردن رابطه فوق داریم:

$$C_D = \left( \frac{2g R_b \sin \alpha}{V^2} \right) \frac{\lambda}{k} \quad (10)$$

### ۳) طراحی و ساخت مدل هیدرولیکی

با انتخاب چهار گزینه از ارتفاع پله های ۲۰، ۲۴، ۳۰ و ۴۰ میلیمتر و تغییر چهار زاویه کف پله ۱۰، ۱۵، ۲۰ و ۲۵ درجه، ۱۶ گزینه مدل قسمتی (Segmental Model) از بخش پلکانی سرریز ساخته و به قسمت غیر پلکانی متصل و مورد آزمایش قرار گرفت. هر گزینه شامل پله های انتقالی و اصلی می باشد. پله های انتقالی که قسمتی از پروفیل پایین دست تاج تا نقطه شروع شوت را دربر می گیرد، به منظور ایجاد یک منطقه انتقالی و بدون تلاطم بین بخش صاف و بخش پلکانی

از طرفی بررسیهای نوری (۲) نشان داده است که ضریب کشش شکل  $C_D$  (Form Drag) برای پله های واقع در شیب تند به صورت تابعی از عوامل زیر نوشته می شود:

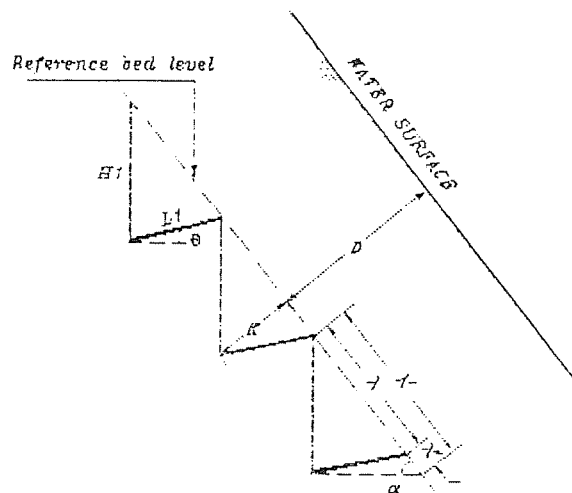
$$C_D = f\left(S, \frac{D}{K}, Re, Fr\right) \quad (2)$$

با مقایسه روابط (۱) و (۲) می توان رابطه عمومی افت انرژی در سرریز پلکانی را به صورت زیر نوشت:

$$\frac{E_L}{E_1} = f\left(\frac{P}{k}, \frac{H}{k}, \frac{\lambda}{k}, C_D\right) \quad (3)$$

با توجه به شکل (۱) و استفاده از روابط مثلثاتی و اینکه  $k = H_1 \cos \alpha$  می باشد، پارامتر فاصله نسبی  $\frac{\lambda}{k}$  به صورت زیر به دست می آید:

$$\frac{\lambda}{k} = \frac{\cos \theta}{\cos \alpha \sin(\alpha + \theta)} \quad (4)$$



شکل (۱) مشخصات پله ها

در کانالهای با شیب تند و عناصر دوبعدی مثلثی، مقاومت برشی بر حسب کشش شکل  $(\tau''_b)$  به طور تقریب مساوی تنش برشی کل  $(\tau_b)$  فرض می گردد. که البته بر اساس نتایج بررسیهای سیر (Sayre) و آلبرتسون (Albertson) (۲) خطای حاصله از این فرض به دلیل ناچیز بودن مقاومت ناشی از اصطکاک (Friction Drag Resistance) قابل صرف نظر

که از نقطه تماس تا پنجه سرریز ادامه دارد (پله‌های اصلی) می‌باشد (شکل ۲). مقیاس مدل  $\frac{1}{25}$  در نظر گرفته شده است که با توجه به توصیه‌های USBR در مورد مقیاس مدل سرریزها، مقدار مناسبی است. از آنجا که جریان بر روی سرریزها، جریان با سطح آزاد است، پس نیروی غالب، نیروی ثقل می‌باشد و قانون فرود حاکم خواهد بود، لذا نسبت‌های تشابه بین مدل و نمونه اصلی به شرح زیر نوشته می‌شود:

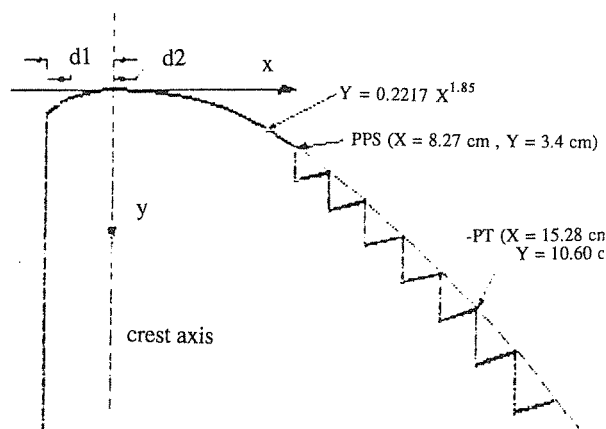
$$V_r = (L_r)^{1/2} = \frac{1}{5} \quad (11)$$

