

ارزیابی استهلاك انرژی جریان دوفازی روگذر سرریز پلکانی به کمک گودال آب شستگی پایین دست

اسدالله مردشتی^{۱*}، ناصر طالب بیدختی^۲، محمود جوان^۳

۱- دانشجوی دکترای سازه های هیدرولیکی بخش مهندسی عمران، دانشکده مهندسی، دانشگاه شیراز

۲- استاد بخش مهندسی عمران، دانشکده مهندسی، دانشگاه شیراز

۳- دانشیار بخش مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شیراز

* شیراز، خیابان زند، دانشکده مهندسی دانشگاه شیراز

a.mardashti@yahoo.com

چکیده - جریان ریزشی روی سرریز پلکانی^۱ به دلیل زبری قابل قیاس پله های بستر سرریز نسبت به عمق معمول جریان، دارای آشفتگی شدید قائم است که به تبع آن ورود هوا از سطح و در نهایت جریان دوفازی آب و هوا را در پی خواهد داشت. برآورد میزان استهلاك انرژی روی سرریز پلکانی با توجه به پیچیدگی جریان دوفازی و تلاطم شدید، یکی از مهمترین مباحث مورد پژوهش است. در این مقاله با ملحوظ کردن آخرین نکات اثر مقیاس مدل فیزیکی در جریانهای دوفازی، برای دو شیب ۱۸/۸ و ۲۸ درجه با افق، چهارخیز پلکان متفاوت ۳، ۵، ۸ و ۱۲ سانتیمتری و دیبهای مختلف ۶، ۱۰، ۱۵، ۲۰ و ۲۵ لیتر در ثانیه (در مجموع ۴۰ حالت)، اندازه گیری میزان استهلاك انرژی جریان ریزشی توسط روش جدید عمق گودال آب شستگی پایین دست و بررسی دیداری حالت های مختلف جریان انجام شده است. با مقایسه نسبی نتایج آزمایشگاهی با نتایج دیگر محققان مطرح، روش گودال آب شستگی به عنوان نوعی روش جدید ساده غیرمستقیم با دقت مناسب، برای اندازه گیری انرژی جریانهای دوفازی روباز در مقابل روش پر هزینه اندازه گیری غلظت هوا، مطرح و قابل ارائه است. در این مقاله طی بررسی دیداری، ارتباط معناداری بین سه حالت مختلف جریان ریزشی و "عدد فرود زبر" حاصل شد که نشانگر جایگاه مهم این عدد بدون بعد در مباحث سرریز پلکانی است. در نهایت با توجه به اینکه با کمک روش اندازه گیری جدید گودال آب شستگی، انرژی باقیمانده در پایین دست سرریز پلکانی برای تمام حالت های سه گانه جریان ریزشی قابل اندازه گیری است، امکان ارائه رابطه تجربی جدیدی برای برآورد میزان استهلاك انرژی برای کل طیف جریان ریزشی بر اساس نسبت بدون بعد ترکیبی از "عدد فرود زبر"، "تعداد پلکان" و "شیب سرریز"، میسر شده است.

کلید واژگان: استهلاك انرژی، جریان دوفازی، سرریز پلکانی، گودال آب شستگی.

۱- مقدمه

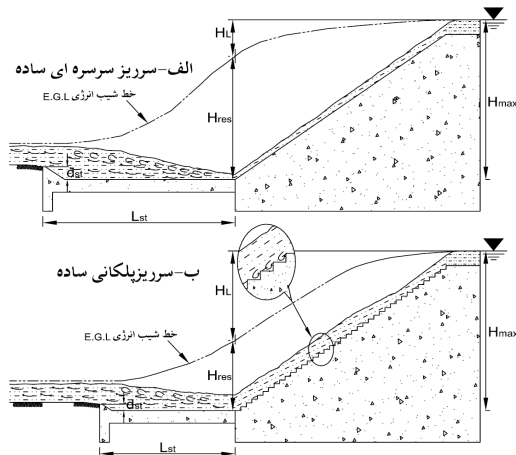
غلظتی (RCC)^۲ که امکان ایجاد سرریز بر روی بدنه سد، آن هم به صورت پلکانی را میسر کرده، در طی سه دهه گذشته، رشد زیادی داشته است. همچنین امکان احداث

مطالعه سرریزهای پلکانی، علی رغم قدمت تاریخی بیش از ۳۰۰۰ سال، به دلیل توسعه فناوری ساخت سدهای بتن

2. Roller Compacted Concrete (RCC)

1. Stepped Spillway

سرریز ساده است (تقریباً دو تا سه برابر سرریز سرسره ای ساده) که به تبع آن خطر حفره‌زایی^۲ به شدت کاهش می‌یابد. **دوم** با توجه به بالابودن ضریب زبری کف ناشی از زبری فرم بستر^۳، سرعت جریان روگذر در مقایسه با سرریز سرسره‌ای به مراتب کوچکتر می‌شود. با توجه به زیاد بودن زبری کف سرریز پلکانی نسبت به عمق معمول جریان و ایجاد تلاطم شدید در راستای قائم، هوا از سطح به داخل جریان روگذر وارد می‌شود. به تبع این مهم، جریان روگذر سرریز پلکانی بر خلاف سایر سرریزها، حالت دوفازی آب و هوا با تلاطم شدید سه بعدی پیدا کرده و از پیچیدگی خاصی برخوردار است. لذا با توجه به پیچیدگی زیاد شکل جریان روگذر سرریز پلکانی، اندازه‌گیری استهلاك انرژی سرریز پلکانی یکی از مهمترین موضوعات مورد بحث و بررسی محققان گذشته بوده است که گاهی به دلیل روشهای مختلف اندازه‌گیری، اندازه مقیاس، محدوده دبیهای اندازه‌گیری و نهایتاً شرایط مرزی متفاوت در نظر گرفته شده در کارهایشان، نتایج دارای پراکندگی و تفاوت محسوس بوده است. بنابراین در این مقاله ضمن مطرح کردن استفاده از گودال آب شستگی پایین دست به عنوان روشی جدید برای برآورد استهلاك انرژی سرریز پلکانی، همچنین ملحوظ کردن آخرین نکات اثر مقیاس مدل در جریانهای دوفازی، اقدام به ارزیابی نتایج ارائه شده از سوی دیگر محققان شده است.



شکل ۱ تمایز عملکرد سرریز پلکانی نسبت به سرریز سرسره‌ای ساده در استهلاك انرژی

همچنین کاهش سرعت جریان روگذر سرریز پلکانی خطر حفره‌زایی را به شدت تقلیل می‌دهد. **سوم** از نظر اجرایی در سطوح شیبدار، اجرای شکل پلکانی سرریز به مراتب ساده‌تر و سریعتر و اقتصادی‌تر است (Chanson 2001, 2002). در مقابل سرریز پلکانی به دلیل افزایش عمق جریان روگذر نیاز به عمق دیوارهای جانبی بیشتر دارد. امروز این مورد در مقایسه با تأثیر در کاهش ابعاد سازه انرژی گیر پایین دست و به خصوص

سرریزهای پلکانی روگذر پیش ساخته برای سدهای خاکی اهمیت موضوع را دوچندان کرده است. یکی از ویژگیهای مهم سرریز پلکانی، استهلاك انرژی قابل ملاحظه در طول سرریز است که به تبع آن ابعاد سازه انرژی گیر انتهایی به مراتب کوچکتر می‌شود. با توجه به زیاد بودن زبری کف سرریز پلکانی نسبت به عمق معمول جریان و ایجاد تلاطم شدید در راستای قائم، هوا از سطح به داخل جریان روگذر وارد می‌شود. به تبع این مهم، جریان روگذر سرریز پلکانی بر خلاف سایر سرریزها، حالت دوفازی آب و هوا با تلاطم شدید سه بعدی پیدا کرده و از پیچیدگی خاصی برخوردار است. لذا با توجه به پیچیدگی زیاد شکل جریان روگذر سرریز پلکانی، اندازه‌گیری استهلاك انرژی سرریز پلکانی یکی از مهمترین موضوعات مورد بحث و بررسی محققان گذشته بوده است که گاهی به دلیل روشهای مختلف اندازه‌گیری، اندازه مقیاس، محدوده دبیهای اندازه‌گیری و نهایتاً شرایط مرزی متفاوت در نظر گرفته شده در کارهایشان، نتایج دارای پراکندگی و تفاوت محسوس بوده است. بنابراین در این مقاله ضمن مطرح کردن استفاده از گودال آب شستگی پایین دست به عنوان روشی جدید برای برآورد استهلاك انرژی سرریز پلکانی، همچنین ملحوظ کردن آخرین نکات اثر مقیاس مدل در جریانهای دوفازی، اقدام به ارزیابی نتایج ارائه شده از سوی دیگر محققان شده است.

۲- مرور تحقیقات

کاربرد سرریزهای پلکانی، در مقایسه با سرریزهای سرسره‌ای^۱ ساده در طی چند سال گذشته بسیار بیشتر شده است (Chanson 2002). دلایل توجه بیشتر به این نوع سرریز، **اول** به دلیل افزایش زبری قابل ملاحظه کف، هوادهی جریان روگذر سرریز پلکانی بسیار بیشتر از

2. Cavitation
3. Form Roughness

1. Chute Spillway

غلظت هوا نسبت به عمق متوسط گیری شود، رابطه (۱) به صورت زیر در می آید:

$$d_w = (1 - C_{mean})Y_{90} \quad (2)$$

همچنین متوسط سرعت جریان U_w به صورت زیر تعریف می شود:

$$U_w = \frac{q_w}{d_w} \quad (3)$$

که در آن q_w دبی در واحد طول سرریز پلکانی است.

در جریان افتان و خیزان، تیغه ریزشی از روی هر پله به روی کف پله بعدی سقوط کرده و انرژی جریان تحت حرکت تیغه آب در هوا، برخورد به کف بستر پله پایین دست و در پایان پرش هیدرولیکی کامل یا ناقص تشکیل شده بر روی کف پله پایین دست مستهلک می شود. به بیان دیگر پله ها در این حالت شبیه آبشارهای^۶ مستقل و کوچک متوالی عمل می کنند. جریان افتان و خیزان به صورت کلی تحت دبیهای کم در مقایسه با ارتفاع پلکان (d_c عمق بحرانی جریان روگذر در مقایسه با s خیز پلکان) تشکیل می شود (شکل ۲).

محققانی مانند (Sorensen, Essery & Horner (1978)

(1985), (Stephenson (1991), Peyras et al.

(1992), (1993), Christodoulou, Chanson

(1994a), (1994), Chamani & Rajaratnam

(2000), (2000), Peruginelli & Pegliara, Pinheiro & Fael

(2004), (2000), Andre در طی چند سال گذشته بر

روی جریان افتان و خیزان مطالعه کرده اند.

(1994a) Chanson برای شیبهای کلی

$11.3^\circ < \theta < 30^\circ$ که زاویه سرریز با افق است، رابطه

(۴) را برای تشکیل جریان افتان و خیزان با پرش

هیدرولیکی کامل بر روی کف پله ها ارائه کرد:

$$\frac{dq_c}{s} \leq 0.0916 \left(\frac{s}{l}\right)^{-1.276} \quad (4)$$

که در آن L طول کف پله است.

عمق آن در طرحهای مختلف از لحاظ فنی و اقتصادی، بررسی و ارزیابی می شود و در بسیاری موارد، در نهایت سرریز پلکانی انتخاب می شود. در راستای امتیازهای مطرح شده فوق، سرریزهای پلکانی، روش مناسبی برای رهاسازی مطمئن سیلاب بر روی سدهای وزنی بتنی، سدهای وزنی بتن غلطکی (RCC)، سرریزهای پیش ساخته روگذر سدهای خاکی، بندهای آبیگر در مسیر رودخانه ها، کانالهای پرشیب دفع سیلاب در مناطق کوهستانی است که در طی سالیان اخیر کاربرد آن افزایش یافته است.

فرایند جریان ریزشی سرریز پلکانی تحت دو حالت عمده جریان "افتان و خیزان"^۱ و "سرسره غلتشی"^۲ کاملاً هوادهی شده و یک حالت بینابینی با عنوان "انتقالی"^۳ بین دو رژیم جریان، قابل تفکیک و تشخیص است. جریانهای افتان و خیزان و سرسره غلتشی بر روی سرریز پلکانی تحت هر شبیهی می تواند اتفاق بیفتد. در هر دو حالت، جریان بعد از رسیدن لایه جدار مرزی^۴ به سطح آن به صورت کامل هوادهی می شود و جریان کاملاً آشفته^۵ است.

