

## بررسی تأثیر شیب بر تعداد بهینه پلکان‌ها در سرریزهای پلکانی

سیاوش حیدری ارجلو<sup>۱\*</sup>، سید حبیب موسوی جهرمی<sup>۲</sup> و آرش ادیب<sup>۳</sup>

\* - کارشناس ارشد سازه‌های آبی دانشگاه شهید چمران اهواز: heidari\_av@yahoo.com

۲- دانشیار گروه سازه‌های آبی دانشگاه شهید چمران اهواز

۳- استادیار گروه عمران، دانشگاه شهید چمران، اهواز

تاریخ دریافت: ۸۸/۶/۲۹

تاریخ پذیرش: ۸۹/۹/۲۷

### چکیده

در این تحقیق تعداد ۵۴ مدل فیزیکی از سرریزهای پلکانی با سه شیب مختلف  $(z=2.5) 21/8^\circ$ ،  $(z=2) 26/86^\circ$  و  $(z=1.7) 30^\circ$  ساخته و مورد آزمایش قرار گرفت. نوع تاج سرریزها از منحنی استاندارد اوجی است و پلکان‌ها با شیب‌های ثابت  $z=1.7$ ،  $z=2$  و  $z=2.5$  تا پاشنه پایین دست سرریز ادامه دارد. جهت مطالعه اثر تعداد پله‌ها در افت انرژی، تعداد پله‌های ۳۹، ...، ۲، ۳، ۵، ۷، ... عدد منظور شد. هدف، بررسی تأثیر تعداد پلکان در میزان افت انرژی جریان و در نهایت بدست آوردن تعداد بهینه پلکان در این نوع از سرریزها به گونه‌ای که بیشترین میزان افت انرژی حاصل گردد می‌باشد. آزمایشات با ۵ دبی مختلف (۱۰-۲۰-...-۵۰ لیتر بر ثانیه) در آزمایشگاه هیدرولیک دانشکده مهندسی علوم آب دانشگاه شهید چمران اهواز انجام گردید که مجموعاً ۲۷۰ آزمایش انجام گرفت. نتایج حاصل از این پژوهش نشان می‌دهند که به ازاء انرژی ثابت بالادست، افزایش تعداد پله‌ها به میزان قابل توجهی باعث افزایش استهلاک انرژی می‌گردد، اما اگر چنانچه این تعداد از حد معینی تجاوز کند، اثر مثبت آن از بین می‌رود. همچنین بررسی‌ها نشانگر این مطلب می‌باشند که به ازاء افزایش دبی جریان در هر یک از شیب‌ها، حداکثر افت انرژی نسبی صورت گرفته در تعداد پلکان بالاتری رخ داده است. همچنین با افزایش شیب سرریز از  $21/8$  درجه به  $30$  درجه، حداکثر افت انرژی صورت گرفته در تعداد پلکان کمتری رخ می‌دهد.

**کلید واژه‌ها:** سرریز پلکانی، حداکثر افت انرژی نسبی، تعداد بهینه پلکان، مدل فیزیکی

### مقدمه

**الف- تاریخچه سرریزهای پلکانی:** سرریزهای

پلکانی از زمان‌های بسیار قدیم (حدود ۳۵۰۰ سال پیش) مورد استفاده قرار می‌گرفته‌اند [۱]. ولی تا کنون برخی از جنبه‌های هیدرولیکی مربوطه ناشناخته باقی مانده است. در دهه‌های اخیر شناخت تکنولوژی جدید ساخت سدها با کاربرد مصالح بتن غلطکی توسعه و توجه به این سرریز را بیشتر کرده است. زیرا ساخت سرریزهای پلکانی با این نوع تکنولوژی سازگاری مناسبی داشته و همین امر باعث گردیده است تا ساخت سرریزهای پلکانی از اهمیت بیشتری برخوردار گردد.

قدیمی‌ترین سرریزهای پلکانی احتمالاً همان سدهای رودخانه خسر<sup>۱</sup> در کشور عراق می‌باشند. سدهای رودخانه خسر ۶۹۴ سال قبل از میلاد توسط پادشاهی آشوری<sup>۲</sup>ها ساخته شده‌اند. این سدها برای تأمین آب پایتخت آشوری‌ها (نینوا) در نزدیکی موصل فعلی طراحی شده بودند. بقایای این سدها هنوز باقی هستند. سال‌ها بعد، رومی‌ها سدهای روگذر<sup>۳</sup> را در سوریه و تونس احداث نمودند. پس از سقوط پادشاهی روم، مهندسين عمران مسلمان تجربه‌هایی را از ناباتینی‌ها، رومی‌ها و سابین‌ها<sup>۴</sup>

<sup>۱</sup> - Khosr

<sup>۲</sup> - Assyrian King

<sup>۳</sup> - Overflow dams

<sup>۴</sup> - Sabians

ساخته شده‌اند و جدیدتر هستند بین ردیف‌ها از کلاهی‌های پوششی بتنی استفاده شده است. از آبشارهای پلکانی برای اکسیژن دهی با جریان‌هایی که اکسیژن محلول در آن‌ها کم است در امتداد یا نزدیک رودخانه‌ها و آبراهه‌ها می‌توان استفاده کرد.

کارخانه بازیافت آب «مونت فرلند»<sup>۲</sup> در هلند برای خارج کردن نیترات از آب‌های زیرزمینی به وسیله گوگرد یا سنگ آهک طراحی شده است. این کارخانه که عمل نیترات زدایی را انجام می‌دهد شامل یک آبشار تهویه برای اکسیژن دهی مجدد آب‌هایی می‌باشد که در انتهای فرایند نیترات زدایی، اکسیژن خود را از دست داده‌اند.

**ج- رژیم‌های جریان:** اکثر محققان به دو نوع رژیم جریان متفاوت به نام‌های ریزشی<sup>۳</sup> و غیر ریزشی<sup>۴</sup> اشاره نموده‌اند. نوع اول در دبی‌های کم و ارتفاع پلکان‌های بزرگ اتفاق می‌افتد و نوع دوم در سرریزهای با دبی زیاد و ارتفاع پلکان‌های کم رخ می‌دهد [۵، ۳ و ۷].

احتمالاً اسری و هورنر و سورنسن [۱۳] جزو اولین پژوهشگرانی بوده‌اند که جریان از روی سرریزهای پلکانی را به دو نوع رژیم جریان ریزشی و غیر ریزشی تقسیم بندی نموده‌اند. در شکل شماره (۱) این دو رژیم جریان نشان داده شده‌اند.