$$q_r = (L_r)^{3/2} = \frac{1}{125} \quad (12)$$

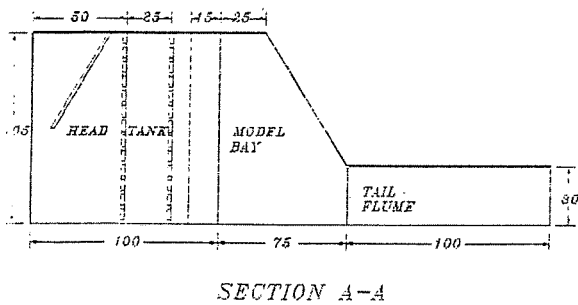
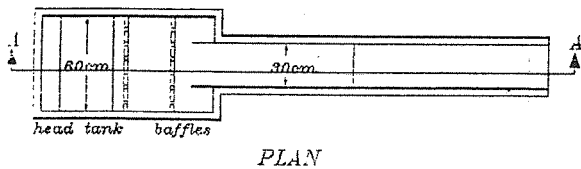
عرض فلوم سرریز ۳۰ سانتیمتر در نظر گرفته شده است که این مقدار با توجه به حداقل توصیه USBR (۱۵Cm) مناسب می‌باشد. حداکثر بده مورد نیاز در مدل ۲۲ لیتر در ثانیه می‌باشد که توسط یک پمپ سانترفوز با ظرفیت اسمی ۳۳ لیتر در ثانیه تأمین می‌شود. شکل (۳) پلان و مقطع مدل سرریز را نشان می‌دهد.

#### ۴) روش انجام آزمایشها

در هر گزین از پله‌های با کف شیب‌دار، نحوه انجام آزمایشها بدین صورت بود که بده مورد نیاز مدل از حداقل (حدود ۱/۷ لیتر در ثانیه) شروع و تا حداکثر (حدود ۲۲ لیتر در ثانیه) تغییر داده می‌شد. اندازه‌گیری بده جریان توسط یک



شکل (۲) پروفیل سرریز پلکانی



شکل (۳) پلان و مقطع فلوم مدل سرریز (کلیه اندازه‌ها به سانتیمتر)

سرریز مثلثی با زاویه رأس قائمه با ضریب بده  $C_d = 0.618$  صورت می‌گرفت، سپس به منظور محاسبه افت انرژی در بالا دست سرریز پلکانی، بلندای آب بر روی تاج سرریز توسط لیمینومتر قرائت می‌شد.

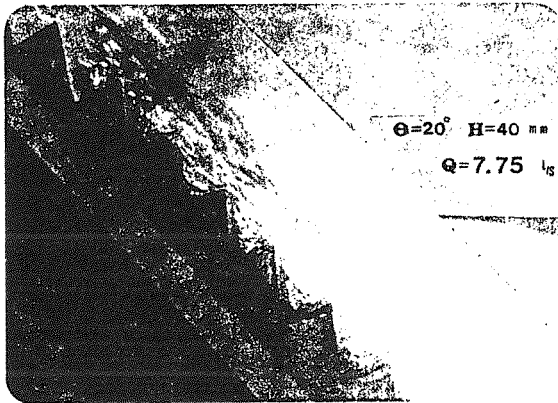
پس از این مرحله، عمق جریان در پنجه سرریز به منظور محاسبه انرژی در پایاب سرریز اندازه‌گیری می‌گردید. همچنین عمق مؤثر جریان بر روی پله‌ها و حداقل بلندای آبی که جریان شبه صاف را بر روی سرریز پلکانی ایجاد می‌کند، ثبت می‌گردید. به علت تشابه نتایج به دست آمده از گزینه‌های مختلف از ارتفاع پله‌ها و اختصار مطالب، فقط نتایج آزمایشهای مربوط به گزینه‌های ارتفاع ۳۰ میلیمتر در جدول (۱۰) ذکر می‌گردد.

#### ۵) تجزیه و تحلیل نتایج

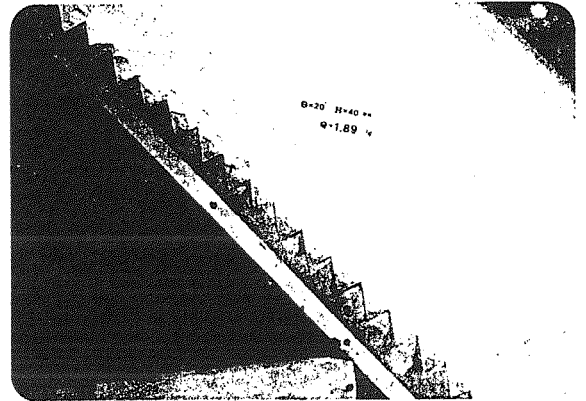
در آزمایشهای انجام شده، دو نوع جریان بر روی سرریز پلکانی مشاهده گردیده است. در بده‌های نسبتاً کم جریان ورقه‌ای (Nappe flow) رخ می‌دهد که در آن آب به صورت یک جریان فورانی سقوطی از پله‌ای بر روی پله پایین‌تر ریخته و در زیر ورقه جریان فورانی، هوای محبوس و در کف پله‌ها به ارتفاع کمی آب وجود داشت. با افزایش بده جریان مرحله‌ای

