

بررسی آزمایشگاهی پارامترهای هیدرولیکی سرریز نعل اسبی مدرن

وحید حسن زاده وایقان^{۱*}، میرعلی محمدی^۲، فرزین سلماسی^۳، علی حسین زاده دلیر^۴، محمد مناف پور^۵

۱- دانشجوی دکتری عمران- سازه‌های هیدرولیکی، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه ارومیه

۲و۵- دانشیار و استادیار گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه ارومیه

۳و۴- دانشیار و استاد گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز

V.Hasanzadeh@Urmia.ac.ir

تاریخ دریافت: [۹۳/۱۱/۲۳]

تاریخ پذیرش: [۹۴/۱۰/۲۷]

چکیده- سرریزهای نعل اسبی مدرن ترکیبی از دو سرریز بیرونی و داخلی است و تعیین پارامترهای هیدرولیکی این نوع سرریزها در طراحی آنها ضروری است. در این پژوهش با ساخت مدل فیزیکی سرریز نعل اسبی در ابعاد آزمایشگاهی به بررسی مشخصات هیدرولیکی سرریزهای "نعل اسبی مدرن" از جمله ضریب دبی، پروفیل جریان و دبی عبوری از سرریز بیرونی و داخلی پرداخته شده است. نتایج این پژوهش نشان داد که ضریب دبی سرریز داخلی (C_D) با افزایش نسبت هد به طول سرریز بیرونی (L_w) برای $L_w \geq 112$ سانتی‌متر، به صورت خطی افزایش می‌یابد. با افزایش نسبت دبی سرریز بیرونی به دبی سرریز داخلی $\frac{Q_1}{Q_2}$ ، ضریب دبی روند کاهشی مابین $0/3$ الی $0/65$ دارد. با افزایش L_w میزان دبی عبوری از سرریز بیرونی افزایش و از سرریز داخلی کاهش می‌یابد. سرریز بیرونی با طول 100 سانتیمتر دارای عملکرد مناسب‌تری نسبت به سایر L_w ها بوده و در صورت انتخاب آن، به طور میانگین 31 درصد جریان از سرریز داخلی عبور خواهد نمود. سرریزهای نعل اسبی کلاسیک و مدرن قادر هستند هد روی سرریز را به ترتیب به مقدار 28 و 50 درصد نسبت به هد سرریز مستطیلی هم عرض کاهش دهند. بررسی پروفیل سطح آب نشان می‌دهد که با ایجاد سرریز داخلی، پرش دم خروسی که در سرریز نعل اسبی کلاسیک به وجود می‌آمد، از بین می‌رود.

واژگان کلیدی: سرریز نعل اسبی مدرن و کلاسیک، ضریب دبی، سرریز داخلی، مدل فیزیکی.

۱- مقدمه

از انواع سرریزهای غیرخطی در پلان می‌توان به سرریزهای گل مروارید، سرریز کنگره‌ای مثلثی (شکل ۱-الف)، کنگره‌ای مستطیلی، نیم دایره، سرریز پره‌ای، سرریز نوع Y، سرریز کلید پیانو، سرریز نوک اردکی و سرریز نعل اسبی کلاسیک (شکل ۱-ب) اشاره نمود.

از مزایای این سرریزها در مقایسه با سایر سرریزهای استاندارد (به ازای هد ثابت) می‌توان به عبور مقدار جریان زیاد با تغییرات ناچیز هد آب عبوری از روی سرریز، امکان افزایش طول موثر هیدرولیکی سرریز برای عرض محدود جریان، فراهم کردن کمینه نوسان جریان از دهانه آبگیر کانال، قابلیت بالای این سرریزها در هوادهی جریان و عدم وقوع استغراق تا

هدهای خیلی زیاد اشاره نمود.

سرریزهای نعل اسبی کلاسیک سرریزهایی است که جریان از سه وجه آن (راست، چپ و مقابل) وارد سازه شده و به پایین دست منتقل می‌شود (شکل ۱-ب). از این نوع سرریزها می‌توان در مناطقی که به دلیل محدودیت ساختگاه سد، تونل و آبگیر نیروگاه و دیگر سازه‌ها در مجاورت بدنه سد ساخته می‌شود استفاده کرد و صرفه اقتصادی مناسبی را با کاهش حجم حفاری مربوط به سازه‌ها ایجاد نمود. در این نوع سرریزها جریان ریزشی به سمت داخل سرریز حرکت نموده و در محور وسط سرریز به جریان‌هایی که از وجه‌های مختلف سرازیر می‌شوند، برخورد می‌نماید و باعث به وجود آمدن پرش دم خروسی می‌شود (شکل ۱-ب و شکل ۴-الف).



Fig. 2. Khoda-Afarin dam a: Plan view b: Modern horseshoe spillway and hydroelectric power plant intake (Ref.: www.Taminrah.com)

با توجه به آنکه سرریز نعل اسبی جزو سرریزهای غیر خطی در پلان است برای بررسی منابع به بررسی پژوهش‌های انجام گرفته در خصوص سرریزهای کنگره‌ای پرداخته می‌شود. سابقه ساخت و استفاده از سرریزهای کنگره‌ای به قبل از سال ۱۹۲۰ بر می‌گردد. تیلور (۱۹۶۸) نخستین کسی بود که مطالعاتی را در زمینه سرریزهای کنگره‌ای با تاج لبه تیز انجام داد. نتایج مطالعات هی و تیلور (۱۹۷۰) در زمینه سرریزهای کنگره‌ای کامل‌ترین مجموعه بود. دارواس (۱۹۷۱) تعداد زیادی از نتایج مطالعات مدل سدهای ورونا و آن را برای تشکیل تعدادی از منحنی‌های طراحی استفاده نمود. میر (۱۹۸۰) آزمایش‌هایی را برای مطالعه عوامل موثر بر دبی تخلیه سرریزهای کنگره‌ای در پروژه فری-بارتلس انجام داد. اداره عمران آمریکا^۱ (۱۹۸۴) مدل‌های زیادی را برای سرریز سدهای یو-تی-ای و هایدروم استفاده کردند.

کاتسوریا (۲۰۰۵) پارامترهای موثر در عملکرد سرریزهای کنگره‌ای را در کتابش ارائه نمود که عبارت بودند از: نسبت هد بر ارتفاع سرریز، بزرگ‌نمایی جریان، نسبت بزرگ‌نمایی، زاویه دیواره هادی، نسبت ابعاد عمودی، تعداد سیکل‌ها، شکل مقطع تاج، شرایط جریان در کانال تقرب و کارایی. فالوی (۲۰۰۳) برای محاسبه دبی سرریزهای کنگره‌ای از رابطه (۱) استفاده نموده است.

$$Q = C_T \cdot L \cdot \frac{2}{3} \cdot \sqrt{2g} \cdot h^{1.5} \quad (1)$$

که در آن Q دبی، h هد یا بار آبی طراحی سرریز، g شتاب

شکل ۱- الف- سرریز کنگره ای مثلثی ب- سرریز نعل اسبی کلاسیک و پرش دم‌خروسی در آن (www.evn.co.za)

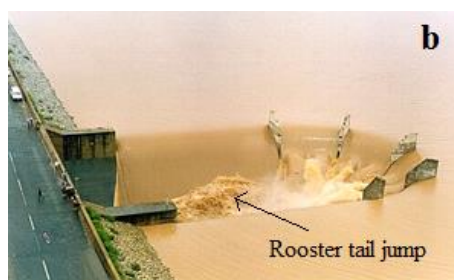


Fig. 1. A triangular labyrinth spillway, b: A classic horseshoe spillway (Ref. www.evn.co.za).