بر اساس نتایج آزمایش‌های انجام شده بر روی سرریزهای پلکانی می‌توان گفت که تبدیل رژیم جریان ریزشی به غیر ریزشی تقریباً در  $y_c/h=0.8$  اتفاق می‌افتد (۲). جانسون [۱۹۹۴] با جمع‌آوری نتایج آزمایش‌های سایر محققین نشان داد که در تبدیل رژیم جریان ریزشی به غیر ریزشی علاوه بر پارامتر بی بعد  $y_c/h$ ، شیب سرریز نیز موثر می‌باشد. نتایج بررسی‌های وی نشان داد که برای وقوع رژیم

کسب نمودند. سرریزهای پلکانی ساخت مسلمانان در کشورهای عراق و اسپانیا یافت می‌شوند. بعد از غلبه اسپانیا، مهندسين اسپانیایی از تجارب رومی‌ها و مسلمانان در سرریزهای پلکانی استفاده نمودند.

**ب- کاربرد سرریزهای پلکانی:** سرریزهای پلکانی به دلیل وجود پلکان‌ها و افت انرژی زیادی که سبب می‌شوند، به عنوان یکی از مهم‌ترین سازه‌ها در مناطق کوهستانی جهت کنترل سیلاب‌ها به حساب می‌آیند. توسعه مصالح ساختمانی جدید (برای مثال بتن متراکم غلطکی یا RCC و گابیون‌های مسلح) موجب تمایل بیشتر به استفاده از سرریزهای پلکانی شده است. ساخت سرریزهای پلکانی با روش‌های قالب لغزنده و بتن ریزی غلطکی متراکم سازگاری دارد.

سرریزهای پلکانی گابیونی متداول‌ترین نوع سرریزهای مورد استفاده در سدهای گابیونی هستند. پلکان‌ها به نحو کاملاً چشمگیری می‌توانند شدت استهلاک انرژی در امتداد سطح سرریز را افزایش داده و اندازه و هزینه حوضچه آرامش را کاهش دهند. همچنین از پلکان‌ها برای استهلاک انرژی در کانال‌هایی که رگبارهای شدید را از خود عبور می‌دهند و دیوارهای حائل رودخانه استفاده می‌شود. در جزیره هنگ‌کنگ آبراهه‌های سیلابی در شیب‌های تند کوهپایه‌ای را برای افزایش استهلاک انرژی علاوه بر استفاده از انرژی گیرهای معمولی به طریق کانال‌های پلکانی طراحی نموده‌اند [۹ و ۱۰]. در شمال شرقی استرالیا تعدادی لبریزهای انحرافی<sup>۱</sup> با طرح پله‌ای ساخته شده است. اغلب این لبریزها شامل یک سطح پایین در پایین دست می‌باشند. این سطح پایین دست از چند ردیف صفحات الواری (در سرریزهای قدیمی)، شمع‌های سپری فلزی یا جعبه‌های بتنی توخالی (با مصالح سنگی یا خاک پر می‌شوند) تشکیل گردیده‌اند. در سازه‌هایی که اخیراً

<sup>2</sup> Montferland

<sup>3</sup> Nappe Flow Regime

<sup>4</sup> Skimming Flow Regime

<sup>1</sup> diversion Weir

که استهلاک انرژی در جریان غیر ریزشی در اثر تبدیل ممتوم به سیال دورانی تقویت می‌گردد. هدف این مقاله، بررسی تأثیر تعداد پلکان در میزان افت انرژی جریان و در نهایت بدست آوردن تعداد بهینه پلکان در این نوع از سرریزها به گونه‌ای که بیشترین میزان افت انرژی حاصل گردد می‌باشد.

### مواد و روش‌ها

این پژوهش در آزمایشگاه هیدرولیک دانشکده مهندسی علوم آب دانشگاه شهید چمران اهواز انجام پذیرفت. آزمایشگاه دارای یک مخزن اصلی زیرزمینی است که از شبکه آب شهری تغذیه می‌گردد. آب مخزن توسط یک پمپ گریز از مرکز با الکتروموتور به قدرت ۲۵ اسب بخار به درون فلوم، منتقل می‌گردد. آب اضافی، توسط یک لوله ۴ اینچ به مخزن اصلی باز می‌گردد. در محل ورودی آب به فوم‌ها شیر فلکه جهت کنترل میزان دبی ورودی قرار دارد.

### الف- انواع مدل‌های فیزیکی ساخته شده و مشخصات هندسی آن‌ها:

در این تحقیق، مدل‌های فیزیکی متعددی از سرریزهای پلکانی (۵۴ مدل) که دارای شیب و تعداد پله‌های مختلف بودند، ساخته و مورد آزمایش قرار گرفتند. سرریزها از جنس پلگسی گلاس ساخته شدند. قسمت منحنی اوجی شکل بالادست پلکان‌ها بر اساس استاندارد USBR به صورت  $Y = -0.9157X^{1.873}$  طراحی و ساخته شدند. در ادامه منحنی اوجی شکل و در قسمتی که شیب به مقدار شیب دلخواه (۲۱/۸، ۲۶/۵۶، یا ۳۰ درجه) می‌رسید، پلکان‌ها قرار گرفتند (جدول شماره ۱). در این جدول  $h$  و  $I_0$  به ترتیب ارتفاع پله و طول افقی پله می‌باشد که برای تعداد پلکان مختلف مقادیر آن ذکر گردیده شده است.

جریان غیر ریزشی، می‌بایست دبی جریان از یک مقدار مشخصه بحرانی بیشتر باشد. این دبی مشخصه برای شروع رژیم جریان غیر ریزشی به صورت رابطه زیر ارائه شده است [۳]:

$$\frac{(Y_c)_{onset}}{h} = 1.057 - 0.465 \left( \frac{h}{l} \right) \quad (1)$$

### د- هیدرولیک رژیم‌های ریزشی و غیر ریزشی جریان در سرریزهای پلکانی:

کل آبشار در شدت جریان‌های کم (یعنی رژیم جریان ریزشی) به تعدادی از آبشارهای کوچک‌تر تقسیم می‌شود. جریان آب در میان یکسری حوضچه‌های غوطه‌وری از یک پله به پله دیگر وارد می‌شود و از هر پله به صورت یک جت ریزشی با پله زیرین خود برخورد می‌نماید و گاهی نیز یک جهش هیدرولیکی صورت می‌گیرد. انرژی از طریق شکسته شدن جت در میان هوا، برخورد جت با پله و تشکیل جهش هیدرولیکی کامل یا ناقص روی پله مستهلک می‌گردد. در هنگام عبور جریان از روی موانع کوتاه، انرژی بسیار زیادی می‌تواند مستهلک شود.