پارامتر بدون بعد  $\frac{y_c}{H_1}$  نشان می‌دهد. برای بررسی پارامترهای مؤثر در افت انرژی جریان بر روی سرریز پلکانی، پارامترهای هیدرولیکی لازم محاسبه و در جداول (۲) و (۳) ذکر شده است.

فرا می‌رسید که در آن گردابه‌های چرخان (Roller Vortex) در فضای بین نوک پله‌ها تشکیل می‌گردید. در این حالت جریان شبه صاف (skimming flow) رخ می‌دهد (شکل‌های ۴ و ۵). نمودار (۱) موقعیت شروع جریان شبه صاف را بر حسب



شکل (۵) گردابه‌های ایجاد شده در لبه و بین پله‌ها



شکل (۴) شروع جریان شبه صاف

جدول (۱) نتایج حاصل از آزمایش گزینه‌های مربوط به ارتفاع پله ۳۰ میلی‌متر

عمق جریان در پنجه سرریز =  $d$       بار آب سرریز =  $H$       بده جریان =  $Q$       زاویه کف پله =  $\theta$

شماره آزمایش	$\theta = 0.0^\circ$			$\theta = 10^\circ$			$\theta = 15^\circ$			$\theta = 20^\circ$			$\theta = 25^\circ$		
	Q L/S	H mm	d mm	Q L/S	H mm	d mm	Q L/S	H mm	d mm	Q L/S	H mm	d mm	Q L/S	H mm	d mm
۱	۱/۷۳	۲۲/۱	۹/۵	۱/۹۹	۲۴	۶	۱/۹۶	۲۲/۲	۶	۱/۷۹	۲۱/۵	۵	۲/۰۳	۲۳/۸	۵
۲	۳/۲۱	۳۳/۶	۱۰/۲	۴/۰۶	۳۶/۵	۱۰/۵	۴/۲۸	۳۷	۱۰	۳/۹	۳۵/۵	۹	۴/۲۸	۳۷	۹
۳	۵/۵۶	۴۵/۹	۱۴	۵/۶	۴۴	۱۳/۵	۵/۸۶	۴۵/۴	۱۳	۵/۸۶	۴۴/۸	۱۲/۵	۶/۱۳	۴۶/۳	۱۲
۴	۸/۵۱	۵۸/۷	۲۰	۸/۰۶	۵۵/۷	۱۷	۸/۰۶	۵۵/۷	۱۶/۵	۷/۷۵	۵۳	۱۵	۸/۰۶	۵۴/۶	۱۵
۵	۱۰/۴۶	۶۵/۹	۲۲	۱۰/۱۴	۶۲/۹	۲۰/۵	۹/۷۸	۶۲/۴	۲۰	۱۰/۰۵	۶۲/۵	۱۹	۱۰/۳۳	۶۳/۶	۱۸/۵
۶	۱۲/۶۶	۷۴/۱	۲۵	۱۱/۶۹	۶۸/۶	۲۲/۵	۱۱/۸۹	۷۰/۸	۲۲	۱۱/۸۹	۶۹/۲	۲۰/۵	۱۲/۱	۶۸/۸	۲۰
۷	۱۴/۸۱	۸۰/۹	۲۸	۱۳/۵۹	۷۵/۲	۲۵	۱۳/۹۲	۷۸/۲	۲۵	۱۳/۳۷	۷۳/۴	۲۲/۵	۱۳/۵۹	۷۳/۵	۲۲
۸	۱۶/۴۹	۸۵/۸	۳۰	۱۵/۹	۸۱/۸	۲۸	۱۵/۶۶	۸۵/۲	۲۷	۱۵/۷۸	۸۱	۲۶	۱۵/۷۸	۸۱/۵	۲۵/۵
۹	۱۷/۹۷	۹۰/۱	۳۲	۱۷/۶۵	۸۸/۶	۳۰/۵	۱۷/۳۹	۹۰/۵	۳۰	۱۷/۶۵	۸۹/۳	۲۹	۱۷/۴	۸۶/۲	۲۷/۵
۱۰	۲۰/۶۶	۹۶/۲	۳۵	۱۹/۲۴	۹۴	۳۲/۵	۱۹/۳۸	۹۵/۴	۳۲/۵	۱۹/۲۴	۹۱/۸	۳۱/۵	۱۸/۹۷	۹۱/۴	۳۰
۱۱	۲۲/۵۸	۱۰۱/۹	۳۷	۲۰/۷۷	۱۰۲/۶	۳۵	۲۰/۹۱	۱۰۲/۲	۳۴	۲۱/۴۹	۹۹/۶	۳۳	۲۰/۹۲	۹۶/۶	۳۲