چنانچه در ساخت سدی مدنظر باشد که چند سازه هیدرولیکی مختلف در یک سازه تجمیع شود مانند تجمیع سازه سرریز و آبگیر نیروگاه، می‌توان از سرریز نعل اسبی مدرن استفاده کرد تا از مجرای ایجاد شده برای آبگیری نیروگاه بهره برده و جریان آب را از وجه‌های دیگری علاوه بر سه وجه گفته شده برای سرریز کلاسیک وارد سرریز نموده و ظرفیت گذر دهی آن را بالا برد. در این مقاله برای سرریز نعل اسبی مدرن، سه وجه داخلی با عنوان سرریز داخلی و سه وجه بیرون با عنوان سرریز بیرونی نامگذاری شده است که در (شکل ۲- الف و ۲- ب) اجزای یاد شده برای سرریز سد خداآفرین قابل مشاهده است.

شکل (۲) الف- نمای بالا ب- نمای پایین سازه واحد سرریز نعل اسبی مدرن و آبگیر نیروگاه در سد خداآفرین (www.taminrah.com)



Duct for hydropower plant's intake and Internal weir

ثقل، L طول سرریز و C_T ضریب دبی است.

کرکستون (۲۰۱۰) ضریب دبی سرریزهای کنگره‌ای را با استفاده از مدل فیزیکی بررسی نمود. پژوهش وی روی سرریز کنگره‌ای با زاویه هادی بین ۶ الی ۳۵ درجه و با تاج نیم دایره و ربع دایره انجام گرفت و نتایج گویای آن بود که سرریز کنگره‌ای با تاج نیم دایره عملکرد هیدرولیکی بهتری را در شرایط $H_T/P > 0.4$ ارائه می‌دهد که در آن H_T هد روی سرریز و P ارتفاع سرریز است.

کایا و همکاران (۲۰۱۱) به بررسی آزمایشگاهی سرریزهای جانبی نیم بیضوی در پلان پرداختند. هدف آنها پژوهش بررسی آثار هیدرولیکی سرریز نیمه بیضوی به منظور افزایش ظرفیت تخلیه سرریزها بود. ایشان مطالعه آزمایشگاهی جامعی شامل ۶۷۷ آزمایش انجام دادند. نتایج آزمایش برای پیدا کردن تأثیر طول بی‌بعد سرریز L/B ، طول موثر بی‌بعد L/l ، ارتفاع بی‌بعد سرریز p/h_1 ، شعاع بی‌بعد بیضی b/a ، و عدد فرود بالادست F_1 روی ضریب دبی مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت که در آنها L عرض سرریز جانبی، B عرض کانال، l طول تاج سرریز، h_1 ارتفاع جریان در بالادست سرریز جانبی و a و b به ترتیب بزرگترین و کوچکترین میزان شعاع تاج در پلان است. نتایج آنها گویای این بود که ضریب دبی سرریز نیم بیضوی بزرگتر از سرریزهای کلاسیک جانبی است. آنها همچنین، معادله قابل اعتمادی برای محاسبه ضریب دبی سرریز نیمه بیضوی، ارائه نمودند. آیدین (۲۰۱۱) به شبیه‌سازی عددی جریان روی سرریزهای کنگره‌ای جانبی پرداخته است. ایشان برای شبیه‌سازی سطح آزاد جریان زیر بحرانی در سرریزهای کنگره‌ای با پلان مثلی از روش حجم سیال^۱ استفاده کرد. برای شبیه‌سازی جریان از نرم‌افزار دینامیک سیالات محاسباتی^۲ فلوئنت بهره گرفت.

تیواری و شاروا (۲۰۱۵) به بررسی روش‌های بهبود توانایی هیدرولیکی سرریزها پرداختند و بدین منظور با استفاده از مدل فیزیکی سرریز، دبی‌های مشخصی را در یک فلوم آزمایشگاهی

از روی سرریز اوجی معمولی گذرانده و سپس با جایگذاری سرریز کلید پیانوی (PKW^3) هم عرض سرریز معمولی، دبی‌های گفته شده را از این سرریز نیز گذرانده و هد روی سرریز (h) در دبی ثابت را با هم مقایسه نمودند. نتایج آنها گویای آن بود که کاهش هد روی سرریز در سرریز PKW نسبت به سرریز معمولی برای دبی‌های پایین زیاده‌تر از دبی‌های بالا است. همچنین نتایج آنها نشان می‌داد که برای همه شرایط این کاهش هد بیش از ۷۰ درصد است.

حیدرپور و همکاران (۱۳۸۵) به بررسی سرریزهای چند وجهی با پلان مستطیلی و U شکل پرداختند. نتایج پژوهش آنها نشان داد که افزایش طول موازی با جهت جریان در سرریزهای چند وجهی باعث کاهش ضریب دبی و افزایش طول عمود بر جهت جریان باعث افزایش آن می‌شود. بازرگان و مهران (۱۳۸۶) نیز به بررسی پارامترهای موثر روی ضریب دبی سرریزهای کنگره‌ای با پلان نیم دایره با استفاده از مدل آزمایشگاهی پرداختند. آنها از آزمایش‌های خود نتیجه گرفتند که در سرریزهای دایروی با افزایش دبی کاهش کارایی وجود دارد. همچنین مشخص شد این سرریزها به لحاظ هوادهی به مراتب کاراتر از سرریزهای مستقیم و خطی است.

بیشتر پژوهش‌های انجام گرفته در رابطه با سرریزهای غیر خطی، در زمینه سرریزهای کنگره‌ای بوده است ولی در خصوص سرریزهای نعل اسبی اطلاعات چندانی در منابع ارائه نشده و تنها به معرفی سرریزهای مشابه، از جمله سرریز U شکل و سرریز نوک منقاری بسنده شده است پس در این پژوهش سعی شده است برای برآورد پارامترهای هیدرولیکی سرریزهای نعل اسبی مدرن، با ساخت مدل هیدرولیکی و انجام آزمایش روی سرریز نعل اسبی مدرن و با برقراری دبی‌های متفاوت از روی سرریز به بررسی مشخصات هیدرولیکی از جمله ضریب دبی، مقدار هد روی سرریز و مشخصات جریان در قسمت‌های مختلف سرریز پرداخته شود. در این پژوهش با استفاده از آنالیز ابعادی، عوامل موثر در ضریب دبی شناسایی و نتایج بدست آمده از آزمایش‌ها با ارائه شکل‌های بی‌بعد تجزیه

^۱ VOF

^۲ CFD

^۳ Piano Key Weirs

در شکل ۴-ب). این سرریز در پلان از یک ناحیه قوس دار و دو خط موازی تشکیل شده است. طول و شعاع قسمت قوس-دار به ترتیب برابر ۷۴ و ۲۳ سانتی متر است. همچنین شیب کف سرریز برابر ۰/۰۳۶ درصد در نظر گرفته شد. ارتفاع دیواره در ابتدای سرریز برابر ۱۵ سانتی متر و در محل اتصال به دیواره انتهایی مخزن برابر ۱۷ سانتی متر انتخاب شد.