متوسط زمانی غلظت هوای داخل جریان دو فاز بر حسب موقعیت در طول مسیر سرریز در واحد حجم با حرف C تعریف می شود و بر حسب آن عمق آب معادل عاری از هوا تحت عنوان d_w به صورت رابطه (۱) حاصل می شود:

$$d_w = \int_0^{Y_{90}} (1 - C) dY \quad (1)$$

که Y عمق عمود بر بستر سرریز پلکانی و Y_{90} عمقی از جریان است که در آن غلظت هوای داخل جریان ۹۰ درصد است. لازم به توضیح است که عمقها نسبت به سطح پوش لبه پله ها محاسبه می شود. در صورتی که از

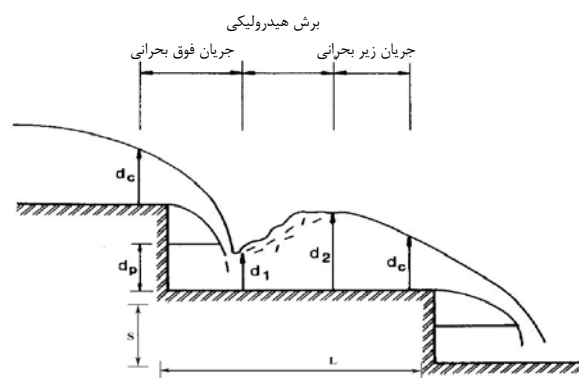
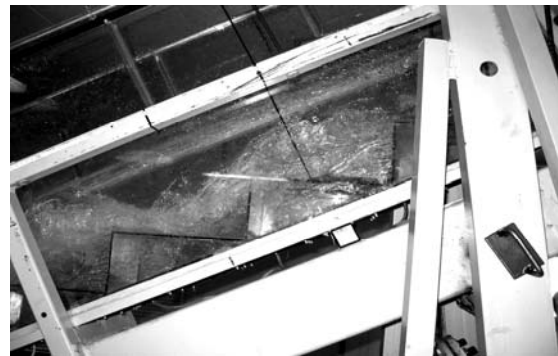
1. Nappe
2. Skimming
3. Transition
4. Boundary Layer
5. Turbulent

ارتفاع و دبی مساوی سرریز کمتر شود، افت انرژی بیشتر می‌شود. به بیان دیگر با افزایش تعداد پلکان جهت یک شیب، ارتفاع و دبی مساوی در سرریز پلکانی، تمامی محققان (Matos & Chanson (1994a), Quintela (1995b), Peruginelli & Pegliara (2000) در مطالعات خود با کاهش انرژی مستهلک شونده بر روی سرریز روبرو شده‌اند. بنابراین برای سدهای کوتاه با پلکانهای بزرگ در حالت جریان غیر یکنواخت، جریان افتان و خیزان انرژی بیشتری از حالت جریان سرسره غلشی مستهلک می‌کند (Andre 2004). همانطور که ارتفاع سد افزایش می‌یابد و به تبع آن تعداد پله‌ها زیادتر می‌شود، جریان روگذر به حالت جریان یکنواخت نزدیکتر می‌شود که به تبع آن در این وضعیت جریان سرسره غلشی قابلیت استهلاك انرژی بیشتری نسبت به جریان افتان و خیزان برای ارتفاع و دبی مساوی سرریز دارد (Chanson 2002).

وقتی دبی جریان روگذر افزایش می‌یابد، به تدریج عمق جریان در مقایسه با زبری کف (s) خیز پله یا k عمق عمود بر بستر خیز پلکان) افزایش یافته و به دنبال آن زبری شکل بستر غرق می‌شود. با غرق شدن پلکان، حالت جریان از افتان و خیزان به سرسره غلشی تغییر می‌یابد (Rajaratnam 1990).

محققانی مانند (Chamani & Rajaratnam (1990), Boes & Chanson (1994a), Rajaratnam (1994), Hager (2003b) روابطی را برای آستانه پایینی جریان سرسره غلشی بر حسب نسبت $\frac{dq_c}{s}$ و شیب پلکان $\frac{s}{l}$ ارائه کرده‌اند که در مقایسه روابط توسط Boes & Hager (2003 b) رابطه Frizel et al. (2000) (رابطه ۶) برای شیبهای $25^\circ < \theta < 55^\circ$ نسبت به گستره داده‌ها، مناسبتر تشخیص داده شده است:

$$\frac{dq_c}{s} \geq 0.91 - 0.14 \left(\frac{s}{l} \right) \quad (6)$$



شکل ۲ مشخصه‌های جریان افتان و خیزان

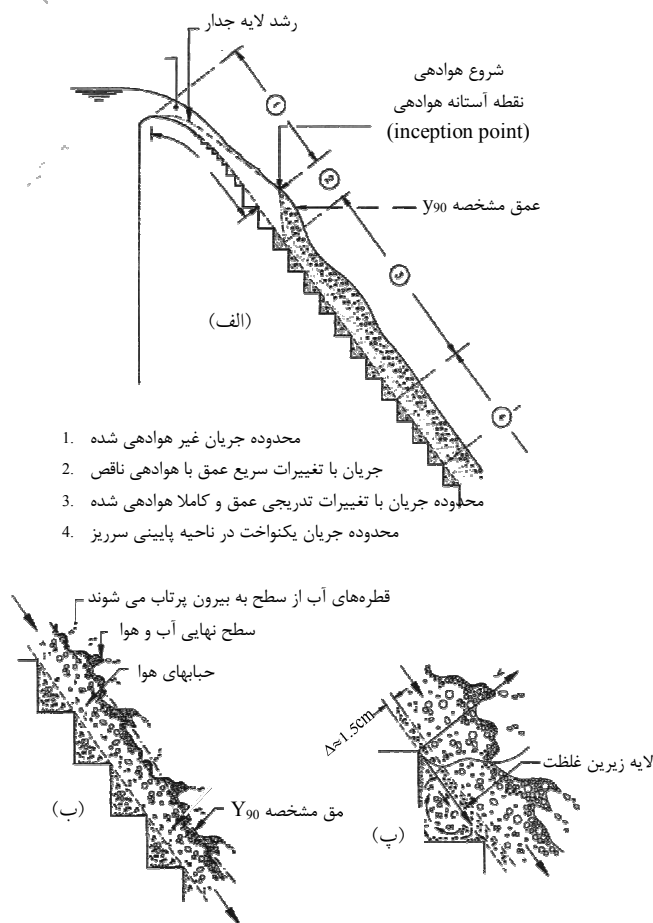
(Pinheiro & Fael (2000) تمامی مطالعات پژوهشگران قبلی در زمینه جریانهای افتان و خیزان را ارزیابی و مقایسه کرده‌اند. آنها در ارزیابی مجدد آزمایشگاهی نتیجه گرفتند که رابطه افت انرژی (۵) ارائه شده از سوی (Chamani & Rajaratnam (1994) نسبت به کار دیگر محققان، تطابق بهتری با نتایج ارزیابی مجدد آزمایشگاهی دارد.

$$\frac{\Delta E}{E} = 1 - \frac{\left\{ (1-A)^N \left[1 + 1.5 \left(\frac{dq_c}{s} \right) \right] + \sum_{i=1}^{N-1} (1-A)^i \right\}}{N + 1.5 \left(\frac{dq_c}{s} \right)} \quad (5)$$

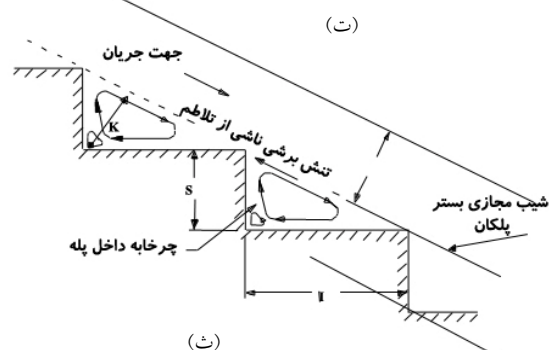
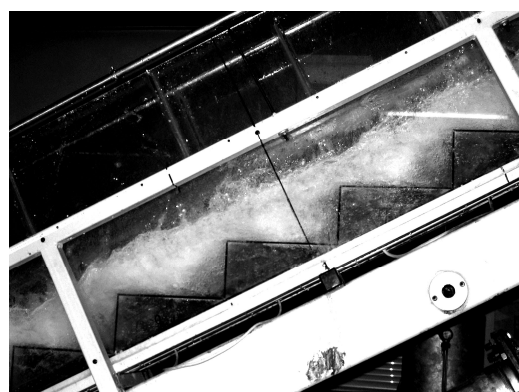
به طوری که

$$A = \left[0.30 - 0.35 \left(\frac{s}{l} \right) \right] - \left[0.54 + 0.27 \left(\frac{s}{l} \right) \right] \log \left(\frac{dq_c}{s} \right)$$

که در آن N تعداد پله و ΔE میزان استهلاك انرژی روی سرریز پلکانی و E انرژی جریان ورودی به سرریز است. در حالت جریان افتان و خیزان، هر چه تعداد پلکان برای



1. محدوده جریان غیر هوادهی شده
2. جریان با تغییرات سریع عمق با هوادهی ناقص
3. محدوده جریان با تغییرات تدریجی عمق و کاملاً هوادهی شده
4. محدوده جریان یکنواخت در ناحیه پایینی سرریز



شکل ۳ مشخصه‌های جریان سرسره غلتشی

به دلیل محدودیت طول دهانه سرریز، دبی زیاد سیلاب یا به بیان دیگر q_w زیاد، عموماً بیشتر سرریزهای متوسط تا بلند از لحاظ ارتفاعی در سیلاب طرح در وضعیت جریان سرسره غلتشی قرار می‌گیرند. به همین دلیل مطالعات در زمینه جریانهای سرسره غلتشی به مراتب بیشتر بوده است. در جریان سرسره غلتشی، توده اصلی جریان بر روی تعدادی چرخ آبی (چرخابه)^۱ که در محفظه داخلی پله‌ها شکل می‌گیرند به پایین سرخورده و ریزش می‌کند. به علت به وجود آمدن این چرخابه‌ها که در کنار هم فرورفتگی پلکان را پر می‌کنند، بستر نسبتاً صافی که در حقیقت سطح پوش چرخابه‌های غلتکی است، به وجود می‌آید که امکان پایین لغزیدن راحت‌تر توده اصلی جریان را فراهم می‌سازد. همانطور که جریان بر روی بستر پوشیده شده از غلتکهای چرخابه‌ای به پایین می‌لغزد، به تدریج به دلیل رشد لایه مرزی به داخل توده جریان و افزایش تلاطم قائم (v') ^۲ و فراگیر شدن آن در کل عمق، هوای قابل ملاحظه‌ای به داخل جریان وارد می‌شود و به اصطلاح جریان هوادهی شده و جریان به رنگ سفید در می‌آید (Chamani, 2000). با هوادهی تیغه جریان روگذر، ضخامت توده جریان ریزشی افزایش می‌یابد. در این وضعیت انرژی جریان تحت انتقال ممنتم جریان ریزشی سرسره‌ای به چرخابه‌های غلتشی مستهلک می‌شود. (شکل ۳).

جریان سرسره غلتشی در طول سرریز پلکانی از ابتدا به بخشهای: ۱- محدوده جریان غیر هوادهی شده نزدیک به تاج سرریز، ۲- محدوده جریان با تغییرات سریع عمق و تا اندازه‌ای هوادهی شده، ۳- محدوده جریان با تغییرات تدریجی عمق و کاملاً هوادهی شده، ۴- محدوده جریان یکنواخت در ناحیه پایینی سرریز (به طوری که عمق، غلظت هوا و سرعت در حالت تعادل باشند)، قابل تفکیک است.

1. Recirculation Vortices

2. Fluctuating Vertical Velocity ($V = \bar{V} + v'$)

عمق متوسط عاری از هوا d_w از روی اندازه‌گیری عمق مشاهده‌ای هوادار است که با Y_{90} در بین محققین شناخته می‌شود. تعدادی از محققان اولیه با یکی گرفتن دو عمق هوادار و بدون هوا، برآوردهای دست بالاتری برای افت انرژی سرریز پلکانی به دست آوردند (Chanson & Gonzalez 2005). همچنین تعیین Y_{90} خود به ابزار اندازه‌گیری دقیق غلظت هوا و دقت زیاد در اندازه‌گیری نیاز دارد که همین موضوع باعث پراکندگی در بین نتایج محققان شده است.