جدول (۲) پارامترهای هیدرولیکی محاسبه شده در گزینه های مربوط به ارتفاع پله ۳۰ میلیمتر

شماره آزمایش	$\theta = 0.0^\circ$			$\theta = 10^\circ$			$\theta = 15^\circ$			$\theta = 20^\circ$			$\theta = 25^\circ$		
	$\frac{H}{k}$	$V$ m/S	$\%E_L$	$\frac{H}{k}$	$V$ m/S	$\%E_L$	$\frac{H}{k}$	$V$ m/S	$\%E_L$	$\frac{H}{k}$	$V$ m/S	$\%E_L$	$\frac{H}{k}$	$V$ m/S	$\%E_L$
۱	۱/۲۵	۰/۶۱	۹۶/۶	۱/۳	۱/۱	۹۲/۱۳	۱/۲۶	۱/۰۹	۹۳/۳۵	۱/۱۶	۱/۱۹	۹۱/۰۶	۱/۲۹	۱/۱۳	۹۱/۷۸
۲	۱/۸۲	۱/۰۸	۹۲/۱	۱/۹۸	۱/۲۹	۸۹/۱۵	۲	۱/۴۳	۸۷	۱/۹۲	۱/۴۴	۸۶/۸۶	۲	۱/۵۸	۸۴/۳۸
۳	۲/۴۹	۱/۲۲	۸۸/۴	۲/۴۸	۱/۲۸	۸۷/۴۴	۲/۴۶	۱/۵	۸۵/۵۴	۲/۴۵	۱/۵۶	۸۴/۵۲	۲/۵۱	۱/۷	۸۱/۹۴
۴	۳/۱۸	۱/۴۲	۸۶/۳	۳/۰۲	۱/۵۸	۸۳/۹۳	۳/۰۲	۱/۶۳	۸۲/۰۳	۲/۸۷	۱/۷۲	۸۱/۴۱	۲/۹۶	۱/۷۹	۸۰/۱۱
۵	۳/۵۷	۱/۵۸	۸۳/۵	۳/۴۱	۱/۶۵	۸۲/۲۹	۳/۳۸	۱/۶۳	۸۲/۸۱	۳/۳۹	۱/۷۶	۸۰/۳۸	۳/۴۵	۱/۸۶	۷۸/۴۳
۶	۴/۰۲	۱/۶۹	۸۱/۴	۳/۷۲	۱/۷۳	۸۰/۷۵	۳/۸۴	۱/۸	۷۹/۴۷	۳/۷۵	۱/۹۲	۷۶/۷۹	۳/۷۳	۲/۰۲	۷۵/۰۳
۷	۴/۳۸	۱/۷۶	۷۹/۸	۴/۰۷	۱/۸۱	۷۹/۰۲	۴/۲۴	۱/۸۶	۷۸/۲۱	۳/۹۹	۱/۹۸	۷۵/۶۸	۳/۹۸	۲/۰۶	۷۲/۳۳
۸	۴/۶۵	۱/۸۳	۷۸/۳	۴/۴۳	۱/۸۹	۷۷/۱۱	۴/۶۲	۱/۹۳	۷۶/۵۴	۴/۳۹	۲/۰۲	۷۴/۴۸	۴/۴۲	۲/۰۶	۷۲/۷۲
۹	۴/۸۸	۱/۸۷	۷۷/۴	۴/۸	۱/۹۳	۷۶/۳۲	۴/۹	۱/۹۳	۷۶/۳۴	۴/۸۴	۲/۰۳	۷۴/۲۷	۴/۶۷	۲/۱۱	۷۲/۵۷
۱۰	۵/۲۱	۱/۹۷	۷۵/۱	۴/۹۹	۱/۹۷	۷۵/۲۷	۵/۱۷	۱/۹۹	۷۴/۹۷	۴/۹۷	۲/۰۴	۷۳/۹۲	۴/۹۵	۲/۱۱	۷۲/۵
۱۱	۵/۵۲	۲/۰۳	۷۲/۱۸	۵/۵۶	۱/۹۸	۷۵/۱۸	۵/۵۴	۲/۰۵	۷۳/۶۷	۵/۴	۲/۱۷	۷۰/۹۴	۵/۱۳	۲/۱۸	۷۰/۷۶

جدول (۳) پارامترهای هیدرولیکی محاسبه شده برای بررسی ضریب گشش شکل در گزینه های ارتفاع ۳۰ میلیمتر