شکل ۴-الف: تصویر جریان گذرنده از سرریز نعل اسبی کلاسیک و پرش دم خروسی ایجاد شده در آن ب: مشخصات هندسی سرریز نعل اسبی کلاسیک (ابعاد بر حسب سانتی متر)

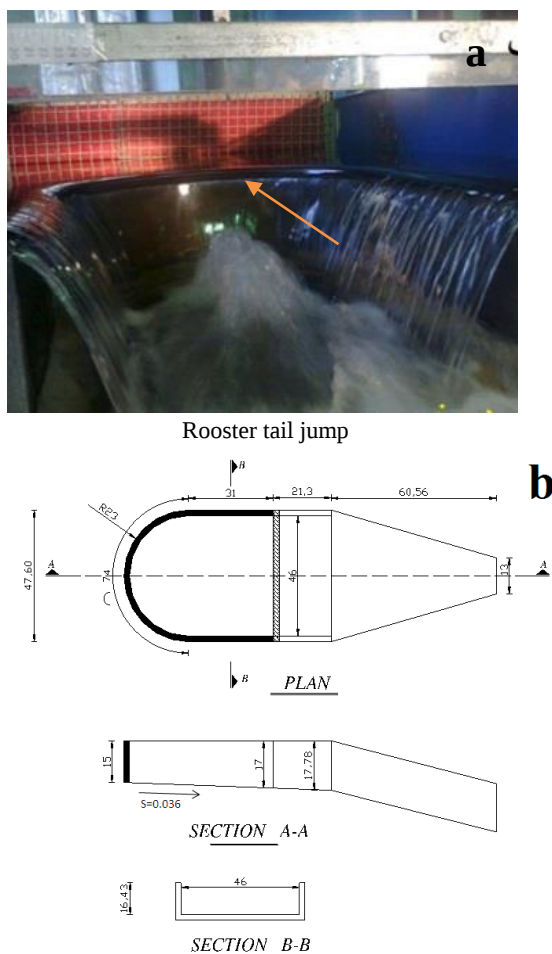


Fig. 4- A: Geometrical characteristics (cm) and B: picture of the flow passing in classic horseshoe spillway

پس از انجام آزمایش‌ها روی سرریز کلاسیک با ایجاد مجرای هم شکل سرریز کلاسیک (پلان) در کف با مقیاس $\frac{1}{2.5}$ سرریز بیرونی و نصب دیواره برای مجرای فوق، سرریز "نعل اسبی مدرن" تشکیل و آزمایش‌های مورد نظر روی آن انجام گرفت (شکل ۵).

و تحلیل شده‌اند. همچنین به منظور بررسی تأثیر طول تاج سرریز بیرونی بر ضریب دبی سرریز داخلی، آزمایش‌هایی صورت گرفت و نتایج آن ارائه شد.

۲-شرح مسأله

آزمایش‌های این پژوهش در آزمایشگاه هیدرولیک گروه مهندسی آب دانشگاه تبریز انجام گرفت که سیستم تأمین آب آن از یک مخزن زیرزمینی، یک پمپ با قدرت ۱۰۰ اسب بخار با بیشینه دبی ۶۰ لیتر بر ثانیه و مخزن استوانه‌ای تشکیل شده که آب به وسیله پمپ از مخزن زیرزمینی به مخزن استوانه‌ای هدایت می‌شود. مخزن استوانه‌ای دارای سطح آزاد بوده و یک سرریز در داخل آن سطح آب را کنترل می‌کند و در طول آزمایش‌ها ارتفاع آب درون مخزن استوانه‌ای مقدار ثابتی است. مخزن اصلی مدل به شکل مکعب مستطیل بوده و دارای ابعاد $1/8 \times 1 \times 1/2$ متر است (شکل ۳). تراز قرارگیری کف سرریز در ابتدا $0/8$ متر بالاتر از کف مخزن است. در بالادست مخزن (ورودی جریان) ناحیه آرام کننده جریان قرار دارد. این ناحیه به شکل مکعب مستطیل و با ابعاد $0/1 \times 1/2 \times 1$ متر است.

شکل ۳- جانمایی مخزن استوانه‌ای، مخزن اصلی، مدل فیزیکی سرریز و آرام کننده جریان در ورودی مخزن اصلی

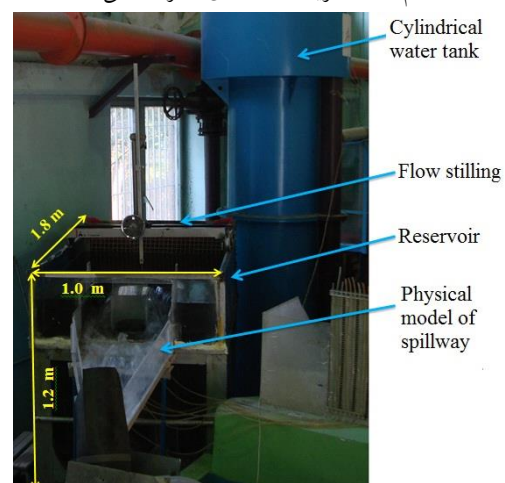


Fig. 3. the location of the cylindrical tank, main reservoir, physical model of the spillway and flow stilling at the entrance of the main reservoir.

در مراحل اولیه آزمایش سرریز بدون وجود هیچ مجرای در کف ساخته شد (شکل ۴-الف) که در واقع این سرریز مدل فیزیکی سرریز نعل اسبی کلاسیک است (با ابعاد مشخص شده

به منظور مقایسه عملکرد سرریز نعل اسبی کلاسیک و مدرن با یک سرریز مستطیلی هم عرض (۶/۷ سانتی متر، شکل ۶-۱ الف) در یک دبی ثابت، یک سرریز لبه تیز مستطیلی در مرحله پایانی آزمایش و در محل نشان داده شده در (شکل ۶-الف) جایگذاری و نتایج ثبت شد. برای محاسبه دبی عبوری از سرریز نعل اسبی کلاسیک (یا همان بخش سرریز بیرونی در سرریز نعل اسبی مدرن) از (رابطه ۱) استفاده شد. همچنین (رابطه ۱) برای سرریز مستطیلی نیز به کار گرفته شد.

هد جریان روی سرریز، با کمک یک سطح سنج اندازه گیری شد و دبی خروجی از سرریز با استفاده از چاهک آرام کننده و سرریز مثلی کالیبره شده در انتهای چاهک، مورد اندازه گیری قرار گرفت. مشخصات پروفیل جریان در مخزن، روی سرریز و داخل آن به وسیله ارتفاع سنج نقطه ای با دقت ± 0.1 میلی متر اندازه گیری شد.

در مرحله اول آزمایش ها روی سرریز نعل اسبی کلاسیک روابط خطی دبی-اشل به صورت جدول (۱) به دست آمد.

