

بررسی آزمایشگاهی هیدرولیک سرریز نعل اسبی و تأثیر طول سرریز در ضریب دبی

وحید حسن زاده وایقان¹، فرزین سلماسی*²، علی حسین زاده دلیر³، اکرم عباسپور⁴، هادی ارونتقی²

تاریخ دریافت: 93/11/08 تاریخ پذیرش: 95/03/16

¹ دانش‌آموخته کارشناسی ارشد مهندسی آب، گرایش سازه‌های آبی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز

² دانشجویان گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز

³ استاد گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز

⁴ استادیار گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز

* مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: Salmasi@tabrizu.ac.ir

چکیده

یکی از انواع سرریزهای غیرخطی در جانمایی پلان سرریز نعل اسبی است که تعیین پارامترهای هیدرولیکی این نوع سرریزها در طراحی آنها ضروری می‌باشد. گاهی به دلیل محدودیت ساختگاه سد و جهت کاهش حجم حفاری، تونل و محل آبیگری نیروگاه برق-آبی در مجاورت بدنه سد و سرریز ساخته می‌شود. در چنین مواردی می‌توان به کمک سرریزهای نعل اسبی، سازه مرکبی از آن دو (آبگیر و سرریز) را ایجاد نمود و صرفه اقتصادی مناسبی در ساخت تأسیسات جانبی سد به وجود آورد. در این تحقیق با ساخت مدل فیزیکی سرریز نعل اسبی در ابعاد آزمایشگاهی به بررسی مشخصات هیدرولیکی سرریزهای نعل اسبی از جمله ضریب دبی، سرعت و پروفیل جریان در قسمت‌های مختلف آن پرداخته شده است. نتایج تحقیق حاضر نشان داد که در سرریزهای نعل اسبی، با افزایش نسبت بار آبی به طول سرریز، مقدار ضریب دبی در محدوده 0/6 الی 0/7 کاهش پیدا می‌کند. این کاهش ضریب دبی برای سرریز با طول کوچکتر از 112 سانتی‌متر و بزرگتر از آن روند متفاوتی دارد. مقایسه نتایج به دست آمده از آزمایش‌ها برای سرریز مستطیلی هم‌عرض سرریز نعل اسبی مؤید آن است که سرریز نعل اسبی قادر است بار آبی روی سرریز را به مقدار 54 درصد کاهش دهد. بررسی پروفیل سطح آب نشان می‌دهد که در اثر برخورد جریان‌های سرریز شونده به داخل سرریز نعل اسبی، پرش هیدرولیکی از نوع پرش دم خروسی به وجود می‌آید.

واژه‌های کلیدی: پرش دم خروسی، سرریز نعل اسبی، ضریب دبی، مدل فیزیکی

Experimental Investigation of Horseshoe-Shaped Spillway Hydraulics and Effect of Spillway Length on Discharge Coefficient

V Hasanzadeh Vaighan¹, F Salmasi^{2*}, A Hosseinzadeh Dalir³, A Abbaspour⁴, H Arvanaghi²

Received: 13 March 2015

Accepted: 5 June 2016

¹ M.Sc. Graduate of Water Structures, Dept. of Water Engin., Faculty of Agric., Univ. of Tabriz, Iran

² Assoc. Prof., Dept. of Water Engin., Faculty of Agric., Univ. of Tabriz, Iran

³ Prof., Dept. of Water Engin., Faculty of Agric., Univ. of Tabriz, Iran

⁴ Assic. Prof., Dept. of Water Engin., Faculty of Agric., Univ. of Tabriz, Iran

* Corresponding Author, Email: Salmasi@tabrizu.ac.ir

Abstract

One of the non-linear weirs is horseshoe-shaped weir that determination of its hydraulic parameters for designing of that is necessary. Sometime due to limitation in dam site and also reduction in soil excavation volume, tunnel and intake location of hydro-electric power this structure is needed to be constructed near the dam and its intake. In these cases, a combined structure of both the intake and spillway can be constructed by using horseshoe-shaped weir to achieve a proper economic condition in dam construction. In this study, by making physical models of the horseshoe-shaped spillway in laboratory dimension, some hydraulic parameters like discharge coefficient, velocity and water surface profiles in different parts of the horseshoe-shaped spillway were investigated. Results showed that in horseshoe-shaped spillways, with increasing the ratio of head to spillway length, discharge coefficient was decreased about 0.6 to 0.7. This reduction in discharge coefficient had different trends for spillways with length of greater or less than 112cm. Comparison of the results between the rectangular weir and the horseshoe-shaped spillway by consideration an equal width for them showed that horseshoe-shaped spillway could reduce head above the weir about 54%. Investigation of the water surface profiles showed that overflowing of waters into the horseshoe spillway, created the rooster tail type hydraulic jump.