آب در رژیم جریان غیر ریزشی به صورت یک نهر پیوسته و منسجم به سمت سطح پله 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 ۱).

لبه‌های خارجی پله‌ها نوعی کف کاذب یا شبه کف به وجود می‌آورند که آب از روی آن‌ها عبور می‌نماید. گرداب‌های چرخشی در زیر این شبه کف توسعه می‌یابند و در میان انتقال تنش برشی حاصل از جریان عبوری از لبه پله‌ها باقی می‌مانند. جریان در انتهای بالادست صاف است و هوا در آنجا محبوس نمی‌شود. خصوصیات جریان پس از طی چند پله تغییر می‌کند به این معنی که در پنجه‌های پله هوای بسیار زیادی محبوس می‌گردد و گرداب‌های شدیدی به وجود می‌آید. به نظر می‌رسد

این مقطع به ویژه در دبی‌های بیشتر، اندازه‌گیری عمق آب با مشکل مواجه گردیده و عمق ثبت شده از متوسط حداقل سه قرائت حاصل می‌گردد. اندازه‌گیری عمق آب بعد از پرش هیدرولیکی در محلی که حباب‌های هوای اندکی در جریان آب مشاهده می‌شد، انجام می‌گرفت.

آزمایشات با دبی‌های متفاوت بر روی مدل‌ها انجام پذیرفت. در دبی‌های کم رژیم جریان در سرریزهای پلکانی ریزشی و با افزایش دبی جریان توسط شیر کنترل، رژیم ریزشی به تدریج تبدیل به رژیم غیر ریزشی می‌گردید و مشاهدات حین آزمایشات یادداشت می‌شد.

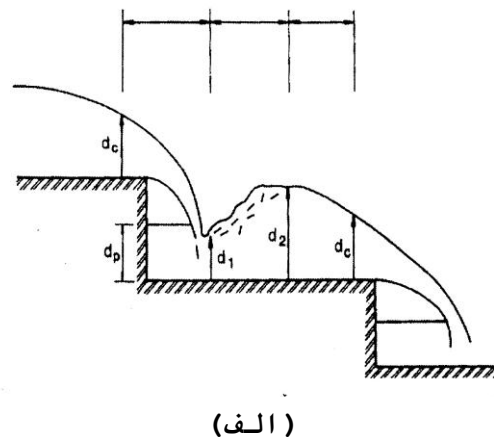
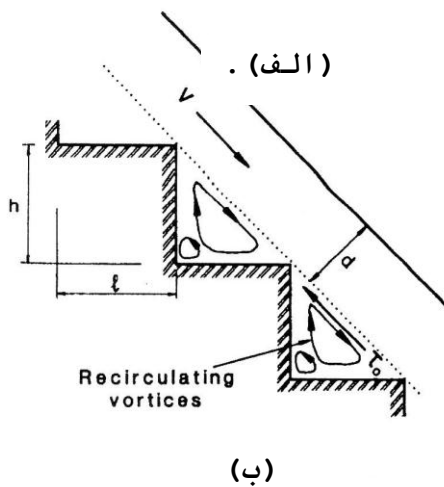
مقدار انرژی در بالادست تاج سرریز،  $H_t$ ، به صورت زیر قابل محاسبه است:

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

سرریزها در فاصله ۲ متری از ابتدای فوم‌ها نصب شدند. در ابتدای فلوم از دو صفحه توری شکل جهت کنترل و آرام کردن جریان استفاده گردید.

جهت کنترل عمق آب پایین‌دست و محل تشکیل پرش هیدرولیکی، از دریچه کشویی قائم در انتهای فلوم استفاده گردید. عمق آب قبل و بعد از پرش هیدرولیکی توسط شاخص مدرج مجهز به ورنیه با دقت ۰.۱ میلی‌متر در سه نقطه در عرض فلوم اندازه‌گیری می‌شد. دبی جریان توسط سرریز مثلی ۵۳ درجه (کالیبر شده) اندازه‌گیری گردید.

در مقطع عمق آب قبل از پرش هیدرولیکی، هوای زیادی وارد جریان گردیده (به خصوص در دبی‌های بالا) و بنابراین در این مقطع، عمق جریان دو فازي مخلوط "آب و هوا" توسط شاخص مدرج اندازه‌گیری می‌گردید. همچنین به دلیل ماهیت دو فازي جریان، سرعت جریان زیاد آب و نوسان‌های سطح آب، در



شکل شماره (۱): رژیم‌های جریان در بالای شوت پله‌ای. الف- رژیم جریان ریزشی با جهش هیدرولیکی کاملاً توسعه یافته. ب- رژیم جریان غیر ریزشی با چرخش حفره‌ای پایدار