جدول ۱- رابطه دبی اشل برای سرریز نعل اسبی کلاسیک (سرریز بیرونی)

R^2	Stage-Discharge (lit/s/cm)	length of the spillway (cm)
0.999	$Q=3.55 \times h-3.17$	76
0.9989	$Q=3.95 \times h-2.88$	88
0.999	$Q=4.71 \times h-3.79$	100
0.999	$Q=4.87 \times h-3.23$	112
0.9985	$Q=4.91 \times h-2.78$	124
0.9976	$Q=5.11 \times h-2.22$	136

Table 1. Stage-discharge equations for the classic horseshoe spillway (external weir)

تحلیل ابعادی

پارامترهایی که در ضریب دبی سرریز داخلی (Co) نعل اسبی دارای اهمیت بوده و در این پژوهش مد نظر قرار گرفته اند عبارت اند از:

Lw : طول موثر سرریز بیرونی، h : هد روی سرریز داخلی و بیرونی

t : ضخامت سرریز تیغه ای، P : ارتفاع سرریز بیرونی

Q_1 : دبی جریان گذرنده از سرریز بیرونی، Q_2 : دبی جریان گذرنده از سرریز داخلی

D : قطر نیم دایره سرریز بیرونی، P_o : ارتفاع سرریز داخلی

شکل ۵: مشخصات هندسی سرریز نعل اسبی مدرن (ابعاد بر حسب سانتی متر)

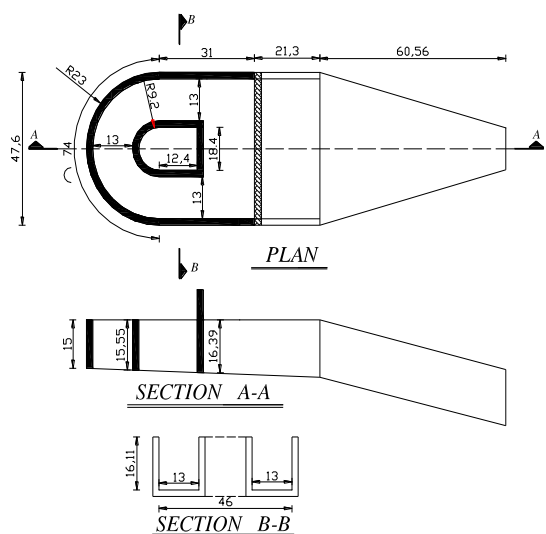


Fig. 5. Geometrical characteristics of modern horseshoe spillway (dimensions are in cm)

طول سرریز بیرونی برای مراحل مختلف آزمایش با گام های ۱۲ سانتی متری تغییر می نمود و آزمایش ها برای طول سرریز بیرونی ۷۶، ۸۸، ۱۰۰، ۱۱۲، ۱۲۴ و ۱۳۶ سانتی متر تکرار شد. دبی های عبوری نیز از ۷/۵ تا ۱۳/۵ لیتر در ثانیه و با گام های ۱ لیتری برای آزمایش ها تکرار شد. در شکل (۶) تصاویر جریان گذرنده از سرریز نعل اسبی مدرن ارائه شده است.

شکل ۶- تصویر (الف) پایین دست و (ب) بالادست جریان گذرنده از سرریز

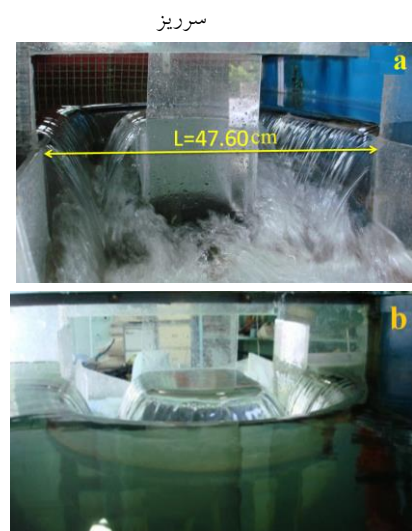


Fig. 6. a: upstream b: downstream views of the flow passing through the modern horseshoe spillway

$$Q = Q_1 + Q_2 \quad (5)$$

که در آن Q_1 دبی عبوری از سرریز بیرونی و Q_2 دبی عبوری از سرریز داخلی است.

با عنایت به مشخص بودن رابطه دبی-اشل برای سرریز کلاسیک که همان سرریز داخلی در سرریز نعل اسبی است (جدول ۱)، می‌توان مقدار Q_1 را با اندازه‌گیری هد روی سرریز (h) و جایگذاری آن در رابطه دبی-اشل به دست آورد پس Q_2 از رابطه زیر به دست خواهد آمد:

$$Q_2 = Q - Q_1 \quad (5)$$

با مشخص شدن دبی گذرنده از سرریز داخلی (Q_2) و با اندازه‌گیری هد روی سرریز (h) و طول موثر سرریز داخلی (L_0) و جایگذاری آنها در رابطه سرریزها (رابطه ۶)، مقدار C_0 به دست خواهد آمد.

$$Q_2 = C_0 \cdot L_0 \cdot \frac{2}{3} \cdot \sqrt{2g} \cdot h^{1.5} \quad (6)$$

۳- نتایج و بحث

با اندازه‌گیری مقدار h برای دبی‌های مختلف (Q) و طول‌های مختلف سرریز بیرونی (L_w) و با تجزیه و تحلیل نتایج، نمودار C_0 در مقابل $\frac{h}{L_w}$ به صورت شکل (۷) به دست آمده است. این نمودار نشان می‌دهد که C_0 با تغییر نسبت $\frac{h}{L_w}$ برای $112 < L_w < 136$ سانتی‌متر، به صورت خطی افزایش می‌یابد و برای $76 < L_w < 100$ این روند متفاوت بوده و رابطه معناداری بین آنها وجود ندارد و لیکن برای این محدوده مقدار C_0 بزرگتر از ۰/۵ است.

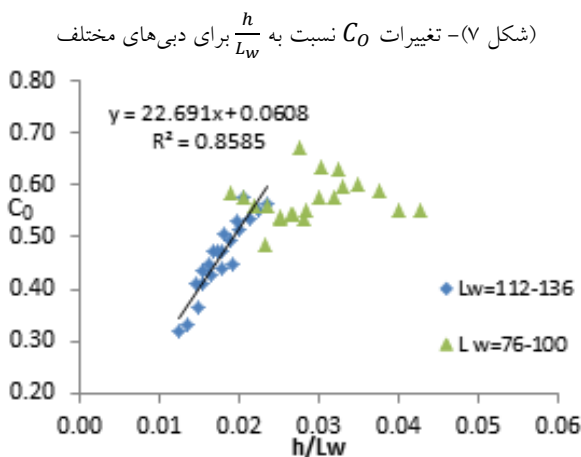


Fig. 7. Variations of C_0 against $\frac{h}{L_w}$ for different flow discharges

L_0 : طول موثر سرریز داخلی، D_0 : قطر نیم دایره سرریز داخلی

$\frac{A_0}{L_0}$: نسبت مساحت سرریز داخلی (در پلان) به طول موثر سرریز داخلی

μ : لزجت آب، g : شتاب ثقل

σ : کشش سطحی، ρ : چگالی آب

تابع کلی متغیرهای موثر بر ضریب دبی سرریز نعل اسبی مدرن که با استفاده از تحلیل ابعادی به دست آمده است به صورت زیر است:

$$f(C_0, L_w, h, t, P, Q_1, D, Q_2, D_0, P_0, L_0, \frac{A_0}{L_0}, \rho, \mu, \sigma, g) = 0 \quad (2)$$