$\theta$ درجه	$Q$ L/S	$DCos\alpha$ m	$V$ m/S	$R_b$ m	$C_D$	$\frac{D}{k}$	$R_{z_2}$	$F_L$
۱۰	۷/۵	۰/۰۱۲	۱/۳۱	۰/۰۱۸۸	۰/۳۰۷	۱/۰۳	۲۶۶۸	۳/۸۱۸
۱۰	۱۰	۰/۰۱۲	۱/۴۵	۰/۰۲۱۷	۰/۳۰۳	۱/۲۲	۳۹۹/۵	۳/۹۱۳
۱۰	۱۲/۵	۰/۰۱۶	۱/۶	۰/۰۲۵۶	۰/۲۸۰	۱/۲۱	۴۰۹۶۰	۴/۰۳۸
۱۰	۱۵	۰/۰۱۸	۱/۷۲	۰/۰۲۸	۰/۲۶۵	۱/۵۷	۴۸ ۱۶۰	۴/۰۹۳
۱۰	۱۷/۵	۰/۰۱۹	۱/۸۸	۰/۰۳۰۴	۰/۲۲۱	۱/۶۸	۵۷۱۵۲	۴/۲۵۴
۱۰	۲۰	۰/۰۲۱	۱/۹۶	۰/۰۳۳۳	۰/۲۲۳	۱/۸۴	۶۵۲۶۸	۴/۳۱۸
۱۵	۵	۰/۰۰۹	۱/۱۱	۰/۰۱۴۹	۰/۳۱۹	۰/۸۱	۱۰۵۳۹	۳/۷۲۶
۱۵	۷/۵	۰/۰۱۱	۱/۴	۰/۰۱۷۸	۰/۲۴۰	۰/۹۷	۲۴۷۴۲	۴/۲۵۳
۱۵	۱۰	۰/۰۱۳	۱/۵۱	۰/۰۲۱۷	۰/۲۵۱	۱/۱۹	۳۲۷۶۷	۴/۲۲۸
۱۵	۱۲/۵	۰/۰۱۵	۱/۶۷	۰/۰۲۴۶	۰/۲۳۳	۱/۳۵	۴۱۰۸۲	۴/۲۵۳
۱۵	۱۵	۰/۰۱۷	۱/۷۸	۰/۰۲۷	۰/۲۲۵	۱/۵۱	۴۸۰۶۰	۴/۳۵۹
۱۵	۱۷/۵	۰/۰۱۸	۱/۹۴	۰/۰۲۹۴	۰/۲۰۶	۱/۶۲	۵۷۰۳۶	۴/۳۱۷
۱۵	۲۰	۰/۰۲	۲/۰۸	۰/۰۳۱	۰/۱۸۹	۱/۷۳	۶۴۴۸۰	۴/۶۹۶
۲۰	۵	۰/۰۰۸	۱/۲۸	۰/۰۱۲۹	۰/۱۹۶	۰/۷	۱۶۵۱۲	۴/۲۰۱
۲۰	۷/۵	۰/۰۱۱	۱/۴	۰/۰۱۷۸	۰/۲۲۷	۰/۹۷	۲۴۷۴۲	۴/۲۵۳
۲۰	۱۰	۰/۰۱۳	۱/۵۹	۰/۰۲۰۷	۰/۲۰۳	۱/۱۴	۳۲۹۱۳	۴/۴۵۲
۲۰	۱۲/۵	۰/۰۱۵	۱/۷۴	۰/۰۲۳۶	۰/۱۹۴	۱/۳	۴۱۰۶۴	۴/۵۳۶
۲۰	۱۵	۰/۰۱۷	۱/۸۵	۰/۰۲۶۵	۰/۱۹۲	۱/۴۶	۴۹۰۲۵	۴/۵۳۰
۲۰	۱۷/۵	۰/۰۱۸	۲/۰۱	۰/۰۲۸۴	۰/۱۷۵	۱/۵۷	۵۷۰۸۴	۴/۷۸۳
۲۰	۲۰	۰/۰۲	۲/۰۸	۰/۰۳۱	۰/۱۷۸	۱/۷۳	۶۴۴۸۰	۴/۶۹۶
۲۵	۵	۰/۰۰۸	۱/۲۸	۰/۰۱۲۹	۰/۱۸۴	۰/۷	۱۶۵۱۲	۴/۵۶۹
۲۵	۷/۵	۰/۰۱	۱/۴۷	۰/۰۱۶۸	۰/۱۸۲	۰/۹۲	۲۴۹۶	۴/۶۹۳
۲۵	۱۰	۰/۰۱۲	۱/۶۷	۰/۰۱۹۷	۰/۱۶۵	۱/۰۸	۳۲۸۹۹	۴/۸۶۷
۲۵	۱۲/۵	۰/۰۱۴	۱/۸۱	۰/۰۲۲۶	۰/۱۶۱	۱/۲۲	۴۰۹۰۶	۴/۸۸۴
۲۵	۱۵	۰/۰۱۶	۱/۹۲	۰/۰۲۵۵	۰/۱۶۲	۱/۲۱	۴۸۹۶۰	۴/۸۴۶
۲۵	۱۷/۵	۰/۰۱۸	۲/۰۱	۰/۰۲۸۴	۰/۱۶۴	۱/۵۷	۵۷۰۸۴	۴/۷۸۳
۲۵	۲۰	۰/۰۱۹	۲/۱۵	۰/۰۳	۰/۱۵۲	۱/۶۸	۶۴۵۰۰	۴/۹۸