## جدول شماره (۱): مشخصات و ابعاد هندسی مدل‌های مورد استفاده در آزمایشات

Z=2.5			Z=2			Z=1.7		
تعداد پله‌ها.	h(cm).	l(cm).	تعداد پله‌ها.	h(cm).	l(cm).	تعداد پله‌ها.	h(cm).	l(cm).
۳	۳۱.۳	۷۸.۲	۲	۴۰.۶	۸۱.۳	۲	۳۵.۱	۶۰.۷
۵	۱۸.۸	۴۶.۹	۳	۲۷.۱	۵۴.۲	۳	۲۳.۴	۴۰.۵
۷	۱۳.۴	۳۳.۵	۵	۱۶.۳	۳۲.۵	۵	۱۴	۲۴.۳
۹	۱۰.۴	۲۶.۱	۷	۱۱.۶	۲۳.۲	۷	۱۰	۱۷.۴
۱۱	۸.۵	۲۱.۳	۹	۹	۱۸.۱	۹	۷.۸	۱۳.۵
۱۳	۷.۲	۱۸	۱۱	۷.۴	۱۴.۸	۱۱	۶.۴	۱۱
۱۵	۶.۳	۱۵.۶	۱۳	۶.۳	۱۲.۵	۱۳	۵.۴	۹.۳
۱۷	۵.۵	۱۳.۸	۱۵	۵.۴	۱۰.۸	۱۵	۴.۷	۸.۱
۱۹	۴.۹	۱۲.۳	۱۷	۴.۸	۹.۶	۱۷	۴.۱	۷.۱
۲۱	۴.۵	۱۱.۲	۱۹	۴.۳	۸.۶	۱۹	۳.۷	۶.۴
۲۳	۴.۱	۱۰.۲	۲۱	۳.۹	۷.۷	۲۱	۳.۳	۵.۸
۲۵	۳.۸	۹.۴	۲۳	۳.۵	۷.۱	۲۳	۳	۵.۳
۲۷	۳.۵	۸.۷	۲۵	۳.۳	۶.۵	۲۵	۲.۸	۴.۹
۲۹	۳.۲	۸.۱	۲۷	۳	۶	۲۷	۲.۶	۴.۵
۳۱	۳	۷.۶	۲۹	۲.۸	۵.۶	۲۹	۲.۴	۴.۲
۳۳	۲.۸	۷.۱	۳۱	۲.۶	۵.۲	۳۱	۲.۳	۳.۹
۳۵	۲.۷	۶.۷	۳۳	۲.۵	۴.۹	۳۳	۲.۱	۳.۷
۳۷	۲.۵	۶.۳	۳۵	۲.۳	۴.۶	۳۵	۲.۲	۳.۵

$$y_1 = \frac{1}{2} y_2 \left( \sqrt{1 + 8(y_c / y_2)^3} - 1 \right) \quad (۴)$$

در فرمول‌های فوق  $y_1$  و  $y_2$  به ترتیب عمق‌های اندازه‌گیری شده قبل و بعد از پرش هیدرولیکی و  $q$  دبی در واحد عرض می‌باشند. با تنظیم مکرر دریچه کشویی که در انتهای فلوم قرار داشت، محل تشکیل پرش در پای سرریز صورت می‌گرفت و سپس در قسمتی از فلوم که نوسانات سطح آب به حداقل می‌رسید اقدام به اندازه‌گیری مقدار  $y_2$  می‌گردید.

در فرمول فوق  $EL_c$  برابر رقوم تاج سرریز می‌باشد که مقدار آن برابر با ۱.۲ متر می‌باشد. همچنین  $y_c$  نشان‌دهنده عمق بحرانی بر روی سرریز می‌باشد که از رابطه  $y_c = (q^2/g)^{1/3}$  بدست آمده است. برای محاسبه انرژی در پایین دست سرریز و قبل از پرش هیدرولیکی با استفاده از عمق‌های مزدوج پرش هیدرولیکی به روش زیر عمل شده است:

$$H_1 = y_1 + \frac{V_1^2}{2g} = y_1 + \frac{q^2}{2gy_1^2} \quad (۳)$$

نتایج آزمایشات محققین چون هورنر<sup>۱</sup>، کریستودولو<sup>۲</sup> و سلماسی [۲] مقایسه و بررسی گردید. مشخص می‌باشد که با افزایش ارتفاع پله‌ها (کاهش تعداد پله‌ها)، میزان افت انرژی نسبی افزایش داشته است.

مقدار افت انرژی نسبی به صورت زیر تعریف شده است:

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

### نتایج و بحث

جهت بررسی تأثیر تعداد پلکان بر میزان افت انرژی نسبی صورت گرفته در آزمایشات، ابتدا با رسم شکل‌های شماره (۲) تا (۴) به بررسی این موضوع پرداخته شد. در شکل‌های یاد شده، تأثیر پارامتر بی بعد  $Yc/h$  در مقابل افت انرژی نسبی جریان در تعداد پله‌های مختلف مورد بررسی قرار گرفت. به دلیل تعداد زیاد مدل‌های بکار رفته، اشکال ارائه شده قدری شلوغ به نظر می‌رسند. با دقت در اشکال ارائه شده می‌توان نتایج زیر را مشخص نمود:

۱- مقدار نسبت  $Yc/h$  در مقابل افت انرژی برای هر کدام از پله‌ها تقریباً از سایر پله‌ها متمایز می‌باشد.

۲- با مراجعه به نمودار می‌توان دریافت که با افزایش میزان  $Yc/h$ ، میزان افت نسبی در تمام موارد کاهش می‌یابد. این امر به دلیل افزایش دبی جریان و در نتیجه افزایش ضخامت جریان (عمق جریان) بر روی پلکان‌ها می‌باشد که باعث می‌گردد که تأثیر پلکان بر روی افت کاهش یابد.

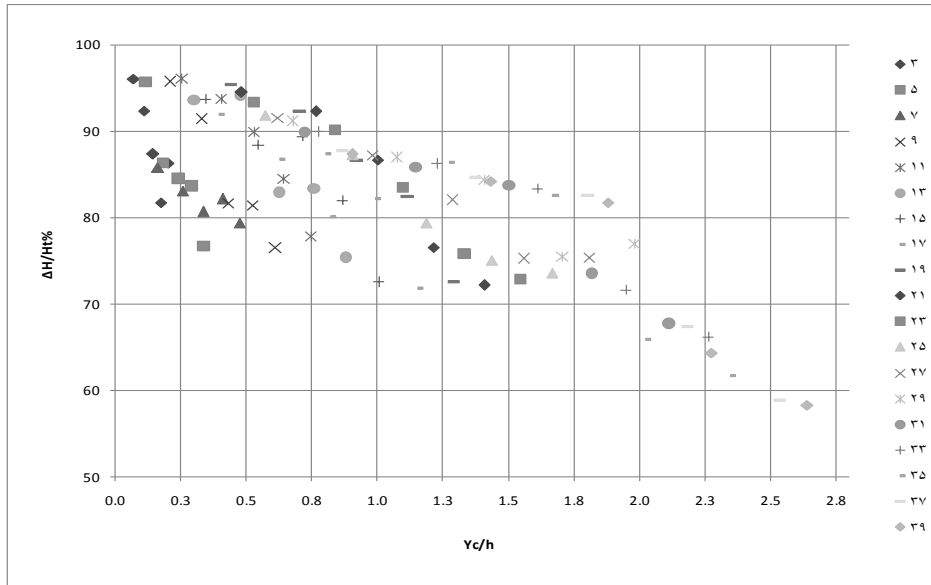
۳- با توجه به نمودارها، هر چه تعداد پلکان‌ها بیشتر شده است، حداکثر میزان افت انرژی، بازای نسبت  $Yc/h$  بیشتری رخ می‌دهد.