اگر سه پارامتر Q_2, L_w, ρ به عنوان متغیرهای تکراری در نظر گرفته شود ضریب دبی سرریز داخلی (C_0) تابعی از پارامترهای بی‌بعد زیر خواهد بود که از تحلیل ابعادی به روش باکینگهام به دست آمده‌اند:

$$C_0 = f\left(\frac{D_0}{L_w}, \frac{h}{L_w}, \frac{t}{L_w}, \frac{P}{L_w}, \frac{D}{L_w}, \frac{L_0}{L_w}, \frac{Q_1}{Q_2}, \frac{P_0}{L_w}, \frac{A_0}{L_w \times L_0}, \frac{\sqrt{L_w^5 \times g}}{Q_2}, \frac{\mu \times L_w}{Q_2 \times \rho}, \frac{\sigma}{\rho \times L_w}\right) \quad (3)$$

به منظور جلوگیری از تأثیر کشش سطحی کمینه ارتفاع آب روی سرریز برابر ۲ سانتی‌متر لحاظ شد (نواک و همکاران ۲۰۱۰). پس از عبارت $\left(\frac{\sigma}{\rho L_w}\right)$ که بیان‌کننده تأثیر عدد وبر است، چشم‌پوشی شد. با توجه به آنکه در آزمایش‌های انجام گرفته پارامترهای $D_0, P_0, L_0, \frac{A_0}{L_0}, D, t, P$ ثابت در نظر گرفته شده‌اند، بنابراین تأثیر پارامترهای بی‌بعد مربوط به آنها در بررسی‌ها لحاظ نشد. پارامترهای بی‌بعد موثر روی ضریب دبی سرریز نعل اسبی که در این پژوهش بررسی شده است عبارتند از:

$$C_0 = f\left(\frac{h}{L_w}, \frac{Q_1}{Q_2}, \frac{\sqrt{L_w^5 \times g}}{Q_2}, \frac{\mu \times L_w}{Q_2 \times \rho}\right) \quad (4)$$

با توجه به آنکه سرریز نعل اسبی مدرن ترکیب سرریز نعل اسبی کلاسیک (سرریز بیرونی) و سرریز داخلی ایجاد شده در آن است، پس دبی گذرنده از کل سیستم سرریز نعل اسبی مدرن (Q) شامل مجموع دبی گذرنده از سرریز بیرونی و سرریز داخلی خواهد بود (رابطه ۵).

نمودار C_0 در مقابل $\frac{\mu \times L_w}{Q_2 \times \rho}$ به صورت شکل (۱۰) به دست آمده است که نشان دهنده روند کاهشی برای ضریب دبی با افزایش نسبت $\frac{\mu \times L_w}{Q_2 \times \rho}$ است که این مقدار بین ۰/۳ الی ۰/۳ است.

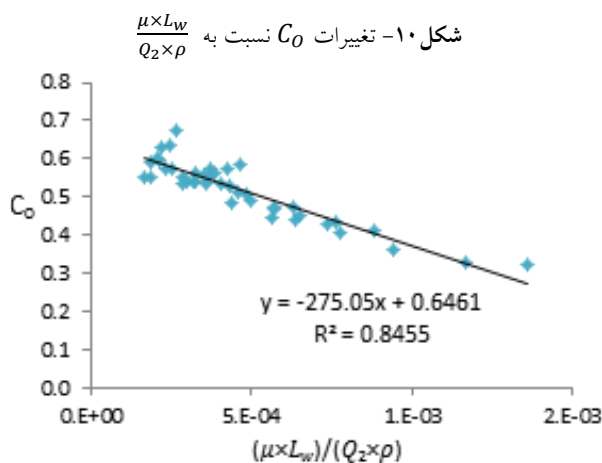


Fig. 10. Variations of C_0 against $\frac{\mu \times L_w}{Q_2 \times \rho}$

برای بررسی میزان کاهش هد روی سرریز نعل اسبی مدرن نسبت به سرریز کلاسیک و سرریز مستطیلی، نتایج به دست آمده از آزمایش‌ها با یکدیگر مقایسه شد. برای L_w های ۷۶ و ۱۰۰ و ۱۲۴ سانتی‌متر، نمودارهای مقایسه‌ای هد و دبی عبوری سرریزهای گفته شده به صورت شکل‌های ۱۱ و ۱۲ است.

شکل ۱۱- نمودار مقایسه‌ای هد روی سرریزهای نعل اسبی مدرن و کلاسیک و سرریز مستطیلی

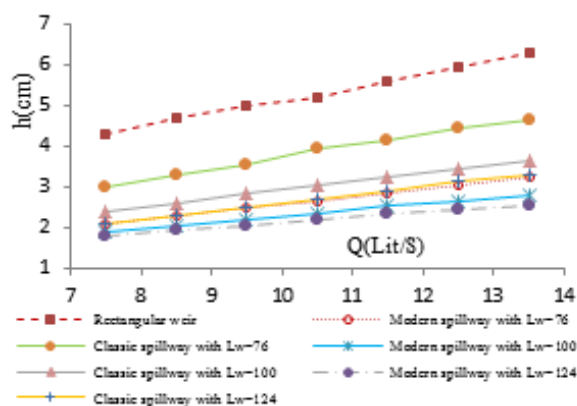


Fig. 11. A comparative diagram of head over the modern and classic horseshoe and rectangular spillways

با توجه به شکل ۱۱ مشخص می‌شود که تفاوت بسیار زیادی

یکی از پارامترهای بی‌بعد دیگری که در ضریب دبی سرریز داخلی (C_0) موثر است نسبت $\frac{Q_1}{Q_2}$ باشد که نمودار مربوطه در شکل (۸) ارائه شده است. مقدار Q_1 و Q_2 مطابق توضیحات قبلی قابل اندازه‌گیری و محاسبه است. با توجه به نمودار مشاهده می‌شود که با افزایش نسبت $\frac{Q_1}{Q_2}$ ، ضریب دبی C_0 کاهش می‌باید که رابطه خطی رگرسیونی آن در شکل (۸) ارائه شده است.

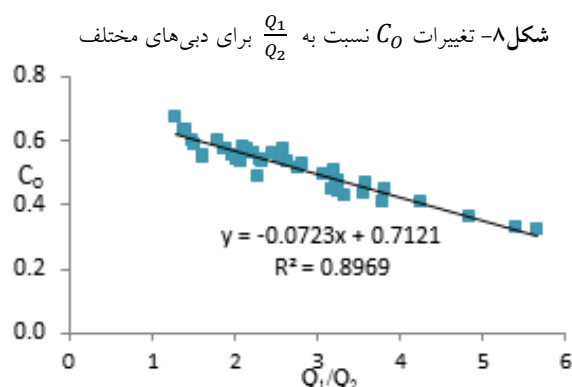


Fig. 8. Variation of C_0 against $\frac{Q_1}{Q_2}$ for different flow discharges.

پارامتر بی‌بعد دیگری که در ضریب دبی سرریز داخلی (C_0) موثر است عبارت $\sqrt{L_w^5 \times g / Q_2}$ است که نمودار مربوطه در شکل (۹) ارائه شده است. نمودار گویای آن است که روند کلی ضریب دبی با افزایش $\sqrt{L_w^5 \times g / Q_2}$ ، کاهشی بوده و این مقدار مابین ۰/۳ الی ۰/۳ است. رابطه خطی رگرسیونی مربوطه در شکل (۹) ارائه شده است.