با توجه به روابط (۲) و (۳) می توان عوامل مؤثر در افت انرژی را مورد بررسی قرار داد. از آنجا که ارتفاع سرریز (P) در طی آزمایشها ثابت بوده، لذا در این تحقیق تأثیر پارامتر  $\frac{P}{k}$  در افت انرژی بررسی نشده است. ولی تأثیر پارامترهای  $\frac{D}{k}$  و  $Re$  بر روی ضریب کشش شکل (CD) بررسی گردیده است. برای تجزیه و تحلیل نتایج به دست آمده از آزمایشها و بررسی همبستگی موجود بین پارامترهای مختلف از برنامه کامپیوتری STATG استفاده شده است.

### تأثیر پارامتر $\frac{H}{k}$ در افت انرژی

این پارامتر بیانگر تغییرات بده جریان در یک ارتفاع مشخص از پله ها می باشد. نمودار (۲) تغییرات درصد افت انرژی با  $\frac{H}{k}$  را نشان می دهد، از این نمودار مشاهده می شود که در هر گزینه از زاویه کف پله، با افزایش  $\frac{H}{k}$  (افزایش بده جریان)، افت انرژی کاهش می یابد. همچنین در یک  $\frac{H}{k}$  (بده) مشخص، با افزایش زاویه شیب کف پله ها افت انرژی کاهش می یابد.

### تأثیر پارامتر $\frac{\lambda}{k}$ در افت انرژی

با توجه به رابطه (۴) در سرریز پلکانی با پله های کف شیب دار، پارامتر فاصله نسبی  $\frac{\lambda}{k}$  مستقل از ابعاد پله ها بوده و تنها تابعی از زاویه شیب عمومی سرریز ( $\alpha$ ) و زاویه کف پله ها ( $\theta$ ) می باشد. از آنجا که  $\alpha = 52/045^\circ$  و  $\theta$  برابر ۰، ۱۰، ۱۵، ۲۰ و ۲۵ درجه می باشند، لذا  $\frac{\lambda}{k}$  به ترتیب برابر ۱/۵۱۲، ۱/۶۰۶، ۱/۷۰۵، ۱/۸۱۳، ۲/۰۶۲ می آید. بررسیهای نایت و مکدونالد (Knight & Macdonald) (۱) در مورد تقسیم بندی انواع جریان در زیری های مصنوعی نشان داده است که رژیم جریان در پایین تر از حد  $\frac{\lambda}{k} = 3/47$  از نوع جریان شبه صاف خواهد بود. لذا در این تحقیق که پارامتر  $\frac{\lambda}{k}$  کمتر از حدود فوق می باشد، وقوع جریان شبه صاف حتمی بوده و تأییدی بر مشاهدات آزمایشگاهی می باشد. نمودار (۳) تغییرات درصد افت انرژی و  $\frac{\lambda}{k}$  را در بده های مختلف نشان می دهد. از این نمودار مشاهده می شود که در یک بده مشخص، با افزایش  $\frac{\lambda}{k}$  افت انرژی افزایش و در یک  $\frac{\lambda}{k}$  مشخص با افزایش بده جریان افت انرژی کاهش می یابد.

### تأثیر پارامتر $C_D$ در افت انرژی

در بستریهای زبر شده توسط عناصر زبر مصنوعی، قسمت عمده مقاومت هیدرولیکی ایجاد شده در مقابل جریان ناشی از

مقاومت کشش شکل (form Drag Resistance) عناصر زبر می باشد. در بررسی این مقاومت از پارامتر ضریب کشش شکل  $C_D$  به عنوان شاخص اتلاف انرژی استفاده می شود، بدین منظور با توجه به رابطه (۲)، در این تحقیق عوامل مؤثر در ضریب کشش شکل مورد بررسی قرار گرفته است. این عوامل عبارتند از:

الف) تغییرات ضریب کشش شکل با عمق نسبی:

نمودار (۴) تغییرات  $C_D$  با  $\frac{D}{k}$  را در گزینه های مختلف از زاویه کف پله ها نشان می دهد، از این نمودار می توان ملاحظه نمود که با افزایش  $\frac{D}{k}$ ، ضریب کشش  $C_D$  کاهش می یابد. همچنین در یک عمق نسبی مشخص با افزایش زاویه شیب کف پله ها ( $\theta$ ) ضریب کشش شکل کاهش می یابد، با توجه به رابطه مستقیم عمق جریان (D) با بده (O) علت کاهش درصد افت انرژی جریان در اثر افزایش بده جریان را می توان به کاهش پارامتر  $C_D$  در اثر افزایش  $\frac{D}{k}$  مرتبط دانست.