۴- با توجه به نمودارها واضح است که بیشترین افت نسبی برای سرریز  $21/8$  درجه در تعداد پلکان یازده، سرریز  $26/56$  درجه در تعداد پانزده پله و برای سرریز  $30$  درجه تعداد سیزده پله رخ داده است.

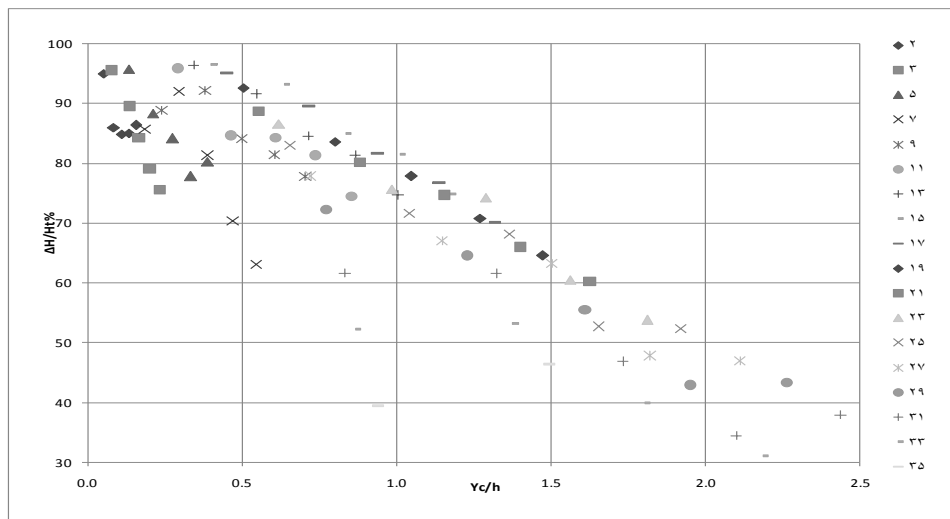
در ادامه جهت کنترل صحت نتایج و داده‌های بدست آمده از آزمایشات شکل شماره (۵) رسم گردید. در این گراف سعی شده است که از نتایج آزمایشاتی استفاده شود که شیب‌های بکار برده شده در آزمایشات آن‌ها معادل و یا حتی الامکان نزدیک به زوایای آزمایشات حاضر باشد. در این شکل، نتایج آزمایشات حاضر با

<sup>1</sup> Horner(1969)

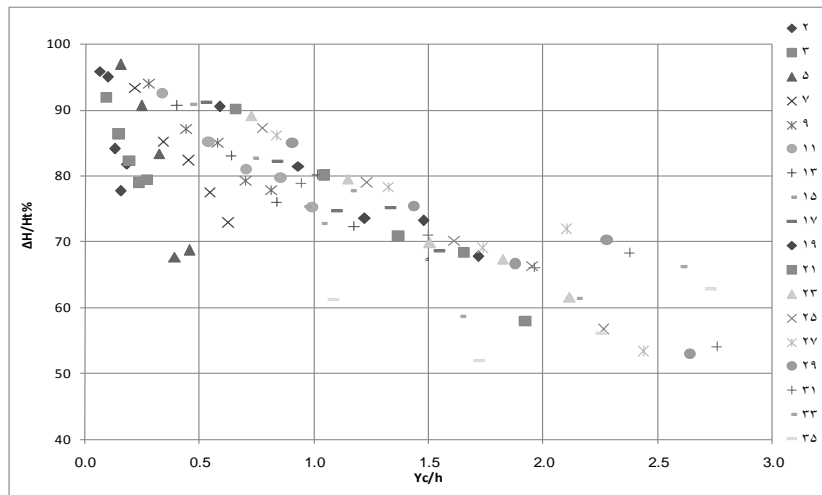
<sup>2</sup> Christodoulou(1993)



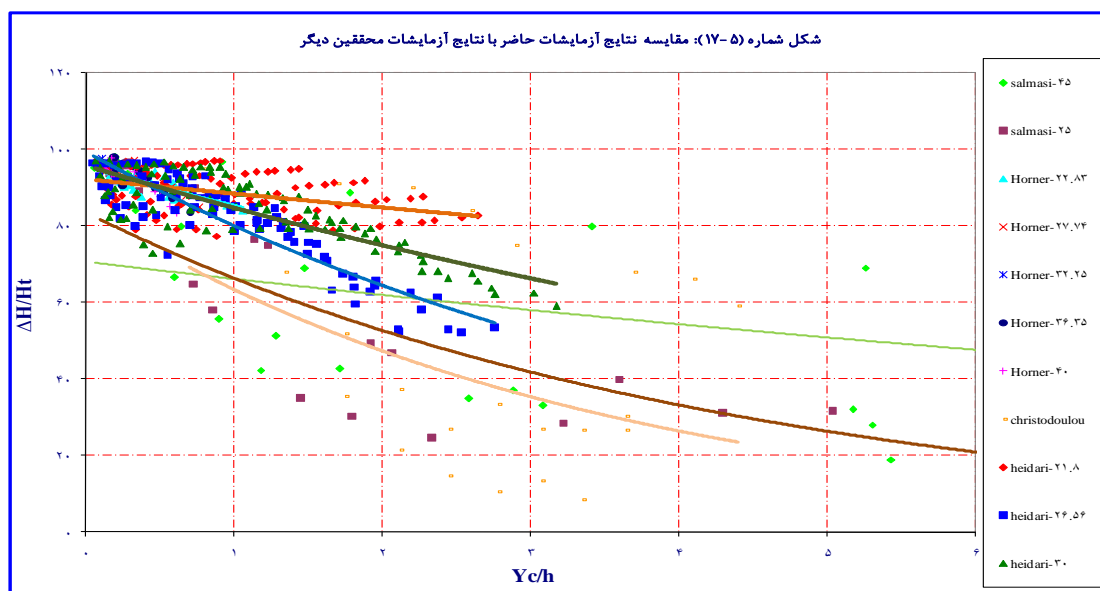
شکل شماره (۲): تاثیر پارامتر بی بعد  $Y_c/h$  در مقابل افت انرژی نسبی جریان در تعداد پلکان مختلف در  $z=2.5$



شکل شماره (۳): تاثیر پارامتر بی بعد  $Y_c/h$  در مقابل افت انرژی نسبی جریان در تعداد پلکان مختلف در  $z=2$