محققان مختلف در سالهای ۱۹۹۴ تاکنون برای f اعدادی را بین 0.07 تا 0.33 به دست آورده‌اند که بیشتر اعداد حاصل بین 0.1 تا 0.2 بوده است. لازم به توضیح است که هر چه شیب سرریز پلکانی تخت‌تر شود (سرریز روگذر سدهای خاکی)، ضریب زبری f به سمت اعداد کوچکتری در حدود 0.1 میل می‌کند و در صورتی که شیب سرریز پلکانی زیاد شود، ضریب زبری به اعداد بزرگتر 0.2 تا 0.3 میل می‌کند. به بیان دیگر هر چه شیب تندتر شود، زبری ناشی از پلکان، افزایش می‌یابد. آخرین برآوردهای ضریب زبری f مربوط به (Chanson (2002,2002a) رابطه (۸) و (Boes & Hager (2002,2003b) رابطه (۹) تحت عنوان زبری بستر f_b است:

$$\frac{f_e}{f_d} = 0.5 \frac{1 + \tanh 2.5 \frac{0.5 C_{mean}}{C_{mean}(1 - C_{mean})}}{1} \quad (8)$$

که در آن $f_d = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \frac{1}{K}$ و $\frac{1}{K}$ ضریب ثابت بدون بعد ناشی از لایه برشی است که در تحقیقات (Gonzales & Chanson (2005) $k = 6$ بهترین نتیجه را داده است:

$$\frac{1}{\sqrt{f_b}} = \frac{1}{\sqrt{0.5 - 0.42 \sin(2\theta)}} \left[1.0 - 0.25 \log\left(\frac{K}{D_h}\right) \right] \quad (9)$$

عمق Y_{90} در محدوده جریان یکنواخت به عنوان ملاک تعیین ارتفاع دیوارهای جانبی سرریز پلکانی قرار می‌گیرد که معمولاً ارتفاعی حداقل $2 Y_{90}$ را برای ارتفاع دیوار جانبی سرریز پلکانی مد نظر قرار می‌دهند. انرژی باقیمانده در پایین دست سرریز پلکانی در جریان سرسره غلشی تابعی از دبی در واحد طول سرریز q_w ، سرعت U_w ، عمق جریان d_w در پای سرریز و شیب سرریز است. سرعت جریان، خود تابعی از زبری بستر سرریز (s یا k) و ارتفاع سد H_{dam} متناظر با عمق جریان است.

به منظور برآورد انرژی باقیمانده جریان در پای سرریز پلکانی باید درک صحیحی از زبری، مقاومت بستر و تأثیر هوا بر روی آنها داشته باشیم. اختلاف عمده سرریز سرسره‌ای ساده و سرریز پلکانی، در نوع زبری غالب در عملکرد جریان روگذر است. در حقیقت در سرریز سرسره‌ای، زبری غالب، زبری سطح بستر^۱ و در سرریز پلکانی، زبری غالب، زبری شکل بستر^۲ است. علی‌رغم حاکم بودن زبری شکل بستر در عملکرد جریان سرسره غلشی در سرریز پلکانی، ضریب زبری داریسی- وایسباخ^۳ برای تعیین انرژی استهلاکی بر روی سرریز پلکانی با احتساب تأثیر هوا به شکل کلی رابطه (۷) قابل ارائه است.

$$f_e = \frac{8gS_f d_w^2}{q_w^2} \left(\frac{D_h}{4} \right) \quad (7)$$

برای سرریزهای پلکانی عریض $\frac{D_h}{4} \approx d_w$ است. در رابطه (۷)، در صورتی که ارتفاع سرریز نسبت به عمق مشخصه جریان d_e زیاد باشد، به گونه‌ای که جریان به حالت یکنواخت برسد، شیب افت انرژی S_f با شیب کف سرریز $\sin \theta$ برابر شده و به تبع آن قابل جایگزینی با $\sin \theta$ است. بنابراین بحث اصلی در محاسبه f_e برآورد

1. Skin Friction
2. Form Drag
3. Darcy -Weisbach Friction Factor

$$\frac{H_{res}}{H_{max}} = \frac{\left(\frac{f}{8\sin\theta}\right)^{\frac{1}{3}} \cos\theta + \frac{\alpha}{2} \left(\frac{f}{8\sin\theta}\right)^{\frac{2}{3}}}{\frac{H_{dam}}{d_c} + \frac{3}{2}} \quad (11)$$

که $\alpha \approx 1.1 \sim 1.16$ است.

Boes & Hager (2003b) و Boes & Minor (2002)

با این منطق که در حالتی که نسبت $\frac{H_{dam}}{d_c}$ به سمت

صفر میل می‌کند (سرریز وجود نداشته باشد)، نسبت

$\frac{H_{res}}{H_{max}}$ باید به سمت یک میل کند، رابطه (۱۱) را برای

جریانهای یکنواخت سرسره غلتشی

$(\frac{H_{dam}}{d_c} \geq 15 \sim 20)$ به صورت رابطه (۱۲) اصلاح

کردند.

$$\frac{H_{res}}{H_{max}} = \frac{\left(\frac{f_b}{8\sin\theta}\right)^{\frac{1}{3}} \cos\theta + \frac{\alpha}{2} \left(\frac{f_b}{8\sin\theta}\right)^{\frac{2}{3}}}{\frac{H_{dam}}{d_c} + \left(\frac{f_b}{8\sin\theta}\right)^{\frac{1}{3}} \cos\theta + \frac{\alpha}{2} \left(\frac{f_b}{8\sin\theta}\right)^{\frac{2}{3}}} \quad (12)$$

در حالت جریان غیر یکنواخت معادله انرژی باقیمانده

باید بر اساس ضریب زبری که بر اساس شیب انرژی و نه

شیب بستر سرریز به دست می‌آید، محاسبه شود. لذا:

$$S_f = \sin\theta - \frac{d}{d_s} SE \quad (13)$$

که $S_f = \frac{dH}{ds}$ ، H کل انرژی جریان روگذر در نقطه

مورد نظر و s مختصات طولی در مسیر بستر سرریز است.

Boes & Hager (2003a,b) با دیدگاه کلی فوق که

اولین بار توسط Chanson (1994b) مطرح شد، معادله

(۱۴) را برای حالت جریان غیریکنواخت سرسره غلتشی

$(\frac{H_{dam}}{d_c} < 15 \sim 20)$ برای زوایای شیب

$19^\circ \leq \theta \leq 55^\circ$ با توجه به نتایج آزمایشگاهی بیان

کردند.

در رابطه (۹)، f_b از روی عمق عاری از هوا، d_w با

احتساب اثر دیوارهای جانبی سرریز محاسبه شده و

ضریب تصحیح شکل تغییر مقطع از دایره به مستطیل نیز

در نظر گرفته شده است. زاویه سرریزهایی که در این

رابطه مد نظر قرار گرفته $19^\circ < \theta < 50^\circ$ است.

Matos (2005) رابطه (۹) را در مطالعات خود بررسی و

تطابق خوبی را بین نتایج محاسبه شده از رابطه با نتایج

آزمایشگاهی مشاهده کرد.

Chow (1959) برای سرریزهای سرسره‌ای ساده، انرژی

باقیمانده در پای سرریز را برای جریانهای روگذر

یکنواخت و غیریکنواخت به صورت رابطه (۱۰) مطرح

کرده است:

$$H_{res} = SE = d_w \cos \theta + \alpha \frac{q_w^2}{2gd_w^2} \quad (10)$$

که SE انرژی ویژه است.

در تحقیقات Chanson (1994b) و Chamani &

Rajaratnam (1994) و Boes & Hager (2003a,b).

Matos (2000) و Matos et al. (2001) ضریب

تصحیح انرژی جنبشی برای جریانهای سرسره غلتشی بر

روی سرریز پلکانی در حدود $\alpha = 1.1 \sim 1.16$ برآورد

شده است.

بیشتر محققان مانند Chanson (1994b) و Matos &

Quintela (1995a,c) و Boes (2000) در مطالعات خود،

نتایج محاسبه انرژی نسبی باقیمانده جریان روگذر سرسره

غلطشی اندازه‌گیری شده $(\frac{H_{res}}{H_{max}})$ را به صورت تابعی از

ارتفاع نسبی کلی سرریز $(\frac{H_{dam}}{d_c})$ ترسیم کرده و با

کاربرد رابطه تحلیلی Chow (1959) برای جریان

یکنواخت روگذر به رابطه کلی (۱۱) دست یافتند:

بسیار زیادی روبه‌رو است و به ابزار اندازه‌گیری دقیق یا روشهای غیر مستقیم نیاز دارد. روشهای مرسوم اندازه‌گیری را می‌توان به شرح زیر برشمرد.

— محاسبه انرژی باقیمانده جریان در پای سرریز از طریق اندازه‌گیری غلظت هوا، سرعت و عمق آب در پنجه سرریز و سپس برآورد عمق آب بدون هوا d_w که این کار از طریق ابزاری نظیر:

- Back- flushing pitot tubes
- Single- or double – tipped resistivity probs
- Single- or double- tipped optical probs
- Single- or double- tipped conductivity probs
- Laser Doppler systems

انجام می‌شود.

— با ایجاد پرش هیدرولیکی اجباری در پای سرریز از طریق کنترل عمق پایاب، اندازه‌گیری عمق ثانویه پرش هیدرولیکی و محاسبه عمق اولیه آب بدون هوا از روی آن و به تبع داشتن عمق اولیه، انجام محاسبه انرژی باقیمانده جریان در پای سرریز

— کاربرد دوربینهای با سرعت بالا و ردیابی خطوط جریان از طریق روشهای پردازش تصویر

که به تبع کاربرد روشهای مختلف نتایج حاصل متفاوت بوده است. به عنوان نمونه نتایج استفاده از روش پرش هیدرولیکی، نشان دهنده استهلاك کمتر انرژی بر روی پلکان نسبت به روشهای اندازه‌گیری غلظت هوا و محاسبه عمق آب بدون هوا است که در این زمینه Chanson (2002b) و Matos (2005) بررسیهایی را برای تعیین عوامل موثر بر نتایج انجام داده‌اند.

با توجه به اینکه در جریان دوفازی، جریان تلاطم بسیار زیادی دارد، (Ohtsu & Yasuda (1997) با استفاده از سرعت سنج LDA نشان دادند که تلاطم نسبی طولی $15\% < \frac{u'}{U} < 18\%$ و تلاطم نسبی قائم $4\% < \frac{v'}{V} < 2\%$ است^۱. همچنین به دلیل

۱- u', v' جذر میانگین مربعات (rms) مولفه های نوسانات سرعت طولی و قائم هستند.

$$\frac{H_{res}}{H_{max}} = \exp \left[\left(-0.045 \left(\frac{k}{D_h} \right)^{0.1} (\sin \theta)^{-0.8} \right) \frac{H_{dam}}{d_c} \right] \quad (14)$$

همچنین با جمع بندی کار Boes, Yasuda (1999), Boes & Hager, Schlapfer (2000), (2000) و Chanson (2002b) برای جریان سرسره غلتشی یکنواخت، Volkart & Minor (2004) و Valentin رابطه ساده‌تر (۱۵) را ارائه کردند. این محققان ضمن آزمایشهای متعددی در مرکز آزمایشگاهی موسسه فناوری فدرال (ETH) سوئیس، صحت و محدوده کاربرد رابطه (۱۵) را نیز تأیید کرده‌اند. این رابطه برای سرریزهای متوسط و بلند ($\frac{H_{dam}}{d_c} > 8$) کاربرد دارد:

$$\frac{H_{res}}{H_{max}} = a \left(\frac{H_{dam}}{d_c} \right)^b \quad (15)$$

که در آن:

ضریب θ	ضریب a	ضریب b
20°	۵/۰	-۱۴/۱
30°	۳/۶	-۰/۸۱
40°, 50°	۲/۱	-۰/۵۶

(Pegram, Officer & Mottram (1999) از طریق تشکیل پرش هیدرولیکی در پایین دست مدل سرریز پلکانی اقدام به اندازه‌گیری افت انرژی بر روی سرریز پلکانی کرده‌اند که نتایج حاصل نشانگر افت انرژی کمتری نسبت به کار دیگر محققان (ارائه شده در فوق) است. این محققان رابطه‌ای را ارائه نکردند و فقط نمودار افت انرژی نسبی بر حسب عمق بحرانی جریان روگذر d_c را ارائه کردند که در این مقاله برای مقایسه به کار رفته است.

همانگونه که در مباحث قبلی بیان شد، اندازه‌گیری دقیق انرژی باقیمانده جریان در پای سرریز پلکانی، به دلیل دوفازی بودن جریان (اختلاط آب و هوا) با دشواری

دوفازی بودن جریان (از حدود ۷۰ درصد عمق به سطح، جریان آب به صورت قطره‌هایی مجزا از یکدیگر با سرعت‌های مختلف در جهتهای مختلف و بیشتر در مسیر اصلی جریان حرکت می‌کنند) و صعوبت به‌کارگیری ابزار اندازه‌گیری غلظت هوا، همچنین عدم همخوانی پدیده پرش هیدرولیکی به‌وجود آمده در پای سرریز پلکانی با تئوری پرش هیدرولیکی، به دلیل تمایز شدید دوفازی بودن تیغه ورودی به پرش هیدرولیکی در مقایسه با عمق اولیه بدون هوای در نظر گرفته شده در تئوری پرش هیدرولیکی، از روش غیر مستقیم جدیدی برای برآورد انرژی کل تیغه خروجی از پایین دست سرریز پلکانی استفاده شده است. این روش مبتنی بر اندازه‌گیری فرسایشی ناشی از برخورد جت جریان پای سرریز با بستر پای سرریز است. به عبارت دیگر هر چه انرژی مجموعه تیغه جریان خروجی بیشتر باشد، عمق فرسایش بیشتر است.