ب) تغییرات ضریب کشش شکل با عدد رینولدز:

تغییرات  $C_D$  با  $Re$  مشابه تغییرات این ضریب با پارامتر  $\frac{D}{k}$  می باشد که در نمودار (۵) نشان داده شده است.

ج) تغییرات ضریب کشش شکل با عدد فرود:

نمودار (۶) این تغییرات را نشان می دهد، همانطور که از این نمودار مشاهده می شود تمام داده های مربوط به گزینه های مختلف در اطراف یک منحنی جمع شده اند. لذا با استفاده از برنامه محاسبات آماری مشخص گردید که مدل توانی دارای بیشترین ضریب همبستگی می باشد، بنابراین با توجه به ضرایب ثابت مدل توانی، رابطه  $C_D$  با عدد فرود ( $F_r$ ) به صورت زیر در می آید:

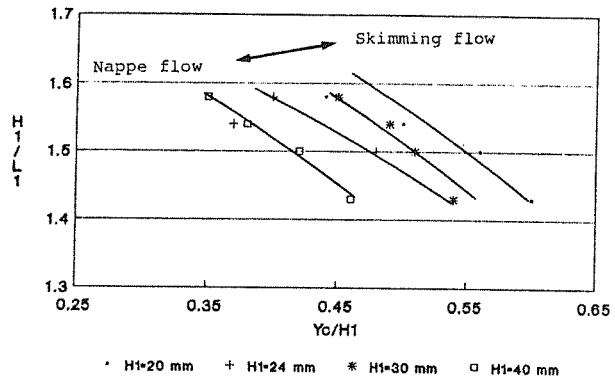
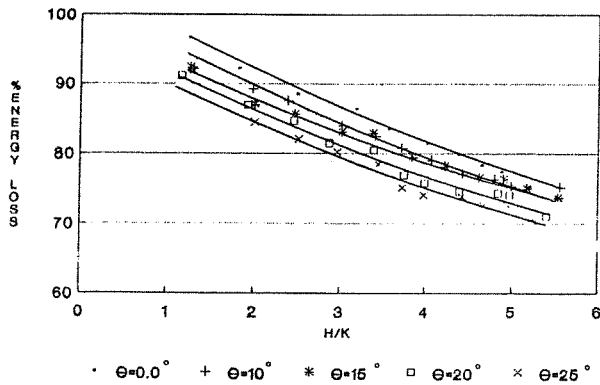
$$C_D = \frac{12.49}{F_r^{2.74}} \quad (13)$$

تجزیه و تحلیل آماری نشان داد که در بین پارامترهای مؤثر در ضریب کشش شکل، بیشترین ضریب همبستگی مربوط به عدد فرود می باشد که این امر مبین تأثیر غالب عدد فرود در تغییرات  $C_D$  خواهد بود. قابل ذکر است که نوری (۲) پارامتر  $C_D$  را برای شیبهای تند پلکانی شده کمتر از ۱:  $(\frac{1}{5}, \frac{1}{10})$  به صورت زیر به دست آورده است:

$$C_D = \frac{2.24}{F_r^{2.13}} \quad (14)$$

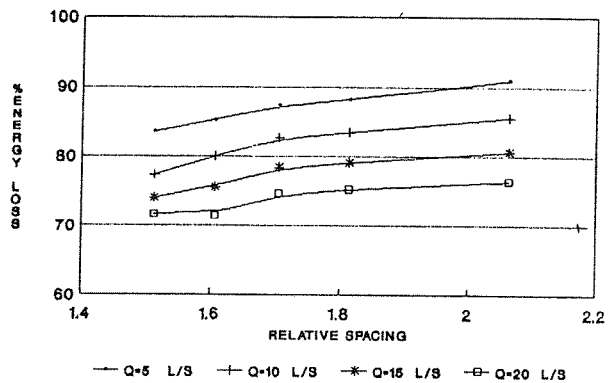
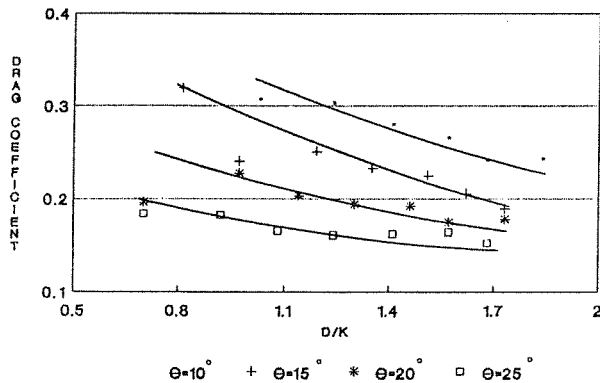
استفاده نمود. نتایج به دست آمده فوق نقش شاخص بودن پارامتر  $C_D$  و در نتیجه عوامل مؤثر در آن را در میزان افت انرژی جریان بر روی سرریز پلکانی مشخص می سازد.