شکل شماره (۴): تأثیر پارامتری بعد  $Y_c/h$  در مقابل افت انرژی نسبی جریان در تعداد پلکان مختلف در  $z=1.7$



شکل شماره (۵): مقایسه نتایج حاصل از این تحقیق با نتایج کار دیگر محققین

دبی‌های بالا، داده‌های سلماسی با داده‌های پژوهش حاضر پراکندگی نشان می‌دهد. همچنین می‌توان تأثیر شیب را بر میزان افت انرژی نسبی بررسی کرد. با دقت در شکل شماره (۵) مشخص می‌شود که میزان افت صورت گرفته در شیب‌های کمتر از ۳۰ درجه بیشتر از سایر شیب‌ها می‌باشد. این موضوع می‌تواند به دلیل تأثیر طول در

آن‌ها در نتایج خود اشاره‌ای به اختلاف تعداد پله‌ها بر استهلاک انرژی نکرده‌اند، ولی با استفاده از این گراف واضح است که با افزایش ارتفاع پله‌ها (کاهش تعداد پله‌ها) بر افت نسبی انرژی افزوده شده است. همچنین به دلیل اینکه سلماسی در آزمایشات خود از دبی‌های بیشتری استفاده نموده است در شکل ارائه شده و در



معادلات قابل برازش توسط این نرم افزار ۳۰۰ نوع معادله مختلف می باشد، ضمن اینکه این برنامه قابلیت دریافت معادلات تعریف شده از سوی کاربر را دارا می باشد).

در انتها با توجه به ضرایب همبستگی و میزان خطای بدست آمده برای معادلات مختلف، معادله شماره (۷) به عنوان معادله نهایی انتخاب گردیده شد.

$$N = \frac{-1.3 + 2.7 \left(\frac{Y_c}{h}\right)^{0.27}}{-0.28 + 0.37 \left(\frac{h}{l}\right)^{0.1}} \quad \text{و} \quad R^2 = 0.8 \quad (7)$$

پارامتر  $h/l$  در واقع بیانگر شیب سرریز می باشد.  $0.4 < h/l < 0.6$

اما نکته مهمی که باید به آن اشاره شود این است که با استفاده از معادله ارائه شده، نمی توان حداکثر افت انرژی صورت گرفته را مشخص کرد؛ لذا برای این امر و با توجه به مشخص شدن پارامترهای موثر در میزان افت انرژی صورت گرفته، نمودارهای کاربردی در شرایط مختلف ارائه خواهند شد. در این نمودارها، تعداد بهینه پلکان در شیب های مختلف به ازاء دامنه های مختلف مقدار پارامتر بی بعد  $Y_c/h$  مشخص شده است.

خلاصه شکل های شماره (۶) تا (۸)، در جدول شماره (۲) آورده شده است.

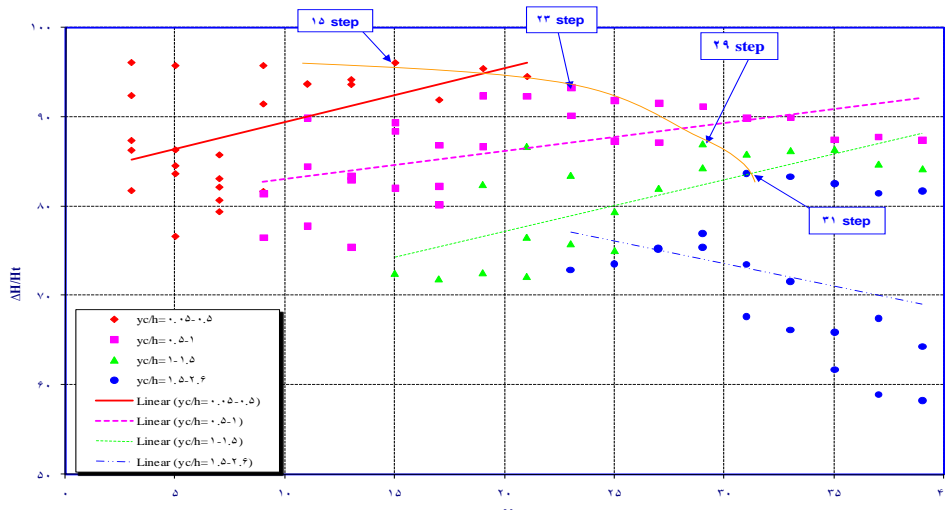
تماس با جریان سرریز باشد که هر چه این طول بیشتر باشد تأثیر زبری بر روی جریان بیشتر شده و در نتیجه میزان افت صورت گرفته نیز بیشتر خواهد شد.

در ادامه و با توجه به آنالیز ابعادی صورت گرفته و مشخص شدن پارامترهای بدون بعد موثر بر جریان از روی سرریز های پلکانی، اقدام به تعیین معادله ای جهت تخمین تعداد پلکان در سرریز های پلکانی گردید.

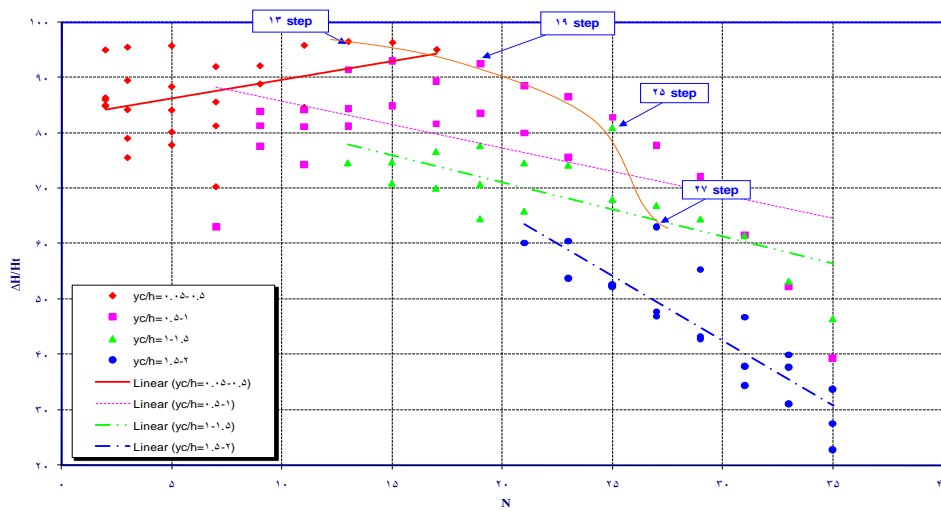
$$N = f\left(\frac{h}{l}, \frac{Y_c}{h}, \frac{Y_c}{H_{dam}}, Fr, Re, \frac{q^2}{gH_{dam}^3}\right) \quad (6)$$

در این رابطه  $Y_c$  عمق بحرانی،  $H_{dam}$  ارتفاع کل سرریز،  $Fr$ ،  $Re$  نیز به ترتیب عدد رینولدز و عدد فرود جریان می باشند.