Keywords: Discharge coefficient, Horseshoe-shaped spillway, Physical model, Rooster tail hydraulic jump

مقدمه

جریان و سایر مزایای این نوع سرریزها مورد توجه طراحان می باشد. سرریزهای غیرخطی در پلان معمولاً به صورت سرریزهای کنگره ای، نوک منقاری و نعل اسبی استفاده می شوند. یکی از انواع سرریزهای غیرخطی سرریزهایی به صورت نعل اسبی در پلان است که تعیین پارامترهای هیدرولیکی (ضریب دبی، بار استاتیکی، سرعت و فشار) این نوع سرریزها در طراحی آنها لازم می باشد.

سرریزهای غیرخطی در پلان، سازه های هیدرولیکی مهمی جهت تنظیم سطح آب و کنترل جریان در کانالها، رودخانه ها و مخازن سدها به شمار می آیند. فرضیه اصلی در توسعه طرح غیرخطی در پلان سرریزها، افزایش ظرفیت انتقال جریان بر روی سرریز از طریق افزایش طول تاج سرریز در یک محدوده معین عرضی بوده است. استفاده از سرریزهای غیرخطی، به دلیل کاهش هزینه های ساخت و مقادیر بالای عبور دهی



شکل 1- ب: سرریز کنگره‌ای مثلثی.

اگر در مناطقی، به دلیل محدودیت ساختگاه سد و برای ایجاد صرفه اقتصادی (کاهش حجم حفاری)، تونل و محل آگیری نیروگاه برق- آبی در مجاورت بدنه سد و سرریز ساخته شود، می‌توان از سرریزهای چند وجهی استفاده نمود به شرطی که شیب دره تکیه‌گاه نزدیک سرریز زیاد نباشد تا بتوان سرریز را بر روی آن بنا نهاد و آبراهه‌ای برای وجه سوم سرریز که نزدیک تکیه‌گاه است ایجاد نمود. چنانچه در طراحی سازه‌های هیدرولیکی سدی مدنظر باشد که چند سازه هیدرولیکی مختلف در یک سازه جمع‌آوری شود، مانند ساخت سرریز و دهانه آگیر نیروگاه در یک سازه واحد، می‌توان هندسه سازه را به صورتی طراحی نمود که امکان ورود جریان به سرریز و آگیر از یک راستا وجود داشته باشد. شکل نعل اسبی سرریز و ورود جریان از سه وجه، این نوع سرریز را منحصر به فرد نموده است. بیشتر پژوهش‌های انجام گرفته در رابطه با سرریزهای غیرخطی، در زمینه سرریزهای کنگره‌ای بوده و چند تحقیق نیز در زمینه سرریزهای نوک‌منقاری و چند وجهی انجام گرفته است. در خصوص سرریزهای نعل اسبی اطلاعات چندانی در منابع ارائه نشده و تنها به معرفی سرریزهای شبیه آن، از جمله سرریز U شکل و سرریز نوک منقاری بسنده شده است.

فالوی (2003) برای محاسبه دبی سرریزهای کنگره‌ای از رابطه 1 استفاده نمود.

$$Q = \frac{2}{3} C_T L \sqrt{2g} h^{3/2} \quad [1]$$

ظرفیت آگذری یک سرریز تابعی از ارتفاع کل جریان، طول مؤثر تاج و ضریب دبی می‌باشد. سرریز آزاد به دلیل ساده بودن و امکان برقراری ارتباط مستقیم مخزن با پایاب، سرریز استاندارد است که بیشتر مورد استفاده قرار می‌گیرد. این نوع سرریز را معمولاً می‌توان در هر نوع سد قوسی و وزنی استفاده کرد. همچنین در سدهای خاکی، سرریزهای مستقیم را با توجه ویژه به مسأله روگذری جریان از سد، می‌توان به صورت ترکیبی بکار برد (شمسائی 1385).

نمای تاج سرریز در پلان می‌تواند به صورت خط مستقیم (استاندارد)، منحنی، چند ضلعی یا کنگره‌ای باشد. سازه غیرخطی در پلان در شرایط مساوی عرض سازه دارای ظرفیت سرریز شونده بیشتری می‌باشد که این مسأله می‌تواند برای افزایش کارایی سرریزها مناسب-ترین روش باشد. از انواع سرریزهای غیرخطی در پلان می‌توان به سرریزهای ذیل اشاره نمود:

سرریز گل مروارید (شکل 1- الف)، سرریز کنگره‌ای مثلثی (شکل 1- ب)، کنگره‌ای مستطیلی، نیم دایره، سرریز نوک اردکی، سرریز پره‌ای، سرریز نوع Y ، سرریز کلید پیانو (PK) و سرریز نعل اسبی.



شکل 1- الف: سرریز گل مروارید سدی در کشور ارمنستان.

ضریب دبی نسبت به H_i/P ابتدا افزایش یافته و پس از رسیدن به یک بیشینه، شروع به کاهش می‌نماید. همچنین با افزایش ارتفاع سرریز، مقدار ضریب دبی در یک H_i/P مشخص افزایش می‌یابد. لازم به ذکر است که H_i بار آبی کل روی سرریز و P ارتفاع سرریز است. نتایج همچنین 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 مهرانی (1386) در تحقیق به بررسی پارامترهای مؤثر بر روی ضریب دبی سرریزهای کنگره-ای با پلان نیم‌دایره 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 گردید این سرریزها به لحاظ هوادهی به مراتب کاراتر از سرریزهای مستقیم و خطی می‌باشند.