۳- تجهیزات آزمایشگاهی و نحوه آزمایشها

در راستای درک فرایند هیدرولیکی جریان ریزشی بر روی سرریز پلکانی با حاکم قراردادن عدد فرود^۱ در مدل هیدرولیکی، به تبع حاکم بودن نیروی ثقل در ریزش جریان بر روی سرریز پلکانی روباز، یک مجموعه آزمایشگاهی متشکل از کانال سرریز و حوضچه شنی در پایین دست برای انجام آزمایش عبور جریان در دیبها و شبیه‌های مختلف سرریز برای خیزهای متفاوت پلکان در آزمایشگاه هیدرولیک دانشکده مهندسی دانشگاه شیراز تهیه شد. در راستای تهیه مدل آزمایشگاهی با توجه به شکل دوفازی جریان ریزشی، اثر مقیاس^۲ مدل از نکات بسیار مهمی است که باید مدنظر قرار گیرد. علی‌رغم حاکم بودن نیروی ثقل به جریان ریزشی سرریز پلکانی به

دلیل تلاطم شدید جریان دوفازی آب و هوا، متأسفانه از اثر ناشی از نیروی لزجت و کشش سطحی نمی‌توان صرف نظر کرد. در این راستا محققانی مانند Boes (2000a)، Boes & Hager (2003a) و Takahashi et al. (2004, 2004a, 2005) با ساختن مدل سرریز در مقیاسهای مختلف و مقایسه نتایج مدلها با یکدیگر و با شکلهای واقعی سرریز، مطالعات ارزشمندی داشته‌اند. با توجه به اینکه یکی از متداولترین موارد کاربرد سرریزهای پلکانی در سدهای بتن غلطکی بوده که عموماً خیز پلکان سرریز به دلیل ضخامت لایه‌های اجرایی ۰/۳ یا ۰/۶ متر (۱ یا ۲ فوت) است و معمولاً با ضخامت ۰/۶ متر اجرا می‌شود، لذا بیشتر محققان نسبت هندسی مدل را بر حسب ضخامت خیز ۰/۶ متر پلکان واقعی مدنظر قرار می‌دهند. با توجه به اهمیت تاثیر لزجت و کشش سطحی، اعداد رینولدز^۳ و W ^۴ در تناظر با نیروهای موثر در مقابل با نیروی اینرسی از اهمیت برخوردارند. در جمع‌بندی اظهار نظرهای محققان، در مدل هیدرولیکی سرریز پلکانی برای دستیابی به نتایج مناسب، باید $R > 10^5$ ، $W > 100$ باشد و مقیاس مدل حتی الامکان بزرگتر از ۱/۱۵ و ترجیحاً بزرگتر از ۱/۱۰ باشد تا تأثیر غلظت هوا در بدنه جریان دوفازی ریزشی، بر روی اصطکاک بستر، با شرایط واقعی مطابقت داشته باشد.

با توجه به اثر مقیاس، چهار خیز پلکان به ترتیب ۳، ۵، ۸ و ۱۲ سانتیمتر (Gonzales & Chanson (2005)) حداقل خیز پله مدل را به $s > 0.0656 \text{ ft} \approx 2 \text{ cm}$ محدود کردند) در دو شیب طولی سرریز با زاویه ۱۸/۸ و ۲۸ درجه با افق مد نظر قرار گرفته که در ترکیب مدل، دیبهای ۶، ۱۰، ۱۵، ۲۰ و ۲۵ لیتر در ثانیه آزمایش شده است. عرض کانال سرریز و حوضچه شنی برابر ۲۰ سانتیمتر بوده که شرط حداقل عرض کانال آزمایشگاهی ۱۵

3. Raynolds Number
4. Weber Number

1. Froude Number
2. Scale Effect

حفره آب شستگی موضعی، تحت تیغه جریان روگذر سرریز در پای سرریز بر روی بستر دانه‌ای قابل فرسایش به وجود می‌آید. توسعه گودال آب شستگی ناشی از تیغه ریزشی جریان، به جنس بستر (قطر متوسط ذرات d_{50} ،

ضریب یکنواختی ذرات $\frac{d_{60}}{d_{10}}$ ، چگالی سنگدانه ها G و زاویه اصطکاک داخلی (ϕ) و شرایط جریان اعم از جهت و نحوه برخورد تیغه آب با بستر دانه ای، انرژی کل تیغه ریزشی اعم از پتانسیل و جنبشی، بستگی دارد.

محققان متعددی مانند Schoklitsh (1928), Eggenberger, Jaeger (1939, Veronese 1937), (1944), Hartung (1957, Doddiah 1953), Chatterjee, Rajaratnam (1976), Breusers (1965), Farhodi & Smith, & Ghosh (1980~1994), Hassan & Mason (1985~1989), (1982~1985), Narayanan (1985), Bormann & Julien (1991), Balanchandar, Hoffmans (1998), Sakar & Dey (1997~2000), Hager & Ghodsian (2002~2006), (2003~2006), Minor (2006) بر روی این موضوع کار کرده‌اند. بیشتر روابط به صورت تجربی برحسب طیف محدود آزمایشهای مورد مطالعه تدوین شده که در برخی موارد در محدوده‌های دیگر یا شرایط واقعی خطای زیادی دارد. در این زمینه Mason (1985) و Hoffmans (1998) کار تعداد زیادی از محققان را جمع‌بندی کرده و تفاوتها را بررسی کرده‌اند. لذا در این خصوص با توجه به شرایط خاص آزمایش، ابتدا برای درک روند تغییرات ابعاد گودال، شکل فرسایش گودال تحت زوایای مختلف ۳، ۸/۸، ۱۳، ۱۸/۸، ۲۳ و ۲۸ درجه جهت سرریز سرسره‌ای ساده برای دیبهای مختلف ۶، ۱۰، ۱۵، ۲۰ و ۲۵ لیتر در ثانیه (مجموعاً ۳۰ حالت) برای دانه‌بندی $d_{50}=2.5\text{cm}$ شکل تشکیل گودال در حالت تعادل بررسی شد.

اگر چه مشخصات شروع حرکت ذرات به وسیله جریان آب، تعیین کننده کلی حمل رسوب نیست، اما نگاه دقیق

سانتیمتر ($\frac{1}{2}$ فوت) معرفی شده از طرف موسسه عمران آب امریکا (1987) USBR، برای جلوگیری از اثر زبری دیوار، را ارضا می‌کند. بنابراین در مجموع برای ۴۰ وضعیت مختلف آزمایش انجام شده است.

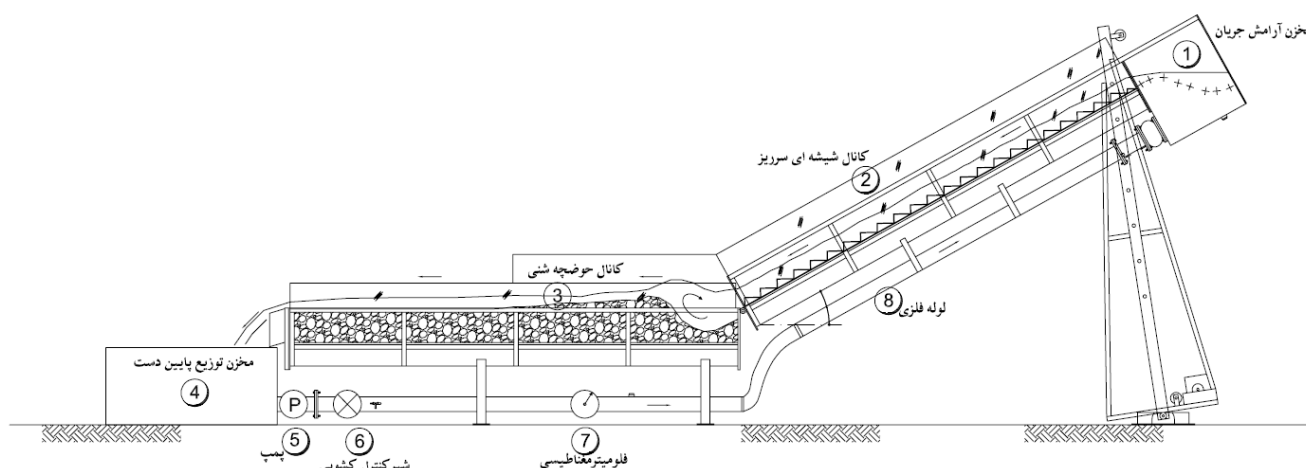
شکل ۴ طرحواره سیستم آزمایشگاهی کانال سرریز را نشان می‌دهد که شامل (۱) مخزن آرامش جریان در بالادست کانال، (۲) کانال شیشه ای سرریز به عرض ۲۰ سانتیمتر، طول ۴ متر و دیوارهای شیشه‌ای با ارتفاع ۵۰ سانتیمتر، (۳) کانال افقی حوضچه شنی به عمق ۳۰ سانتیمتر شن و ۴۰ سانتیمتر لبه آزاد در نیمه اول و ۲۰ سانتیمتر لبه آزاد در نیمه دوم پایین دست، عرض ۲۰ سانتیمتر و طول کلی ۴ متر، (۴) مخزن پایین دست کانال به ابعاد ۳/۵ متر در ۳ متر و عمق ۷۰ سانتیمتر با احتساب ۱۰ سانتیمتر لبه آزاد، (۵) پمپ سانتریفیوژ با قدرت آبدهی حداکثر ۶۰ لیتر در ثانیه در ارتفاع ۱۰ متر، (۶) شیر کنترل کشویی به قطر ۱۰ سانتیمتر (۴ اینچ)، (۷) دستگاه سنجش دبی مغناطیسی^۱ با دقت ۰/۱ لیتر در ثانیه، (۸) لوله فلزی انتقال به قطر ۱۰ سانتیمتر (۴ اینچ) به طول کلی ۱۱/۵ متر. کانال سرریز با تعبیه سیستم بالابر مکانیکی در ابتدا و لولای اتصال به کانال حوضچه شنی در انتها، امکان قرارگیری شیبهای مختلف را از ۵ درجه تا ۲۸ درجه با افق دارد. برای اندازه‌گیری عمق جریان در طول کانال سرریز و حوضچه شنی از عمق سنج ورنیر دیجیتال^۲ با دقت ۰/۱ میلی‌متر استفاده شده است.

به منظور اندازه‌گیری انرژی جریان ریزشی روگذر در پایین دست سرریز، از اندازه‌گیری ابعاد گودال فرسایشی پایین دست سرریز پلکانی استفاده شده است. در این راستا، نحوه استفاده از شکل گودال و ارتباط آن با انرژی جریان به وجود آورنده آن (کالیبره کردن)^۳ به شرح زیر است.

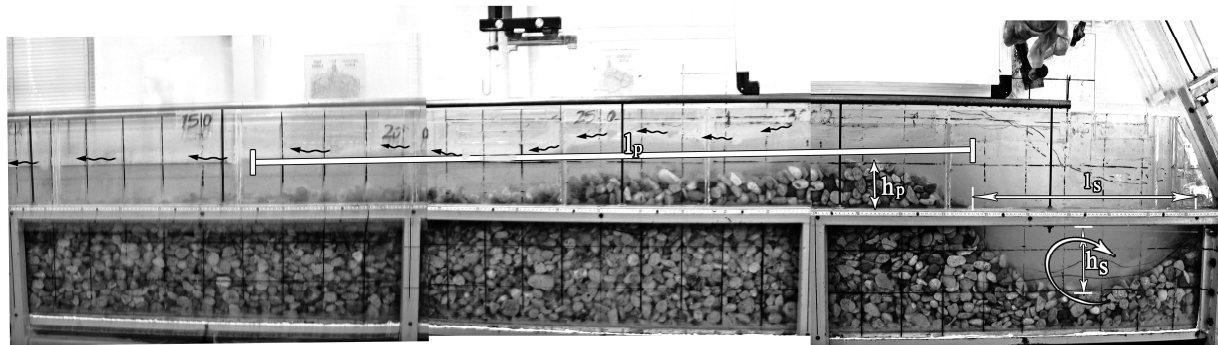
1. Magnetic Flow Meter
2. Digital Vernier Depth Gage
3. Calibration

به شکل حفره آب شستگی و شروع حرکت ذرات، ما را به وجود تشابه در نحوه عملکرد آب شستگی و شکل هندسی حفره آب شستگی هدایت می‌کند. پارامترهای مشخصه برای تعریف آب شستگی موضعی در پایاب سرریز در حالت تعادل نهایی (گسترش نهایی حفره) شامل عمق گودال h_s ، طول گودال آب شستگی l_s ، ارتفاع پشته بعد از گودال h_p و طول پشته L_p است (شکل ۵). در این خصوص تراز آب روی پشته بعد از گودال که خود متأثر از شرایط پایاب جریان است، در طول گودال و پشته نقش به‌سزایی دارد (فرهودی ۱۳۶۳، مردستی ۱۳۷۲ و Mason 1985, 1989). ارتباط ابعاد مشخصه گودال آب شستگی با مشخصه‌های تیغه جریان انتهایی سرریز