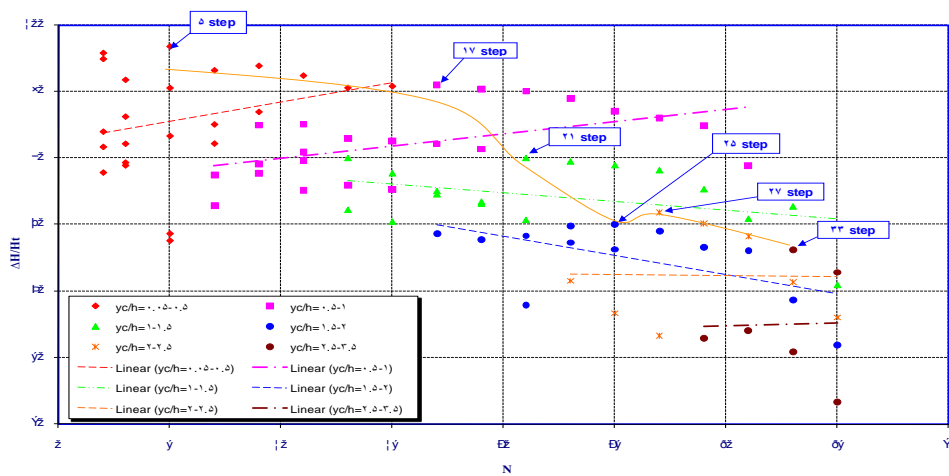
جهت تعیین معادله مورد نظر، و با استفاده از پارامترهای بی بعد یاد شده، از نرم افزار datafit استفاده شد. این نرم افزار، با داشتن قابلیت بسیار بالا در دو زمینه برازش دادن معادلات مختلف ریاضی بر داده ها و همچنین قابلیت درون یابی نقاط با روش های بسیار قوی ریاضی و همچنین استفاده از تعداد بسیار زیادی معادلات کاربردی ریاضی، یکی از بهترین ابزارها جهت بهینه سازی تشخیص داده شد و از آن برای تعیین مدل بهینه استفاده گردید. این نرم افزار قابلیت این را دارد که بهترین معادلات برازش داده شده با داده های ورودی را با حداقل میزان خطا به عنوان خروجی ارائه می کند (تعداد



شکل شماره (۶): تعیین تعداد بهینه پلکان در سرریزهای با  $z=2.5$  به ازاء مقادیر مختلف پارامتر بدون بعد  $(Y_c/h)$



شکل شماره (۷): تعیین تعداد بهینه پلکان در سرریزهای با  $z=2$  به ازاء مقادیر مختلف پارامتر بدون بعد  $(Y_c/h)$



شکل شماره (۸): تعیین تعداد بهینه پلکان در سرریزهای با  $z=1.7$  به ازاء مقادیر مختلف پارامتر بدون بعد  $(Y_c/h)$

جدول شماره (۲): تعداد بهینه پلکان به ازاء مقادیر مختلف پارامتر  $Yc/h$  در شرایط آزمایش.

$Yc/h$	$Z=2.5$	$Z=2$	$Z=1.7$
۰/۰۵-۰/۵	۱۵	۱۳	۵
۰/۵-۱	۲۳	۱۹	۱۷
۱-۱/۵	۲۹	۲۵	۲۱
۱/۵-۲	۳۱ (به ازاء $yc/h=1.5-2.6$ )	۲۷	۲۵
۲-۲/۵	—	—	۲۷
۲/۵-۳/۵	—	—	۳۳

انرژی صورت گرفته در تعداد پلکان کمتری صورت خواهد گرفت.

## نتیجه گیری

- با مشاهدات مدل سازی صورت گرفته، واضح است که با افزایش دبی جریان در تمام تعداد پلکان‌ها از میزان افت نسبی انرژی در طول سرریز کاسته می‌شود.

- در این تحقیق مشخص شد که اگر چنانچه پارامترهای مؤثر در افت نسبی انرژی را در مطالعات در نظر بگیریم می‌توان از تأثیر رژیم جریان ریزشی و غیر ریزشی صرف نظر نمود. این مسئله با توجه به نتایج سایر محققان و همچنین سلماسی (۱۳۸۳) نیز تأیید می‌شود، و لذا می‌توان یک منحنی پیوسته را برای هر دو نوع رژیم جریان برآش داد.

- با افزایش تعداد پله‌ها تا حد معینی شاهد افزایش افت انرژی نسبی در سرریزها بودیم، اما اگر چنانچه این تعداد از حد معینی تجاوز کند، که این حدود در تحقیقات جانسون و راجاراتنام نیز آمده است، اثر مثبت آن از بین می‌رود. زیرا با افزایش تعداد پله‌ها و کاهش ارتفاع پله‌ها در واقع اندازه زبری کاهش یافته و پله‌ها زودتر در زیر آب مستغرق می‌شوند، و در نتیجه اثر زبری آن‌ها کاهش می‌یابد، در ضمن جریان‌های چرخشی کوچک‌تری نیز در زیر بستر کاذب ایجاد می‌شود که در نتیجه اثر آن‌ها را کاهش می‌دهد.

- لازم به توضیح است که تعداد پلکان اشاره شده در اشکال (۶) تا (۸) و جدول شماره (۲)، با توجه به شرایط این آزمایش بدست آمده است که با انجام

با دقت در گراف‌های شماره (۶) تا (۸) می‌توان به این نکات پی برد که:

۱- با افزایش نسبت  $Yc/h$  از میزان افت انرژی نسبی صورت گرفته در مدل‌ها کاسته می‌شود. این موضوع را این‌گونه می‌توان استدلال نمود که با افزایش دبی جریان و در نتیجه افزایش سرعت و عدد فرود در جریان، ضخامت جریان بر روی پلکان در سرریزهای پلکانی افزایش می‌یابد. این موضوع سبب می‌شود که تأثیر زبری (پلکان) بر روی جریان کمتر شده و در نتیجه از میزان افت انرژی نیز کاسته شود. این روند نزولی نیز در گراف‌ها با خطی مشخص گردیده شده است.