بنابراین به دلیل تفاوت مکانیسم افت انرژی در شیبهای کمتر و بیشتر از ۱:۱ می توان برای محاسبه ضریب کشش شکل در شیبهای خیلی تند پلکانی از رابطه (۱۳) و برای شیبهای تند پلکانی (شیبهای کمتر از ۱:۱) از رابطه (۱۴)



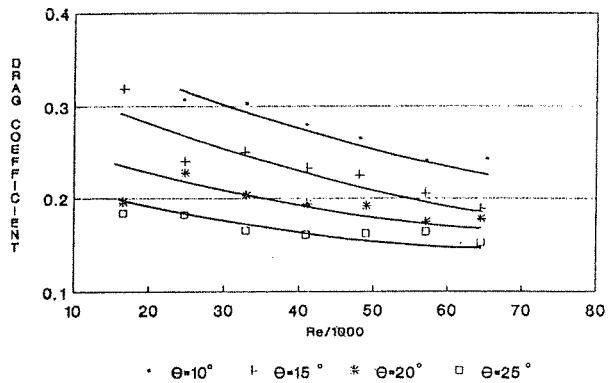
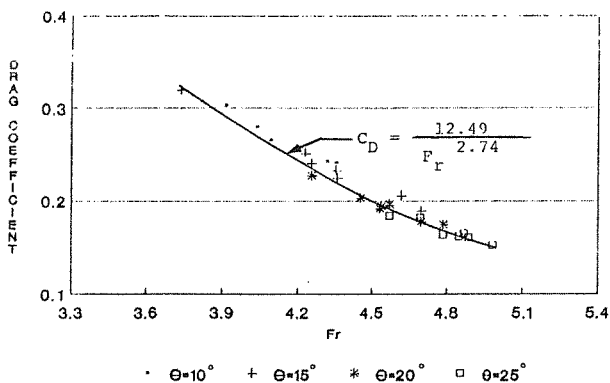
نمودار (۲) تغییرات درصد افت انرژی با  $H/K$  برای گزینه های مختلف از زاویه کف پله

نمودار (۱) شروع جریان شبه صاف در گزینه های مختلف بر حسب  $Y_c/H_1$



نمودار (۴) تغییرات ضریب کشش شکل با عمق نسبی در گزینه های مختلف

نمودار (۳) تغییرات درصد افت انرژی با فاصله نسبی برای بده های ۵ تا ۲۰ لیتر در ثانیه



نمودار (۶) تغییرات ضریب کشش شکل با عدد فرود

نمودار (۵) تغییرات ضریب کشش شکل با عدد رینولدز در گزینه های مختلف



با توجه به نتایج آزمایشهای انجام شده و تحلیل ابعادی سرریز پلکانی می توان نتایج را به شرح زیر خلاصه نمود:  
۱- با افزایش بده جریان (بلندای آب بر روی تاج سرریز) میزان افت انرژی کاهش می یابد.  
۲- در اثر پلکانی شدن سرریز میزان قابل توجهی از انرژی جریان مستهلک می گردد، در نتیجه ابعاد حوضچه آرامش مورد نیاز کاهش می یابد.  
۳- با افزایش زاویه کف پله (کاهش فاصله نسبی) درصد افت انرژی کاهش می یابد، لذا در شیبهای عمومی بیشتر از ۱:۱ شیب دار کردن کف پله ها اثر مثبت بر روی میزان

استهلاک انرژی ندارد.

۴- رژیم جریان در اکثر بده ها از نوع جریان شبه صاف (Skimming flow) می باشد که این نوع جریان در گزینه های مختلف در بالای محدود  $\frac{Y_c}{H_1} = 0.35$  اتفاق می افتد.  
۵- افزایش و کاهش فاصله نسبی، باعث افزایش و کاهش افت انرژی می گردد.  
۶- در بین پارامترهای مؤثر در ضریب کشش شکل پله ها در سرریز پلکانی مشخص گردید که عدد فرود پارامتر غالب بوده و لذا رابطه ای برای تخمین ضریب کشش شکل به دست آمد.

منابع:

1. knight, D. W., and Macdonald, J. A., "Hydraulic Resistance of Artificial strip Roughness", Journal of the Hydraulics Division ASCE, Vol.105, No. HY6, June, 1979.
2. Norri, Bahzad, M. A., "Form Drag Resistnace of two Dimentinal stepped steep open channels", channels and channel control sturctures, springer, 1984.
3. Rajaratnam, N., "skimming Flow in stepped spillway" Journal of Hydraulics Division ASCE, Vol. 116, No.4, 1990.
4. Sorensen, R.M. "Stepped spillway Hydraulic Model Investigation", Journal of Hydraulics Division, ASCE, Vol. 111, No. 12, 1985.
5. Young, M.F, "Feasibility study of A. Stepped spillway" Hydraulics Division speciality conference, Jackson, MS, 1982.