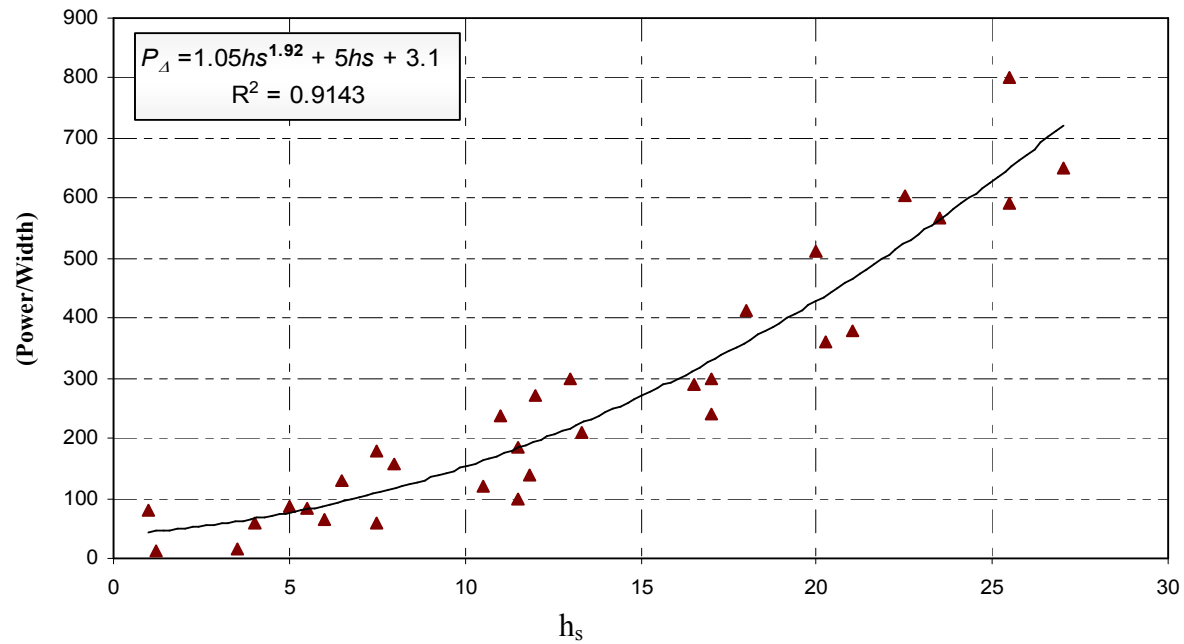
$$P_{\Lambda} = 1.05 h_s^{1.92} + 5.0 h_s + 3.1 \quad (16)$$



شکل ۴. سیمای شماتیک ساختار آزمایشگاهی کانال سرریز و حوضچه شنی پایین دست آن



شکل ۵ نحوه تشکیل گودال آب‌شستگی، بایمن دست سرریز در حوضچه شنی و ابعاد آن



شکل ۶ نمودار ارتباط بین عمق گودال آب شستگی با توان خروجی جریان از سرریز

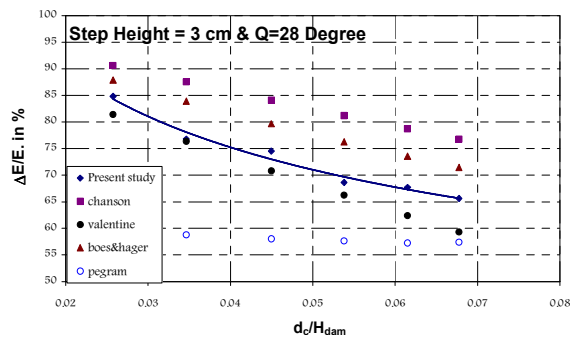
اندازه‌گیری q و H_t ، مقدار H_{res} بلندای باقیمانده جریان ریزشی در انتهای سرریز محاسبه شده است.

که P_Δ ، توان در واحد طول مورد نیاز برای ایجاد گودال آب شستگی در حالت تعادل نهایی به سانتیمتر است و از رابطه ۱۷ محاسبه می‌شود:

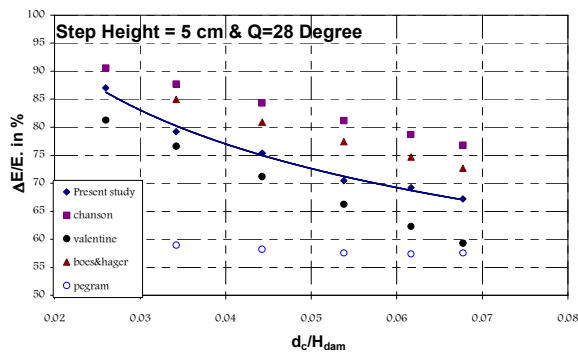
$$P_\Delta = \gamma q [H_{res} - H_t] \quad (17)$$

که H_{res} بلندای جریان ریزشی در انتهای سرریز و H_t بلندای جریان در پایین دست گودال فرسایشی است.

برای برآورد میزان انرژی باقیمانده در پایین دست سرریز پلکانی با توجه به رابطه فوق، برای هر یک از آزمایشها، پس از به تعادل رسیدن گودال آب شستگی حوضچه شنی^۱، پمپ خاموش می‌شد و پس از تخلیه آب از داخل سنگدانه‌ها، برداشت توپوگرافی گودال آب شستگی انجام می‌شد. سپس از روی عمق گودال h_s ، مقدار P_Δ محاسبه شده و از روی P_Δ از رابطه ۱۷، با

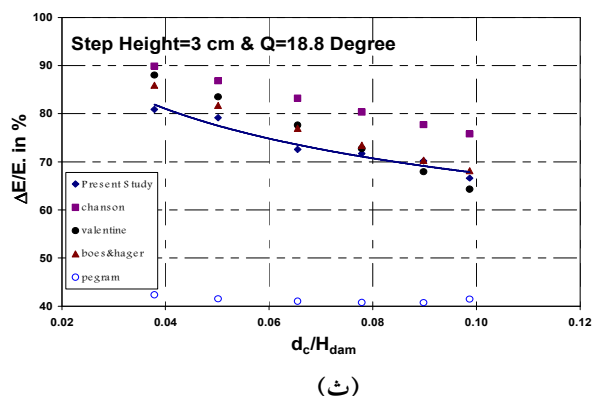
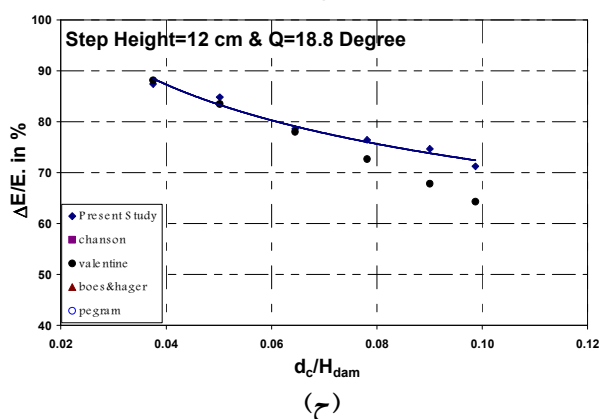
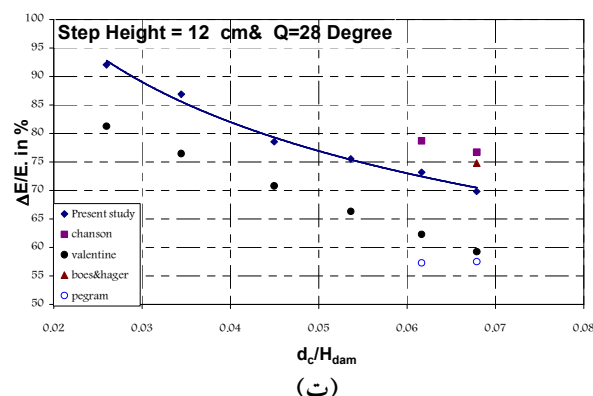
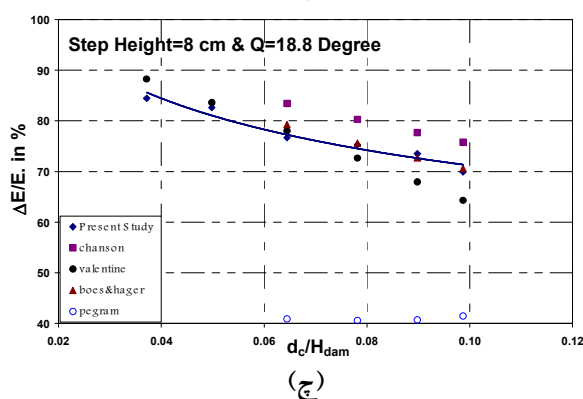
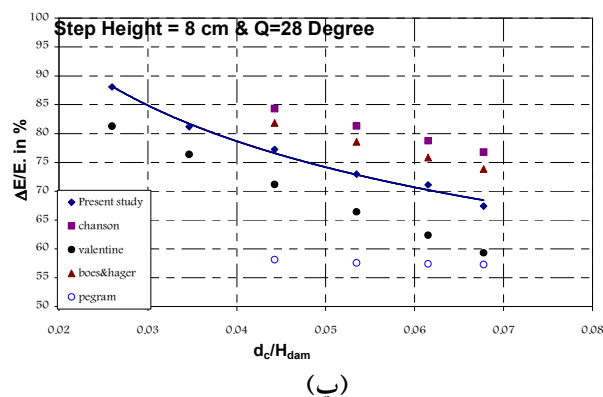
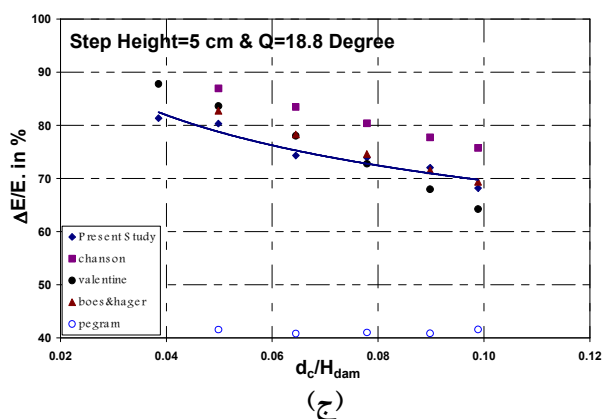


(الف)



(ب)

۱- منظور از به تعادل رسیدن فرسایش یعنی اینکه با گذشت زمان، دیگر خروجی سنگدانه از داخل گودال به روی پشته پایین دست وجود نداشته باشد. این زمان بر حسب میزان جریان و اندازه سنگدانه $d_{50}=2.5\text{cm}$ ، بین ۱۵ دقیقه تا ۳۰ دقیقه به طول انجامیده است.



شکل ۷ الف، ب، پ و ت نمودارهای مقایسه افت انرژی حاصل از مطالعات حاضر با روابط ارائه شده از سوی محققان مختلف

برای شیب ۲۸ درجه با افق و پلکانهای باخیز ۳، ۵، ۸ و ۱۲ سانتیمتر

ث، ج، چ و ح نمودارهای مقایسه افت انرژی حاصل از مطالعات حاضر با روابط ارائه شده از سوی محققان مختلف

برای شیب ۱۸/۸ درجه با افق و پلکانهای ، ۵، ۸ و ۱۲ سانتیمتر

درجه و چهار وضعیت مختلف خیز پلکان ۳، ۵، ۸ و ۱۲ سانتیمتر برای هر شیب در مقایسه با نتایج محاسباتی حاصل از روابط ارائه شده از سوی (Valentine (2004) و (Boes & Hager (2002 & 2003b) در شکل ۷ برای هر حالت در دبیهای مختلف ترسیم شده است. با توجه

۴- تجزیه و تحلیل نتایج آزمایشگاهی

با توجه به نتایج حاصل از مجموعه آزمایشها، میزان

استهلاک انرژی نسبی سرریز پلکانی $(\frac{\Delta E}{E})$ در مقابل

نسبت بدون بعد $(\frac{d_c}{H_{dam}})$ برای دو شیب ۱۸/۸ و ۲۸

(2002) و Valentine (2004) به ترتیب از تطابق مناسبتر، متوسط و دست بالا و متوسط دست پایین نسبت به نتایج اندازه گیری شده برخوردار هستند.

نتایج محاسباتی حاصل از کار Pegram et al. (1999) با توجه به روند محدود تغییرات و مقدار بسیار دست پایین، بین ۵۵ تا ۶۰ درصد را برای شیب ۲۸ درجه و حدود ۴۰ درصد را برای شیب ۱۸/۸ درجه، ارائه می کند که در مقایسه با روشهای دیگر، خطای زیادی دارد. بنابراین روش اندازه گیری افت انرژی به کمک پرش هیدرولیکی در پایین دست، باید مورد ارزیابی و بررسی دقیق تری قرار گیرد. در مقایسه، رابطه ارائه شده توسط Boes & Hager (2002 & 2003b) برای برآورد افت انرژی در حالت جریان سرسره غلشی مناسبتر است.