۲- همچنین واضح می‌باشد که با افزایش نسبت  $Yc/h$ ، در تعداد پلکان بالاتری، حداکثر میزان افت انرژی نسبی رخ خواهد داد.

مهندسين طراح برای استفاده از گراف‌های فوق با مشخص بودن مقادیر پارامتر بدون بعد  $Yc/h$ ، و با مراجعه به گراف‌های یاد شده می‌توانند تعداد بهینه پلکان را به گونه‌ای انتخاب نمایند که حداکثر میزان افت انرژی در سرریز صورت گیرد.

همچنین با دقت در جدول شماره (۲) می‌توان به موارد زیر اشاره نمود:

۱- واضح است که با افزایش نسبت پارامتر  $Yc/h$  در هر سه شیب، حداکثر افت انرژی صورت گرفته در تعداد پلکان بالاتری اتفاق افتاده است.

۲- مقایسه سطری جدول فوق نشانگر این مطلب می‌باشد که با افزایش شیب سرریز، حداکثر افت

آزمایشات دقیق‌تر و در نظر گرفتن تمامی پارامترهای موثر در بهینه‌سازی سرریزهای پلکانی شاید این مقادیر بدست نیایند. اما نکته اساسی این است که تعداد بهینه واقعی در محدوده تعداد بدست آمده در این مقاله می‌باشد.

### مراجع

۱. بینا، م. موسوی جهرمی، سلماسی، ف. شهریور ۱۳۸۲، هیدرولیک رژیم ریزشی جریان از روی سرریزهای پلکانی. مجله علمی-پژوهشی دانشگاه شهید چمران اهواز. صفحه ۲۵-۲۰.
۲. سلماسی، ف. شهریور ۱۳۸۲، ارزیابی هیدرولیکی سرریزهای پلکانی با استفاده از مدل‌های فیزیکی-پایان نامه دکترا سازه‌های آبی- دانشگاه شهید چمران اهواز.
۳. احمدیار، د؛ و بیات، ح. ۱۳۷۲، بررسی تأثیر شیب کف پله‌ها در سرریزهای پلکانی، مجله دانشگاه امیر کبیر، سال ۶، شماره ۲۲، صفحه ۱۴۶ تا ۱۵۴.
۴. سلماسی، ف. بینا، م. موسوی جهرمی، ح. ۱۳۸۲، بررسی آزمایشگاهی استهلاک انرژی از روی سرریزهای پلکانی، ششمین کنفرانس بین‌المللی مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی اصفهان، جلد ۳، هیدرولیک و منابع آب، صفحه ۳۵-۲۷.
۵. موسوی جهرمی، ح. بینا، م. سلماسی، ف. (۱۳۸۲). ارزیابی افت انرژی در آبشارهای قائم، مجله علمی کشاورزی دانشکده کشاورزی دانشگاه شهید چمران اهواز جلد ۲۶، شماره ۲ (اسفندماه)، صفحات ۱۷ تا ۲۱.
6. Barani ,G.A.(2005). "Optimization of stepped spillway Dimensions and investigation of flow Energy Dissipation over a Physical Model". Journal of Applied Science 5.878-882.
7. Chamani, M.R . and Rajaratnam, N. (1999). "Characteristics of skimming flow over stepped spillway " .j.of hydraulic Eng. , ASCE .125(4) :361-368.
8. Chanson ,H. (1994a). "Comparison of energy dissipation between nappe and skimming flow regimes on stepped chutes".J. Hydr. Res.32(2) :213-218.
9. Chanson,H.(1993)."stepped spillway flows and Air Entrainment" .can.jl of civil Eng.,Vol.20,No.3,june,pp.422-435.
10. Chow, V.T.(1959)."Open channel Hydraulics", McGraw-Hill Book Co.,New York,N.Y.,680p.
11. Christodoulou,G.C.,(1993)."Energy Dissipation on stepped spillway". Journal of hydraulic Eng, ASCE , 119(5) :644-649.
12. Horner ,M. W and Esry,S (1969). "An analysis of flow on cascades of steps". Phd Thesis. University of Birmingham,U.K.

13. Musavi-jahromi ,M.Bina & F. Salmasi . (2008)."Physical and Numerical Modeling of the Nappe Flow in the Steeped Spillway". J.Applied Sci,8 (9) : pp 1720-1725.
14. Musavi-jahromi,M.Bina & F. Salmasi .(2005)."Nappe Flow Hydraulics in the Stepped Spillway using Physical model". International 17<sup>th</sup> Canadian Hydrotechnical Conference 17-19 August.
15. Ohtsu, I., and Yasuda, Y. (1997). "Characteristics of flow conditions on stepped channels". Proc., 27th IAHR Congress, San Francisco, 583– 588.
16. Ohtsu, I., Yasuda, Y., and Takahashi, M. (2001). "Discussion of 'Onset of skimming flow on stepped spillways' by M. R. Chamani and N. Rajaratnam". J. Hydraul. Eng., 127(6) , 522–524.
17. Sorensen , R. M . (1985). "Stepped spillway hydraulic model nvestigation" . J. Hydr. Engrg., ASCE , 111(12) :1461-1472.
18. Takahashi,M., Yasuda,Y ., Ohatsu,I .,(2005). "Effect of Reynolds Number on characteristics of skimming flow in stepped channels". Proceeding of the 31<sup>st</sup> IAHR congress,Vol. 1,Seoul, Korea , pp.644-653.
19. Toombes, L. (2002). "Experimental Study of Air–Water Flow Properties on Low-Gradient Stepped Cascades". PhD Thesis, Department of Civil Engineering, The University of Queensland.
20. Yasuda, Y.; Ohatsu, I. (2003) . "Effect of step cavity area on flow characteristics of skimming flows on stepped chutes". Proc. 30th IAHR Congress, Thessaloniki (Greece), Theme D, pp. 703 . 710.
21. Yasuda, Y. (2004). "Energy dissipation of skimming flows on steppedchannel chutes". Fluvial, Environmental and Coastal evelopments in Hydraulic Engineering, H. Mossa, Y. Yasuda, and H. Chanson eds., A. A. Balkema, London, 67–80.