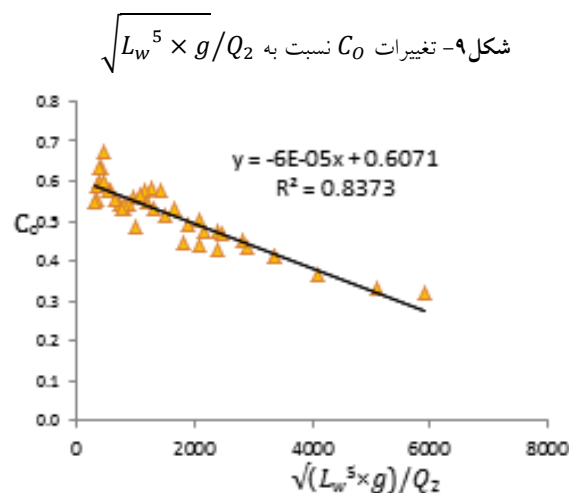


Fig. 9. Variation of C_0 against $\sqrt{L_w^5 \times g / Q_2}$

۱۰۰ سانتی‌متر دبی برابری را از خود عبور می‌دهند ولی این مقدار در دبی‌های بیشتر از ۹/۵ لیتر بر ثانیه متفاوت است. برای سرریز با ۱۱۲ و $L_w=124$ سانتی‌متر نیز در دبی‌های ۸/۵ و ۹/۵ و ۱۳/۵ لیتر بر ثانیه دبی تقریباً یکسانی از سرریز بیرونی عبور می‌نماید. همچنین نمودار گویای آن است که سرریز بیرونی با L_w برابر ۱۰۰ سانتی‌متر در دبی‌های کل بیشتر از ۱۱/۵ لیتر بر ثانیه، دبی تقریباً برابری با سرریزهای دارای L_w بزرگتر از خود را عبور می‌دهد. پس با توجه به اختلاف جزئی بین میزان کاهش هد برای یک دبی ثابت در سرریز نعل اسبی مدرن با $L_w=100$ سانتی‌متر و سرریز نعل اسبی با L_w بزرگتر از ۱۰۰ سانتی‌متر (شکل ۱۱) و لحاظ الگوی مناسب جریان در سرریز نعل اسبی با $L_w=100$ می‌توان اظهار نمود که سرریز نعل اسبی با $L_w=100$ دارای عملکرد مناسب‌تری نسبت به سایر طول‌های سرریز بیرونی است. همچنین بررسی و برآورد میزان دبی عبوری از سرریز داخلی نمایانگر آن است که در صورت انتخاب $L_w=100$ برای سرریز بیرونی، به طور میانگین ۳۱ درصد جریان از مجرای داخلی عبور خواهد نمود (جدول ۲).

جدول (۲)- درصد دبی عبوری از سرریز داخلی سرریز مدرن

L_w	۷۶	۸۸	۱۰۰	۱۱۲	۱۲۴	۱۳۶
میانگین جریان عبوری از سرریز داخلی (%)	۴۰	۳۳٫۵	۳۱	۲۶	۲۴	۱۹

Table (2)- Percentage of the discharge flowing through internal weir in modern horseshoe spillway

پروفیل جریان روی سرریز نعل اسبی مدرن با ابعاد نشان داده شده در شکل (۱۳-الف) برای دبی ۱۱/۵ لیتر بر ثانیه ترسیم شده که در شکل (۱۳-ب و ج) قابل مشاهده است. پروفیل عرضی در فاصله ۲۵ سانتی‌متری از دیواره انتهایی مخزن برداشت و ترسیم شده و پروفیل طولی در محور وسط سرریز برداشت و ترسیم شده است. به طوری که در پروفیل‌های ترسیم شده مشخص است، با کاهش طول موثر سرریز بیرونی (L_w)، میزان فاصله تیغه جریان از دو دیواره سرریز (بیرونی و داخلی)، افزایش یافته و همچنین فاصله محل برخورد دو تیغه

مابین هد جریان بر روی سرریز مستطیلی و نعل اسبی وجود دارد و سرریز نعل اسبی موفق شده است برای نمونه در حالت سرریز نعل اسبی کلاسیک با $L_w=76$ سانتی‌متر به مقدار میانگین ۲۸ درصد و در حالت سرریز نعل اسبی مدرن به مقدار میانگین ۵۰ درصد از هد روی سرریز نسبت به هد سرریز مستطیلی (در یک دبی مشخص) بکاهد. همچنین کاهش هد برای یک دبی مشخص در حالت سرریز مدرن نسبت به حالت کلاسیک قابل ملاحظه است. بدیهی است انتخاب سرریز بیرونی با طول کوتاه‌تر و در نتیجه انتخاب مساحت کمتر (در پلان) و همچنین ایجاد سرریز داخلی می‌تواند سازه بهینه هیدرولیکی و اقتصادی را برای گذردهی سیلاب ارائه دهد. در سرریز نعل اسبی مدرن با تغییر میزان هد روی سرریز، میزان دبی عبوری از سرریز بیرونی و داخلی نیز تغییر می‌نماید. نمودار مقایسه‌ای مربوط به میزان دبی عبوری از سرریزهای بیرونی با L_w های مختلف (مربوط به سرریز نعل اسبی مدرن) برای Q های متفاوت در شکل (۱۲) ارائه شده است.

شکل ۱۲- مقایسه میزان دبی عبوری از سرریز بیرونی سرریز نعل

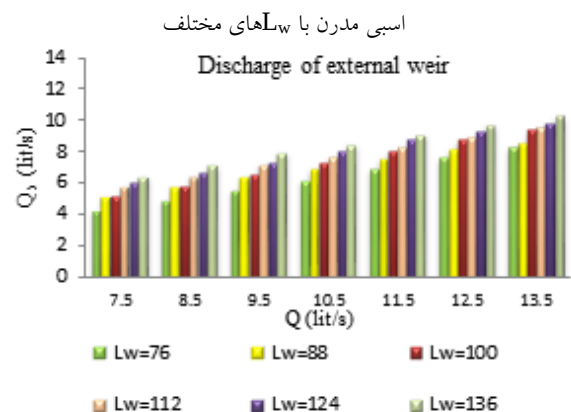


Fig. 12- A comparison of the volume of discharge flowing through external weir of the modern horseshoe spillways with different L_w

با ملاحظه شکل (۱۲) و مقایسه دبی عبوری از سرریزهای بیرونی سرریز نعل اسبی مدرن، مشخص می‌شود که با افزایش L_w میزان دبی عبوری از سرریز بیرونی افزایش و در نتیجه میزان دبی عبوری از سرریز داخلی کاهش می‌یابد پس می‌توان با انتخاب طول کمتر L_w ، میزان دبی قابل توجهی را نیز از سرریز داخلی عبور داد. همچنین شکل (۱۲) گویای آن است که برای دبی‌های ۷/۵ و ۸/۵ لیتر بر ثانیه، سرریز با طول ۸۸ و

با توجه به شکل‌های بالا مشاهده می‌شود که با کاهش L_w و در نتیجه افزایش دبی عبوری از سرریز داخلی (Q_2)، فاصله محل برخورد دو تیغه جریان (ریزشی از سرریزهای بیرونی و داخلی) از کف سرریز افزایش می‌یابد.