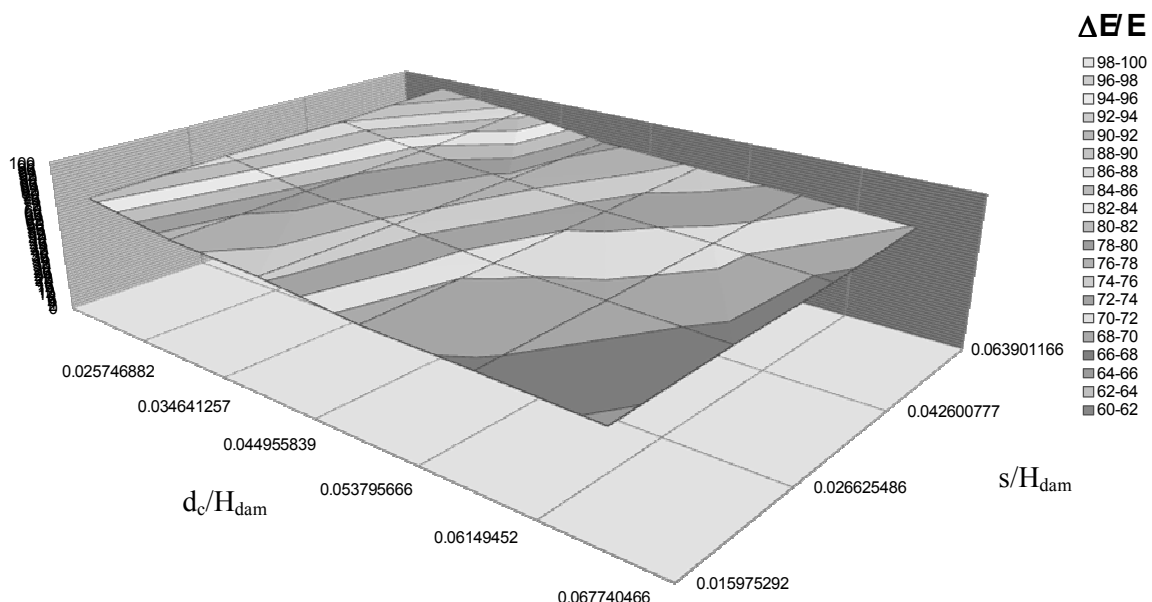
برای بررسی چگونگی تاثیر همزمان نسبت بدون بعد

$(\frac{d_c}{H_{dam}})$ و $(\frac{S}{H_{dam}})$ بر میزان استهلاك انرژی نسبی $(\frac{\Delta E}{E})$ ، نمودار سه بعدی شکل ۸ ترسیم شده است.

به روند تغییرات، با افزایش دبی جریان و به تبع آن افزایش نسبت بدون بعد $(\frac{d_c}{H_{dam}})$ ، میزان استهلاك انرژی بر روی سرریز پلکانی کاهش می یابد. در این روند، رابطه استهلاك انرژی (Chanson (2002, Boes & Hager (2002 & 2003b) و Valentine (2004) به ترتیب نتایج بیشتر به کمتر را نشان می دهند.

نتایج آزمایشگاهی حاضر عمدتاً بین نتایج محاسباتی حاصل از کار Valentine (2004) و Boes & Hager (2002 & 2003b) قرار می گیرد، که معمولاً به نتایج کار Boes & Hager بسیار نزدیکتر می باشد. با توجه به نمودارهای نتایج آزمایشگاهی، افت انرژی بین ۲ تا حداکثر ۵ درصد کمتر از نتایج محاسباتی کار Boes & Hager (2002 & 2003b) است، که برای حصول اطمینان برای طراحی سازه انرژی گیر پایین دست لازم است.

بنابراین بر طبق این ارزیابی، روابط افت انرژی کار Chanson ، Boes & Hager (2002 & 2003b)



شکل ۸ نمودار سه بعدی استهلاك نسبی انرژی $(\frac{\Delta E}{E})$ در مقابل نسبتهای بدون بعد $(\frac{d_c}{H_{dam}})$ و $(\frac{S}{H_{dam}})$

آستانه شروع جریان سرسره غلتشی را نشان می‌دهد. روابط تمامی محققان در جدول ۱ ارائه شده است. در ارزیابی حاضر رابطه (Yasuda, Ohtsu (2004) در زیر ارائه شده است.

$$\frac{d_c}{s} \geq \frac{7}{6} (\tan \theta)^{\frac{1}{6}} \quad \text{آستانه پایین دست سرسره غلتشی}$$

$$\frac{d_c}{s} \leq 1.4(1.4 - \tan \theta)^{-0.26} \quad \text{آستانه بالایی جریان افتان و خیزان}$$

(۱۸)

لازم است توضیح داده شود که روابط ارائه شده برای تفکیک حالت‌های مختلف جریان، روابطی تجربی و به دست آمده از نتایج آزمایشگاهی است.

یکی از مهمترین مواردی که در تفکیک حالت‌های جریان ریزشی روی سرریز مطرح می‌شود، مشکل اندازه‌گیری استهلاک جریان ریزشی روی سرریز، توسط دستگاه‌های اندازه‌گیری غلظت هوا در پایین دست سرریز به‌خصوص در جریان انتقالی به دلیل تلاطم شدید و پاشش نوسانی سطح آب و پراکندگی شدید ذرات آب در هوا است.

به همین دلیل در مقایسه با مطالعات انجام شده برای محاسبه افت انرژی در جریان سرسره غلتشی، مطالعات در زمینه محاسبه افت انرژی برای جریان افتان و خیزان بسیار کمتر و مطالعات مرتبط با محاسبه افت انرژی جریان انتقالی بسیار ناچیز در حد یک تا دو مقاله است.

در این آزمایش با توجه به عملکرد گودال آب‌شستگی در پایین دست سرریز، خوشبختانه امکان اندازه‌گیری انرژی باقیمانده جریان در پایین دست سرریز به راحتی میسر شده است، که این را می‌توان یکی از جنبه‌های مثبت این روش اندازه‌گیری دانست. نمودار میزان نسبی استهلاک انرژی جریان ریزشی در مقابل نسبت بدون بعد فرود زیر^۱ Fr (رابطه ۱۹) بدون لحاظ کردن شیب کلی سرریز در شکل ۹ ترسیم شده است.

$$Fr = \frac{q_w}{\sqrt{g \sin \theta k^3}} \quad (۱۹)$$

همانطور که در این شکل مشاهده می‌شود در $(\frac{d_c}{H_{dam}})$

کم، با افزایش $(\frac{S}{H_{dam}})$ ، میزان استهلاک انرژی نسبی سریعاً افزایش می‌یابد و جریان از حالت سرسره غلتشی به جریان افتان و خیزان تبدیل می‌شود. در حالی که هر چه $(\frac{d_c}{H_{dam}})$ بیشتر شود، اثر تغییرات $(\frac{S}{H_{dam}})$ در محدوده‌های پله‌های کوچک کمتر شده و به عبارت دیگر

در حالت جریان سرسره غلتشی با $(\frac{d_c}{S})$ زیاد، تاثیر ارتفاع پله در میزان کاهش استهلاک انرژی کاهش می‌یابد و بدین ترتیب زبری فرم بستر به تدریج از عمق پله مستقل می‌شود.

به اعتقاد Valentine (2004) این موضوع در

$$\left(\frac{H_{dam}}{d_c}\right) > 8$$

اتفاق می‌افتد. البته بر اساس نتایج

آزمایشگاهی حاضر به نظر می‌رسد که برای

$$15 \sim 20 > \left(\frac{H_{dam}}{d_c}\right) \text{ اتفاق می‌افتد.}$$

یکی از موارد مهم دیگری که در طی تحقیقات آزمایشگاهی بررسی شد، حالت‌های مختلف جریان تحت افزایش دبی سرریز از حالت افتان و خیزان (n) ، انتقالی $(n-t, s-t)$ و حالت سرسره غلتشی (s) است که در بررسی جامع جدول ۱ با نتایج کار محققان دیگری مانند Boes & Chanson (2002, 2003b), Hager (1997, 2004) و Chinnarasri & Wongwises (2006) مقایسه شده است.

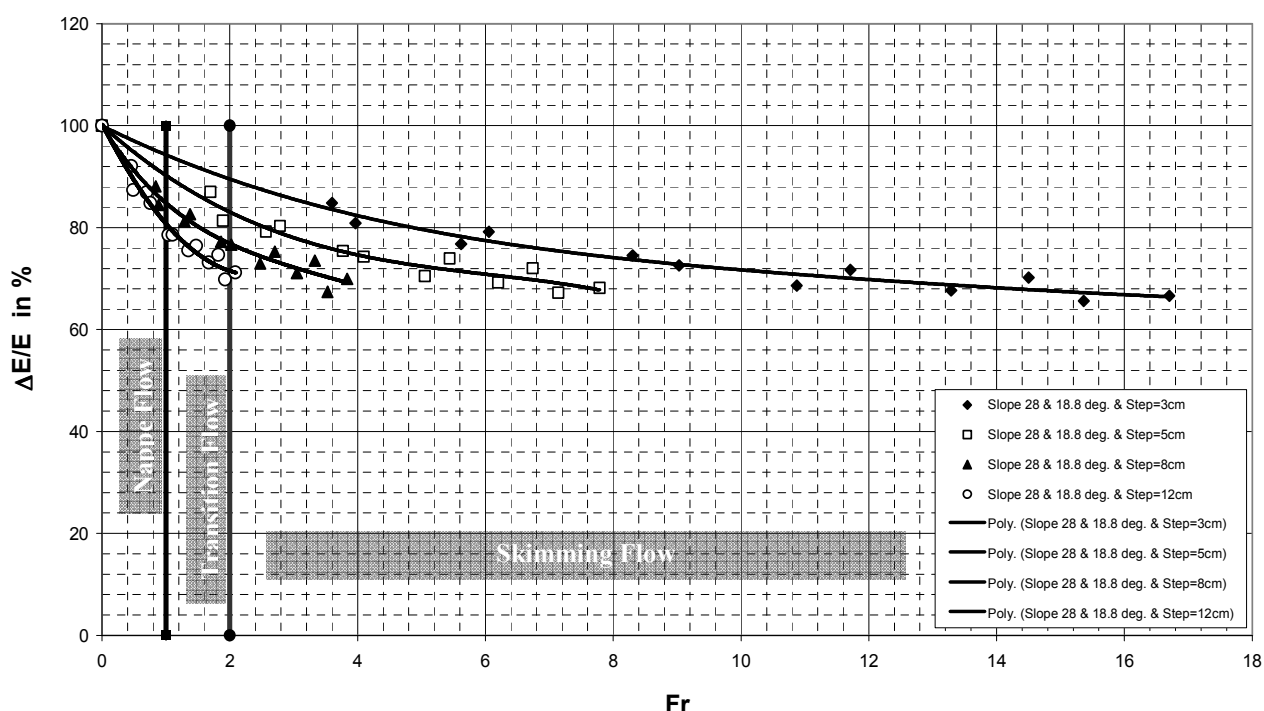
همانطور که در جدول ۱ مشاهده می‌شود، نتایج آزمایشگاهی با نتایج محاسباتی Yasuda, Ohtsu (2006) و Chinnarasri & Wangwises (2006) و Boes & Hager (2002, 2003b) و Chanson (2002) به ترتیب از مطابقت بیشتر به کمتر برخوردارند. البته نکته مهم آن است که رابطه Boes & Hager (2002) فقط

جدول ۱ مقایسه نتایج دیداری تفکیک حالت‌های مختلف جریان ریزشی در مقابل نتایج دیگر محققان

Situation	Run	Step Spillway Angle Q (Degrees)	s (m)	l (m)	Step	q (m ³ /s/m)	d _c (m)	k (m)	d _c /s	H _{dam} (m)	d _c /H _{dam}	Flow Type					Fr	
Number	Number				Number							Observed	Boes & Hager	Chanson	Yasuda & Ohutso	Chinnarasi & Wongwises		
1	1	28.00	0.03	0.056	63	0.033	0.048	0.026	1.612	1.8779	0.026	s	s	s	s	s	3.600	
	2					0.052	0.065		2.168		0.035	s	s	s	s	s	5.618	
	3					0.077	0.084		2.814		0.045	s	s	s	s	s	8.306	
	4					0.101	0.101		3.367		0.054	s	s	s	s	s	10.872	
	5					0.123	0.115		3.849		0.061	s	s	s	s	s	13.288	
	6					0.142	0.127		4.240		0.068	s	s	s	s	s	15.363	
2	7		0.05	0.094	38	0.034	0.049	0.044	0.976		0.026	s	s	t	s	s	1.696	
	8					0.051	0.064		1.285		0.034	s	s	s	s	s	2.564	
	9					0.075	0.083		1.662		0.044	s	s	s	s	s	3.770	
	10					0.101	0.101		2.020		0.054	s	s	s	s	s	5.053	
	11					0.123	0.116		2.315		0.062	s	s	s	s	s	6.199	
	12					0.142	0.127		2.544		0.068	s	s	s	s	s	7.140	
3	13		0.08	0.150	24	0.034	0.049	0.071	0.610		0.026	n	n	n	n	n	0.838	
	14					0.052	0.065		0.813		0.035	t	n	t	t	t	1.290	
	15					0.075	0.083		1.039		0.044	s	s	s	s	s	1.863	
	16					0.100	0.100		1.255		0.053	s	s	s	s	s	2.474	
	17					0.123	0.115		1.444		0.061	s	s	s	s	s	3.051	
	18					0.142	0.127		1.590		0.068	s	s	s	s	s	3.528	
4	19		0.12	0.226	16	0.034	0.049	0.106	0.407		0.026	n	n	n	n	n	0.456	
	20					0.051	0.065		0.539		0.034	n	n	n	n	n	0.696	
	21					0.077	0.084		0.704		0.045	t	n	t	t	n	1.038	
	22					0.100	0.101		0.839		0.054	t	s	t	t	t	1.353	
	23					0.123	0.116		0.965		0.062	s	s	t	s	s	1.667	
	24					0.143	0.127		1.062		0.068	s	s	s	s	s	1.926	
5	25	18.80	0.03	0.088	43	0.142	0.127	0.028	4.240	1.2891	0.099	s	s	s	s	s	16.703	
	26					0.123	0.116		3.859		0.090	s	s	s	s	s	14.502	
	27					0.100	0.100		3.347		0.078	s	s	s	s	s	11.711	
	28					0.077	0.084		2.814		0.065	s	s	s	s	s	9.030	
	29					0.051	0.065		2.155		0.050	s	s	s	s	s	6.053	
	30					0.034	0.049		1.626		0.038	s	s	s	s	s	3.968	
6	31		0.05	0.147	26	0.143	0.127	0.047	2.549		0.099	s	s	s	s	s	7.786	
	32					0.123	0.116		2.315		0.090	s	s	s	s	s	6.740	
	33					0.100	0.100		2.008		0.078	s	s	s	s	s	5.443	
	34					0.075	0.083		1.662		0.064	s	s	s	s	s	4.098	
	35					0.051	0.064		1.285		0.050	s	s	s	s	s	2.787	
	36					0.035	0.050		0.994		0.039	s-t	s	t	t	t	1.895	
7	37		0.08	0.235	16	0.142	0.127	0.076	1.590		0.099	s	s	s	s	s	3.836	
	38					0.123	0.116		1.447		0.090	s	s	s	s	s	3.330	
	39					0.100	0.101		1.259		0.078	s	s	s	s	s	2.702	
	40					0.075	0.083		1.039		0.064	s-t	s	s	s	s	2.025	
	41					0.051	0.064		0.803		0.050	t	n	t	t	t	1.377	
	42					0.033	0.048		0.599		0.037	n	n	n	n	n	0.886	
8	43		0.12	0.352	11	0.142	0.127	0.114	1.060		0.099	s-t	s	t	s	s	2.088	
	44					0.124	0.116		0.967		0.090	t	s	t	t	t	1.820	
	45					0.100	0.101		0.839		0.078	t	n	t	t	t	1.471	
	46					0.075	0.083		0.692		0.064	t	n	n	n	n	1.102	
	47					0.051	0.065		0.539		0.050	n	n	n	n	n	0.757	
	48					0.033	0.048		0.403		0.038	n	n	n	n	n	0.489	
نام محقق			Skimming Flow							Nappe/Flow								
			حداقل نسبت $\frac{d_c}{s}$ جهت تشکیل جریان افتان و خیزان							حداکثر نسبت $\frac{d_c}{s}$ جهت تشکیل جریان افتان و خیزان								
Boes & Hager (2003)			$\frac{d_c}{s} \geq 0.91 - 0.14 (\frac{s}{l})$															
Chansou (2002)			$\frac{d_c}{s} \geq 0.2 - 0.325 (\frac{s}{l})$							$\frac{d_c}{s} \leq 0.89 - 0.4 (\frac{s}{l})$								
Yasuda & Ohutso (1997-2004)			$\frac{d_c}{s} \geq \frac{7}{6} (\frac{s}{l})^{\frac{1}{6}}$							$\frac{d_c}{s} \leq 0.4(1.4 - \frac{s}{l})^{-0.26}$								
Chinnarasi & Wongwises (2006)			$\frac{d_c}{s} \geq 0.844 (\frac{s}{l})^{-0.53}$							$\frac{d_c}{s} \leq 0.927 - 0.388 (\frac{s}{l})$								

جهت اعداد فرود زبر بین ۱ تا ۲ جریان حالت انتقالی دارد و در نهایت برای اعداد فرود زبر بیش از ۲ جریان سرسره غلشی تشکیل می‌شود. نویسندگان در تحقیقات تکمیلی به دنبال تکمیل و تدقیق این موضوع با گردآوری نتایج خام آزمایشگاهی سایر محققان هستند.

نوسانات نقاط حول خط عبوری در هر خیز پله ناشی از اثر دو شیب در نظر گرفته شده سرریز است. نکته جالبی که در این تحقیقات مشاهده شد، ارتباط حالت‌های مختلف جریان ریزشی با عدد فرود زبر است. در این خصوص در طی آزمایش‌های مربوط مشاهده شد که جریان افتان و خیزان برای اعداد فرود زبر کمتر از ۱ تشکیل می‌شود و



شکل ۹ میزان نسبی استهلاک انرژی سرریز پلکانی اندازه‌گیری شده جهت چهار خیز پلکانی ۳، ۵، ۸ و ۱۲ سانتیمتری و دو شیب سرریز ۲۸ و ۱۸/۸ درجه در مقابل عدد فرود زیر Fr

عوامل مؤثر بر نحوه جریان ریزشی و استهلاک انرژی آن را پوشش می‌دهد.

این عدد بدون بعد، عدد فرود زیر ارتفاعی یا Fr^* نامیده می‌شود و در رابطه (۲۰) ارائه شده است:

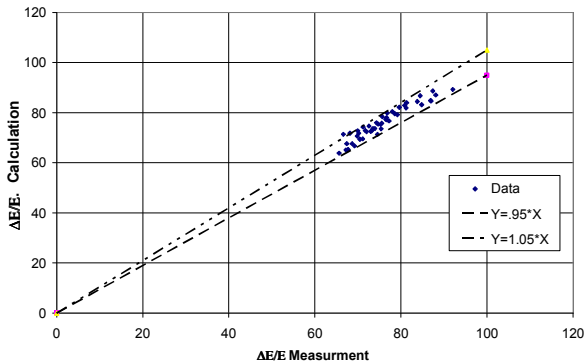
$$Fr^* = \frac{Fr}{\sqrt{\sin \theta N}} = \frac{q_w}{\sqrt{g \sin \theta} \sqrt{k^3 N}} = \left(\frac{q_w^2}{g \sin^2 \theta k^3 N} \right)^{0.5} \quad (20)$$

شیب سرریز θ به صورت $\sin \theta$ و اثر ارتفاع سد و خیز پلکان به صورت نسبت $N = \frac{H_{dam}}{s}$ ملحوظ شده است. با توجه به این نگرش، میزان استهلاک انرژی جریان ریزشی در مقابل عدد فرود زیر ارتفاعی برای هر دو شیب به صورت مجزا ترسیم و نتایج آن در شکل ۱۰ ارائه شده است.

چنانچه در شکل ۹ مشاهده می‌شود، شیب خط کاهش استهلاک انرژی در محدوده جریان افتان و خیزان بسیار بیشتر، در محدوده جریان انتقالی کمتر و در محدوده جریان سرسره غلشی بسیار کم می‌شود و در حقیقت بین سه حالت جریان با توجه به روش جدید اندازه‌گیری حاضر، نوعی انسجام و همبستگی وجود دارد.

این موضوع این دیدگاه را قوت می‌دهد که احتمالاً امکان ارائه رابطه‌ای کلی برای سه حالت جریان ریزشی وجود دارد.

در این راستا با محور قراردادن عدد فرود زیر با توجه به مشاهده ارتباط مناسب با میزان استهلاک انرژی جریان ریزشی بر روی سرریز پلکانی و همچنین وجود اثر نوسانی ناشی از اختلاف شیب سرریز θ ، و نیز وجود اثر بلندای کلی سرریز H_{dam} در بررسیهای بسیار، عدد ترکیبی بدون بعد جدیدی حاصل شد که تقریباً اثر تمامی

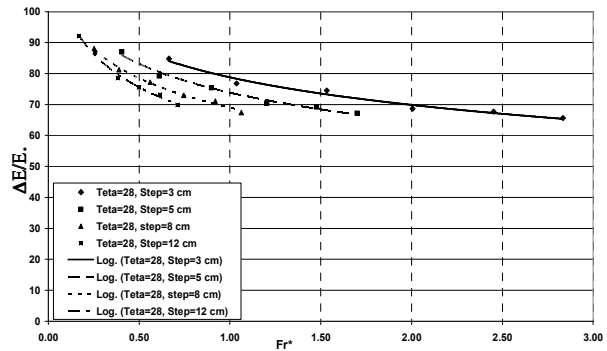


شکل ۱۱ نمودار تعیین دقت نتایج محاسباتی درمقابل نتایج آزمایشگاهی

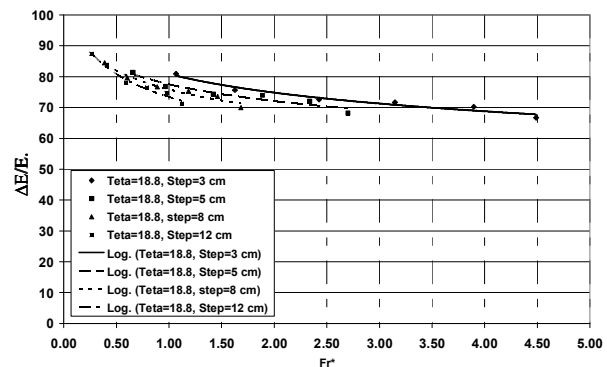
همانگونه که در این نمودار مشاهده می‌شود، خطای نتایج محاسباتی نسبت به نتایج اندازه‌گیری، برای درصدهای بالای استهلاك انرژی حداکثر در حد $\pm 5\%$ است که نتیجه قابل قبولی به شمار می‌رود. البته برنامه تحقیقاتی جدیدی مد نظر است که بتوان مجموعه آزمایشگاهی را در شیبهای تندتر ۴۰ و ۵۰ درجه و تخت تر ۱۰ درجه نیز با نگرش فوق مورد ارزیابی قرار داد.

۵- نتیجه‌گیری

در طی آزمایشهای انجام شده، نتایج حاصل با استفاده از روش جدید اندازه‌گیری عمق فرسایش گودال پایین دست با نتایج محاسباتی حاصل از کار دیگر محققان مقایسه شد. در مجموع نتایج کار (Boes & Hager, 2002, 2003b) از تطابق بیشتری برخوردار بود. بعد از ایشان کار (Chanson, 2002) با حدود ۳ تا ۷ درصد استهلاك انرژی بیشتری را برآورد می‌کند که البته در جهت عدم اطمینان برای سازه‌های پایین دست است. لذا با توجه به اینکه روش جدید اندازه‌گیری گودال فرسایشی، که نتایج آن در محدوده معنی دار نتایج کار محققانی که از طریق اندازه‌گیری غلظت هوا، انرژی پایین دست سرریز را اندازه گرفته‌اند، می‌باشد، این روش به عنوان یک روش جدید، ساده و قابل استناد می‌تواند بعنوان روش اندازه‌گیری انرژی جریانهای دو فازی رو باز مد نظر قرار گیرد.



الف) شیب سرریز ۲۸ درجه



ب) شیب سرریز ۱۸/۸ درجه

شکل ۱۰ نمودارهای میزان نسبی استهلاك انرژی سرریز پلکانی اندازه‌گیری شده در مقابل عدد فرود زیر ارتفاعی Fr^* برای چهارخیز پلکانی ۳، ۵، ۸ و ۱۲ سانتیمتری

به تبع این مهم با توجه به روند انحنای منحنیها نسبت به تغییرات ارتفاع خیز پلکان و شیب سرریز θ رابطه تجربی (۲۱) برای برآورد استهلاك انرژی در کل طیف جریان معرفی شده است.

$$\frac{\Delta E}{E} = \frac{H_{dam} - H_{res}}{H_{max}} \times 100 = 100 + \alpha \left[\exp\left(-\frac{Fr^*}{\beta}\right) - 1 \right]$$

که در آن:

$$\alpha = 2.97058 \quad \theta^{0.7811667}; \quad \theta \text{ in Degree} \quad (21)$$

$$\beta = \frac{1.34154}{\ln(s)}; \quad s \text{ in cm}$$

در نهایت برای تعیین دقت این فرمولبندی، نتایج محاسباتی فرمول فوق در مقایسه با نتایج اندازه‌گیری در نمودار شکل ۱۱ ترسیم شده است.

d_{10}	اندازه چشمه الکی که ۱۰٪ ذرات سنگدانه از آن عبور کند
d_{50}	اندازه چشمه الکی که ۵۰٪ ذرات سنگدانه از آن عبور کند
d_{60}	اندازه چشمه الکی که ۶۰٪ ذرات سنگدانه از آن عبور کند .
ΔE	تغییرات ارتفاع (بلندای) کل انرژی جریان
E	ارتفاع (بلندای) کل انرژی جریان
F	عدد فرود $(F = \frac{U_w}{\sqrt{g.L_e}})$
F_r	عدد فرود زبر $(F_r = \frac{q_w}{\sqrt{g \sin \theta k^3}})$
f	ضریب اصطکاک دارسی وایسباخ برای جریان غیرهوا دهی
f_e	ضریب اصطکاک دارسی وایسباخ برای مخلوط جریان روگذر آب و هوا
f_b	ضریب اصطکاک دارسی وایسباخ در مجاورت کف مجازی (سطح پوش لبه پلکانهای سرریز)
H_{dam}	ارتفاع سد یا سرریز سد
H_{max}	حداکثر ارتفاع (بلندای) انرژی جریان در آستانه بالادست سرریز سد نسبت به تراز کف پنجه سرریز $(H_{max} = H_{dam} + 1.5d_c)$
H_{res}	ارتفاع (بلندای) انرژی جریان در پایین دست سرریز سد (کل بلندای انرژی باقیمانده جریان در پای سرریز)
H_t	ارتفاع (بلندای) انرژی جریان در پایین دست گودال فرسایشی
h_s	عمق گودال آبشستگی
h_p	: ارتفاع پشته بعد از گودال
g	شتاب ثقل
k	ارتفاع (عمق) برجستگی پلکان عمود بر شیب کلی سرریز $(k = s \times \cos \theta)$

همچنین این روش، اندازه‌گیری انرژی باقیمانده در پایین دست سرریز جهت کلیه سه حالت جریان ریزشی را میسر می‌سازد. بر مبنای همین خصوصیت امکان ارائه یک فرمول تجربی جدید جهت ارزیابی استهلاك انرژی برای کل طیف جریان ریزشی میسر شده است، (رابطه ۲۱) که طی مقایسه با نتایج اندازه‌گیری گردیده از خطای خوب و قابل قبول کمتر از ۵ درصد برخوردار است.