الگوی جریان

در آزمایش‌های انجام گرفته برای سرریز نعل اسبی کلاسیک مشاهده شد که جریان ریزشی از مخزن، به داخل سرریز به دو قسمت تقسیم می‌شود: ۱- جریان به سمت داخل سرریز، ۲- و جریان مابین دیواره سرریز تیغه جریان. در پایین دست و محور وسط سرریز نیز، پرش دم خروسی ایجاد می‌شود.

با ایجاد سرریز داخلی جریان ریزشی از مخزن، به داخل سرریز نعل اسبی مدرن به چهار قسمت تقسیم می‌شود: ۱- جریان ریزشی از سرریز بیرونی ۲- جریان پشت تیغه ریزشی سرریز بیرونی ۳- جریان ریزشی از سرریز داخلی ۴- جریان پشت تیغه ریزشی سرریز داخلی (شکل ۱۴) در این نوع سرریز تیغه‌های جریان از سرریز داخلی و بیرونی به سمت یکدیگر سرازیر شده و به هم برخورد می‌نماید و کل جریان عبوری از سرریز از منطقه پشت تیغه‌های جریان به پایین دست انتقال می‌یابد (شکل ۱۴). ارتفاع جریان چرخشی که در پشت تیغه جریان سرریز بیرونی تشکیل می‌شود، بین ۳/۵ الی ۱۱ سانتی‌متر است. این ارتفاع برای جریان پشت تیغه سرریز داخلی مابین ۶ الی ۱۴ سانتی‌متر است.

شکل ۱۴ تصویر جریان در سرریز نعل اسبی مدرن
۱- جریان ریزشی از سرریز بیرونی ۲- جریان پشت تیغه ریزشی بیرونی
۳- جریان ریزشی از سرریز داخلی ۴- جریان پشت تیغه ریزشی داخلی.

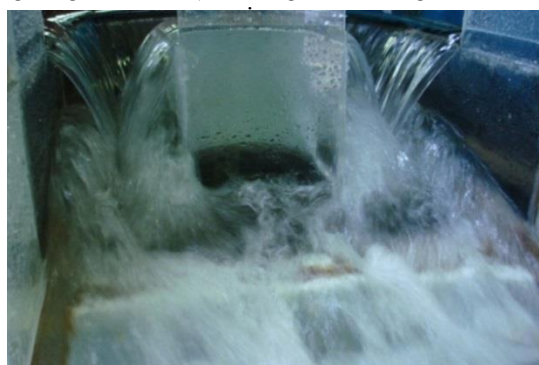


Fig 14. the image of flow in a modern horseshoe spillway.
1- nappe flow from external weir 2- flow behind the nappe of external weir 3- nappe flow from internal weir 4- flow behind the nappe of internal weir.

جریان از کف سرریز افزایش می‌یابد.

شکل ۱۳-الف: نمایش از بالای محل پروفیل عرضی (B-B) و پروفیل طولی (A-A) در سرریز نعل اسبی مدرن

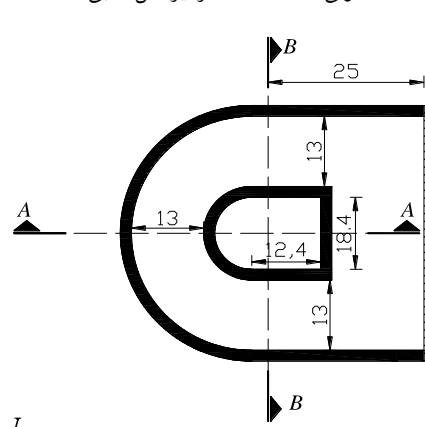


Fig. 13. a: plan view of Cross Section profile (B-B) and longitudinal profile (A-A) location in modern horseshoe spillway

شکل ۱۳-ب: پروفیل عرضی جریان (مقطع B-B) بر روی سرریز نعل اسبی مدرن در L_w های مختلف

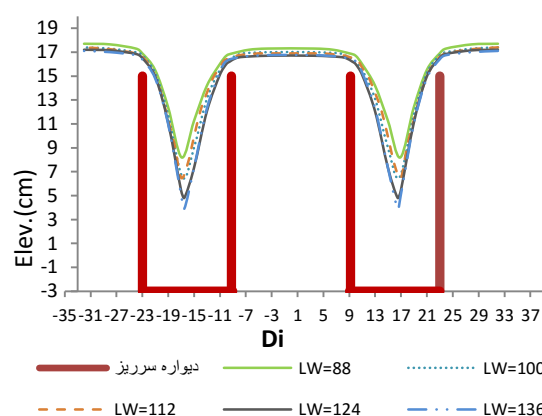


Fig. 13. b: Cross Section profile of the flow (section B-B) over modern horseshoe spillway at different L_w s

شکل ۱۳-ج: پروفیل طولی (مقطع A-A) جریان بر روی سرریز و داخل آن برای طول های مختلف سرریز بیرونی

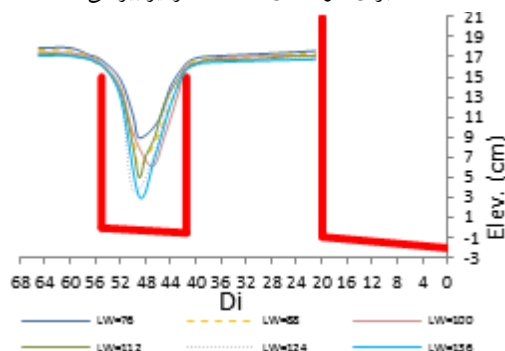


Fig. 13. c: longitudinal profile (section B-B) of the flow over and inside the spillway for different lengths of external weir

ارتفاع جریان چرخشی که در پشت تیغه جریان سرریز بیرونی تشکیل می‌شود، ۳/۵ الی ۱۱ سانتی‌متر و برای جریان پشت تیغه سرریز داخلی مابین ۶ الی ۱۴ سانتی‌متر است. مقایسه نتایج به دست آمده از آزمایش‌ها برای سرریز مستطیلی هم عرض سرریز نعل اسبی موید آن است که سرریز نعل اسبی کلاسیک و مدرن قادر است هد روی سرریز را به ترتیب به مقدار ۲۸ و ۵۰ درصد برای یک دبی ثابت کاهش دهد.

بیشینه ارتفاع‌های جریان پشت تیغه‌ها در آزمایش‌های مربوط به $L_w=76$ و ۸۸ سانتی‌متر رخ داد. افزایش ارتفاع‌های جریان پشت تیغه‌ها در دبی‌های بالاتر می‌تواند باعث مستغرق شدن تیغه‌های جریان شده و ضریب گذردهی سرریز را کاهش دهد. پس با وجود درصد Q_2 بالاتر (جدول ۲) برای $L_w=76$ و ۸۸ نسبت به سرریز با $L_w=100$ سانتی‌متر، در مجموع سرریز بیرونی با طول ۱۰۰ cm عملکرد بهتری نسبت به آنها دارد.