همچنین با بررسی دیداری^۱ حالت‌های مختلف جریان ریزشی طی آزمایش‌های مختلف، ارتباط معنی داری بین سه حالت جریان ریزشی ۱- جریان افتان و خیزان ۲- جریان انتقالی ۳- جریان سراسره غلتشی و عدد فرود زبر (F_r) مشاهده گردیده که در همین برآورد محدوده اول برای اعداد فرود زبر کمتر از ۱ و حالت دوم برای اعداد فرود زبر بین ۱ تا ۲ و حالت سوم برای اعداد فرود زبر بیش از ۲ تشخیص داده شد. البته جهت تدقیق مرز تفکیکی عدد فرود زبر، این محققین، درصدد جمع آوری نتایج آزمایشگاهی کار دیگر محققین و ارزیابی نتایج خام آزمایشگاهی آنان می‌باشند.

۶- فهرست علائم

α	ضریب تصحیح انرژی جنبشی
C	غلظت مکانی هوا، که به صورت نسبت حجم هوا به واحد حجم مخلوط آب و هوا تعریف می‌شود
C_{mean}	غلظت متوسط هوای جریان که برحسب عمق متوسط گیری شده است.
D_h	قطر معادل هیدرولیکی جریان براساس عمق آب عاری از هوا
d_w	عمق معادل ارتفاع ستون آب خالص (عاری از هوا)
d_c	عمق بحرانی جریان

ISSN 1661-1179, Lausanne, Switzerland.

[2] Boes R.M., (2000a), "Scale effects in modelling two-phase stepped spillway flow", Proc. Int. Workshop on Hydraulics of Stepped Spillways, VAW, ETH Zurich, Minor, H.E., and Hager, W.H., (eds). Balkema, Rotterdam, pp. 53-60.

[3] Boes R.M. and Hager W. H., (2003a), "Two-phase flow characteristics of stepped spillways", ASCE Journal of Hydraulic Engineering, September 2003, pp. 661-670.

[4] Boes R.M. and Minor H.E., (2002), "Hydraulic design of stepped spillways for rec dams", Hydropower Dams, 9(33), pp. 87-91.

[5] Boes R.M., Hager W.H., (2003b), "Hydraulic design of stepped spillways", ASCE, Journal of Hydraulic Engineering, 129(9), September, pp. 671-679.

[6] Chamani M.R. and Rajaratnam N., (1994), "Jet flow on stepped spillways", Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, Vol. 120, No.2, pp. 273-283.

[7] Chamani M.R. and Rajaratnam, N., (1999), "Characteristics of skimming flow over stepped spillways", Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, Vol. 105, No. 4, pp. 361, 368.

[8] Chamani M.R., (2000), "Air inception in skimming flow regiment over stepped spillways", Proc. Int. Workshop on Hydraulics of Stepped Spillways, VAW, ETH Zurich, Minor, H.E., and Hager, W.H. (eds.). Balkema, Rotterdam, pp. 61-67.

[9] Chanson H., (1994), "Hydraulics of nappe flow regime above stepped chutes and spillways", Aust. Civil Engrg. Trans., I. E. Aus, Vol. CE36. No. 1 Jan, pp. 69-76.

[10] Chanson H., (2001), "Hydraulic design of stepped spillways and downstream energy dissipators", Dam Engineering, Vol. 11, No. 4, pp. 205-242.

[11] Chanson H. (2002), "The hydraulics of stepped chutes and spillways", Balkema ed., ISBN 90 5809 352 2.

[12] Chanson H. (2002a), "Enhanced energy dissipation in stepped chutes discussion", Proc Institution of Civil Engineering Water & Maritime Engineering UK, 154(4), pp. 343-345.

[13] Chanson H., (2002b), "Air-Water flow measurements with intrusive phase-detection probes. Can we improve their interpretation?" Journal of Hydraulic Engineering, ASCE,

l طول کف پله های سرریز پلکانی

l_s طول گودال آب شستگی

l_p طول پشته

N تعداد پله های سرریز پلکانی

P_Δ توان جریان در واحد عرض مورد نیاز جهت ایجاد گودال آبشستگی به عمق h_s

q دبی جریان در واحد عرض

q_w دبی در واحد عرض

θ زاویه شیب عمومی سرریز نسبت به افق

Re عدد رینولدز ($Re = \frac{LU_w}{\nu}$)

S شیب عمومی سرریز ($S = \frac{s}{l} = \tan \theta$)

S_f شیب خط انرژی جریان بر روی سرریز

s ارتفاع (خیز) پله های سرریز پلکانی

U مولفه افقی سرعت

U_w سرعت متوسط جریان روگذر عاری از هوا

u' تلاطم جریان در راستای حرکت غالب جریان

V مولفه قائم سرعت

v' تلاطم جریان در راستای عمود بر حرکت غالب جریان

We عدد وبر ($We = \frac{\rho U_w^2 L}{\sigma}$)

Y عمق کل جریان روگذر عمود بر شیب سرریز (مخلوط آب و هوا)

Y_{90} عمق جریان روگذر عمود بر شیب سرریز در نقطه ای که غلظت هوا ۹۰ درصد باشد ($C=90\%$)

۷- منابع

[1] André Stéphanie, (2004), "High velocity aerated flows on stepped chutes with macro-roughness elements", Communication 20, Laboratoire de Constructions Hydrauliques Ecole Polytechnique Federale de Lausanne,

- [24] Matos J., Pinheiro A.N., Frizell K.H. and Quintela A.C., (2001), "On the role of stepped overlays to increase spillway capacity of embankment dams", Proceedings ICOLD European Symposium-Dams in a European Context, NNCOLD, G. H. idttommm, B. Honningsvag, K. Repp, K. Vaskinn e T. Westernen (eds), pp. 473-483.
- [25] Matos J., (2005, in review), "Air entrainment and flow resistance in skimming flow over steeply sloping stepped spillways", Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, under review.
- [26] Mason P.J., (1989), "Effects of air entrainment on plunge pool scour", Journal of Hydraulic Engineering, Vol.115, No.3, pp. 385-399.
- [27] Mason P.Y., Arumugam K., (1985), "Free jet scour below dams and flip buckets", Journal of Hydraulic Engineering, Vol.111, No.2, pp. 220-235.
- [28] Ohtsu I. & Yasuda, Y., (1997), "Characteristics of Flow Conditions on Stepped channels", Proc. 27th IAHR Congress, theme D, San Francisco, USA, pp. 583-588.
- [29] Pegram G., Officer A. and Mottram S., (1999), "Hydraulics of skimming flow on modelled stepped spillways", Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, 125(4), pp. 361-368.
- [30] Peruginelli A., Pagliara S., (2000), "Energy dissipation comparison among stepped channel, drop and ramp structures", Proc. Int. Workshop on Hydraulics of Stepped Spillways, VAW, ETH Zurich, Minor, H.E., and Hager, W.H., (eds). Balkema, Rotterdam, pp. 111-118.
- [31] Peyras L., Royet P. and Degoutte G., (1992), "Flow and energy dissipation over stepped gabion weirs", Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, Vol, 118, No.5, May, pp. 233-251.
- [32] Pinheiro A.N., Fael C.S., (2000), "Nappe flow in stepped channels – occurrence and energy dissipation", Proc. Int. Workshop on Hydraulics of Stepped Spillways, VAW, ETH Zurich, Minor, H.E., and Hager, W.H., (eds.). Balkema, Rotterdam, pp. 119-126.
- [33] Rajaratnam N., (1990), "Skimming flow in stepped spillways", Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, Vol. 116, No.4, pp. 52-79.
- Vol. 128, No. 3, pp. 252-255 .
- [14] Chanson H. and Gonzalez C.A., (2005), "Physical modelling and scale effects of air-water flows on stepped spillways", Journal of Zhejiang University Science, Vol. 6A, No.3, pp. 243-250.
- [15] Chanson H. and Gonzalez C. A. (2004), "Stepped spillways for embankment dams, review, progress and development in overflow hydraulics", International conference on Hydraulic of Dams and River Structures, Tehran, Iran, F. Yazdandoost and J. Attari Eds., Balkema, pp. 287-294.
- [16] Chow V.T., (1959), "Open-channel hydraulics", Mc Graw-Hill, Inc., ISBN 07-010776-9.
- [17] Christodoulou G.C., (1993), "Energy dissipation on stepped spillways", Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, Vol. 119, No. 5, pp. 273-287.
- [18] Frizell K.H., Matos J. and Pinheiro A.N., (2000), "Design of concrete stepped overlay protection for embankment dams", Proc. Intl. Workshop on Hydraulics of Stepped Spillways, Minor, H.E., and Hager, W. H., (eds.), Zurich, Switzerland, pp. 179-186.
- [19] Gonzales C.A. and Chanson H., (2004a), "Scale effects in moderate slope stepped spillways experimental studies in air-water flows", The Institution of Engineers 8th Annual Conference on Hydraulics in Water Engineering, Australia, July 13-16, 2004, pp. 922-937.
- [20] Gonzales C.A. and Chanson H., (2005), "Experimental study of turbulence manipulation in stepped spillways", "Implications on flow resistance in skimming flows", Proceedings of the 31st IAHR Congress, Seoul, Korea, September 11-16, pp. 152-467.
- [21] Hoffmans G.J.C.M. (1998), "Jet scour in equilibrium phase", Journal of Hydraulic Eng., Vol. 124, No.4, April, pp. 430-437.
- [22] Matos J. and Quintela A., (1995b), Discussion of "Jet flow on stepped spillways", by M.R. Chamani and N. Rajaratnam, Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, Vol. 121, No. 5, May.
- [23] Matos J., (2000), "Hydraulic designing of stepped spillways over rcc dams", Proc. Int. Workshop on Hydraulics of Stepped Spillways VAW, ETH Zurich, Minor, H.E., and Hager, W.H., (eds), Balkema, Rotterdam, pp. 187-194.

- [38] U.S. Department of Interior Bureau of Reclamation, (1987), "Hydraulic model studies of upper stillwater dam stepped spillway and outlet works", REC-ERC-87-6.
- [39] فرهودی، جواد، «نیمرخ طولی آب شستگی موضعی در پایین دست حوضچه‌های آرامش»، مجله آب شماره ۲، سال ۱۳۶۳ ص. ۱۱ تا ۳۶.
- [40] مردشتی، اسداله، «بررسی روشهای طرح و آنالیز سدهای انحرافی بتنی و تدوین یک بسته نرم افزاری مناسب»، پایان نامه کارشناسی ارشد دانشگاه شیراز- دانشکده مهندسی- بخش راه و ساختمان سال ۱۳۷۲.
- [34] Sorensen R. M., (1985), "Stepped spillway hydraulic model investigations", Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, Vol. 111, No. 12, December, pp. 170-188.
- [35] Stephenson D., (1991), "Energy dissipation down stepped spillways", International Water Power and Dam Construction, Vol. 43, September, pp. 601-615.
- [36] Valentine G., Volkart P.U. and Minor H.E., (2004), "Energy dissipation along stepped spillways", International conference on Hydraulic of Dams and River Structures, Tehran, Iran, F. Yazdandoost and J. Attari Eds., Balkema, pp. 359-370.
- [37] Yasuda Y. and Ohtsu I., (1999), "Flow resistance in skimming flow in stepped channels", Proceedings, 28th IAHR Congress, Graz, Austria, H. Bergmann, R. Krainer and H. Breinhalt (eds). Theme B14 (CD-ROM), pp. 333-359.