۴ نتیجه گیری

نتایج این پژوهش گویای آن است که ایجاد سرریز داخلی در مرکز سرریز کلاسیک باعث کاهش هد روی سرریز برای یک دبی ثابت می‌شود. سرریز داخلی همچنین باعث می‌شود که پرش دم خروسی که در سرریز نعل اسبی کلاسیک مشاهده شد، از بین رفته و جریان شرایط مناسب‌تری در داخل سرریز و پایین دست آن داشته باشد. وجود سرریز داخلی در سرریز نعل اسبی باعث می‌شود که پروفیل جریان تغییر نموده و تیغه‌های جریان (نیپ) که به داخل سرریز وارد می‌شوند همدیگر را قطع و انرژی جریان را تلف نمایند و جریان با شرایط مناسب‌تری به پایین دست انتقال می‌یابد.

ضریب دبی سرریز داخلی C_o با افزایش h در ۱۱۲ الی $L_w=136$ سانتی‌متر، به صورت خطی افزایش می‌یابد. با افزایش نسبت $\frac{Q_1}{Q_2}$ ، ضریب یاد شده دبی مذکور برای L_w ‌های مختلف، کاهش می‌یابد. روند کلی ضریب دبی با افزایش

$\sqrt{L_w^5 \times g / Q_2}$ ، کاهشی بوده و این مقدار مابین ۰/۶۵ الی ۰/۳ است. با مقایسه دبی عبوری از سرریز بیرونی نعل اسبی مدرن در طول‌های مختلف، مشخص می‌شود که با افزایش L_w میزان دبی عبوری از سرریز داخلی کاهش می‌یابد. با توجه به نتایج این پژوهش می‌توان اظهار نمود که سرریز نعل اسبی با $L_w=100$ دارای عملکرد مناسب‌تری نسبت به سایر طول‌های سرریز بیرونی دارد. همچنین بررسی میزان دبی عبوری از سرریز داخلی نمایانگر آن بود که در صورت انتخاب $L_w=100$ ، به طور میانگین ۳۱ درصد جریان از مجرای داخلی عبور خواهد نمود.

مراجع

References

- [۱] بازرگان، ج و مهرانی، س، بررسی تاثیر پارامترهای موثر بر روی ضریب دبی سرریزهای نیم دایره ای در پلان، ششمین کنفرانس هیدرولیک ایران، شهرکرد، ۱۳۸۶.
- [۲] حیدرپور، م، موسوی، ف و روشنی زرمهری، ع، بررسی سرریزهای چند وجهی با پلان مستطیلی و U شکل، مجله علوم و فنون کشاورزی و منابع طبیعی، سال دهم، شماره سوم (الف) ۱۳۸۵، ص ۱۱۱
- [3] Aydin, C.M., *CFD simulation of free surface flow over triangular labyrinth side weir*, J *Advances in Engineering Software* 45, 2011, pp 159-166
- [4] Falvey, H.T., *Hydraulic Design of Labyrinth Weirs*, ASCE, USA, 2003.
- [5] Kaya, N., Emiroglu, M.E. and Agaccioglu, H., *Discharge coefficient of a semi elliptical side weir in subcritical flow*, J *Flow Measurement and Instrumentation* 22, 2011, pp: 25-32.
- [6] Khatsuria, R.M., *Hydraulics of Spillways and Energy Dissipators*, Marcel Dekker, 2005, PP.197-216.
- [7] Crookston, B.M., 2010, *Labyrinth Weirs*, PH.D thesis, Utah State University, Logan, Utah, PP. 156-162
- [8] Tiwari, H. Sharma, N., 2015, *Developments to improve hydraulic competence of spillways*, International Conference on Water Resources, Coastal and Ocean Engineering, ScienceDirect, PP: 841-846
- [9] Novak, P. Guinot, V, Jeffrey. A. and Reeve, D, 2010, *Hydraulic Modelling An Introduction*, Spon Press, New York.

Experimental Investigation of Hydraulic Parameters in Modern Horseshoe Spillway

Hasanzadeh Vayghan V.^{1*}, Mohammadi M.², Salmasi F.³, Hosseinzadeh Dalir A.⁴,
Manafpour M.⁵

1- Ph.D. Candidate, Water & Hydraulic Structures, Dept. of Civil Eng., Faculty of Eng., Urmia University

2, 5- Prof Associate Prof and Assistant., Civil Eng., Water & Hydraulic Structures, Dept. of Civil Eng., Faculty of Eng., Urmia University

3, 4- Associate Prof and Professor., Water Eng. Dept., Faculty of Agricultural Eng., University of Tabriz

v.hasanzadeh@urmia.ac.ir

Abstract:

One of the non-linear types of spillways in plan-which is used for safe discharge of flood flow from dam reservoir- is horseshoe spillway. In dam construction, if different hydraulic sub-structures are intended to be integrated in one structure, for example in the case of integrating a spillway and hydroelectric power plant intake, modern horseshoe spillway can be used. The installed duct is utilized as an intake to hydroelectric power plant and also to import the water flow into the horseshoe spillway from aspects other than horseshoe spillway and increase its discharge capacity. Modern horseshoe spillway is a combination of external and internal weirs. It is necessary to determine hydraulic parameters for this kind of spillways. In this study, physical models of modern horseshoe spillways were made in laboratory dimensions. Thereafter, specific hydraulic parameters of modern horseshoe spillways such as discharge coefficient, discharge rate through the two weirs and water surface profiles in different parts of horseshoe weir were investigated. The results showed that by increasing the ratio of head to external weir's Length (h/L_w), for $L_w \leq 100$ cm, discharge coefficient for internal weir (C_o) is increased linearly. On the other hand, by increasing the ratio of internal weir discharge to the external one (Q_1/Q_2), the discharge coefficient experiences a decreasing trend between

0.65~0.3. As the term $\sqrt{L_w^5 \times g/Q_2}$ is increased, the general trend of the discharge coefficient is decreased and its value varies from 0.3~0.65. Comparing the discharges flowing through the external weir of the modern horseshoe spillway, it is noticed that as the L_w is decreased, the amount of discharge -flowing through internal weir- is also decreased. Results indicate a decreasing trend for discharges coefficient as the ratio of $\frac{\mu \times L_w}{Q_2 \times \rho}$ is increased and its value is in the range of 0.3~0.65. Increasing in the external weir length, the discharge rate through external weir is increased, while it may be decreased in internal weir. According to the results, the spillways with L_w of 100 cm can pass almost the same discharge as the spillways with longer L_w can, only under the condition that the discharge is greater than 11.5 lit/sec. The external weir with $L_w=100$ cm performs better than the other cases with different values of L_w . By selecting the proper length, 31 percent of the flow (on average) will pass through the internal weir. Classic and modern horseshoe spillways are capable of reducing the head on the weir respectively to 28~50% in comparison with the rectangular weir head with the same width. By establishing the internal weir, the flow which flows down through a modern horseshoe spillway is divided into four parts: a) nappe flow through external weir, b) flow behind the nappe of external weir, c) nappe flow through internal weir and d) flow behind the nappe of internal weir. The height of the rolling flow -which is established behind nappe of the external weir flow- varies from 3.5 to 11 cm, where this value varies from 6 to 14 cm for the flow behind the internal weir nappe. Investigation of the water surface profiles shows that by creating an internal weir, the rooster tail hydraulic jump -that exists in classic horseshoe spillways- is removed.

Keywords: Modern & Classic horseshoe spillway, Discharge coefficient, Internal weir, Physical model.