به منظور کسب اطلاعات و برآورد پارامترهای هیدرولیکی چنین سرریزهایی، نیاز به شبیه‌سازی و انجام آزمایش‌های هیدرولیکی بر روی سرریزهای نعل اسبی ضروری به نظر می‌رسد. لذا در این تحقیق سعی شده است با ساخت مدل فیزیکی سرریز نعل اسبی در ابعاد آزمایشگاهی و برقراری دبی‌های متفاوت از روی سرریز به بررسی مشخصات هیدرولیکی آن از جمله ضریب دبی، سرعت، ارتفاع جریان در داخل کانال و مشخصات جریان در قسمت‌های مختلف آن پرداخته شود. با استفاده از تحلیل ابعادی، عوامل مؤثر در ضریب دبی شناسایی و نتایج به دست آمده از آزمایش‌ها با ارائه شکل‌های بی‌بعد تجزیه و تحلیل شده‌اند. همچنین به منظور بررسی تأثیر طول تاج سرریز بر ضریب دبی، آزمایش‌هایی صورت گرفته و نتایج آن ارائه شده است.

مواد و روش‌ها

آزمایش‌های این تحقیق در آزمایشگاه هیدرولیک گروه مهندسی آب دانشگاه تبریز انجام گرفت که سیستم

که در آن Q دبی، h هد یا بار آبی طراحی سرریز، g شتاب ثقل، L طول سرریز و C_T ضریب دبی می‌باشد. کاتسوریا (2005) پارامترهای مؤثر در عملکرد سرریزهای کنگره‌ای را ارائه نمود که عبارت بودند از: نسبت بار آبی بر ارتفاع سرریز، بزرگ‌نمایی جریان، نسبت بزرگ‌نمایی، زاویه دیواره هادی، نسبت ابعاد عمودی، تعداد سیکل‌ها، شکل مقطع تاج، شرایط جریان در کانال تقرب و کارآیی. آیدین (2011) در تحقیقی به شبیه‌سازی عددی جریان بر روی سرریزهای کنگره‌ای جانبی پرداخته است. ایشان برای شبیه‌سازی سطح آزاد جریان زیر بحرانی در سرریزهای کنگره‌ای با پلان مثلثی از روش حجم سیال استفاده کرد. برای شبیه‌سازی جریان از نرم‌افزار دینامیک سیالات محاسباتی فلوئنت بهره گرفت و برای تعیین عدم قطعیت عددی حاصل از نتایج شبیه‌سازی از یک روش معتبر به نام GCI استفاده کرد. در روش شاخص همگرایی شبکه محاسبه می‌شود که از روی آن می‌توان درفت که ریزی یا درشتی شبکه‌بندی مدل مناسب است یا نه. استفاده نتایج شبیه‌سازی با مشاهدات تجربی مورد مقایسه قرار گرفت و توافق خوبی بین دو نتیجه حاصل گردید.

کایا و همکاران (2011) در تحقیقی به بررسی آزمایشگاهی سرریزهای جانبی نیم‌بیضوی در پلان پرداختند. هدف آنها از تحقیق، بررسی اثرات هیدرولیکی سرریز نیمه بیضوی به منظور افزایش ظرفیت تخلیه سرریزها بود. از نتایج مشخص گردید که ضریب دبی سرریز نیم بیضوی بزرگتر از سرریزهای کلاسیک جانبی می‌باشد. علاوه بر این، معادله قابل اعتمادی برای محاسبه ضریب دبی سرریز نیمه بیضوی، ارائه شد. حیدرپور و همکاران (1385) در تحقیقی به بررسی سرریزهای چند وجهی با پلان مستطیلی و U شکل پرداختند. آنها با استفاده از 14 مدل آزمایشگاهی از سرریزهای فوق و یک مدل آزمایشگاهی سرریز خطی به بررسی و مقایسه سرریزها پرداختند. نتایج آزمایش‌های آنها نشان داد که در مورد کلیه سرریزهای چند وجهی،

قوس) برابر 15 سانتی‌متر و در محل اتصال به دیواره انتهایی مخزن برابر 17 سانتی‌متر در نظر گرفته شد (با توجه به شیب کف). طول دیواره‌های موازی در داخل مخزن برابر 31 سانتی‌متر بود که با پیشرفت آزمایش با گام‌های 12 سانتی‌متری طول آن ناحیه برای آزمایش بعدی کاهش می‌یافت یعنی: 100, 112, 124, 136 $L_w =$ (cm) 76, 88.

به‌منظور مقایسه عملکرد سرریز نعل اسبی با یک سرریز هم عرض آن و همچنین برای مقایسه میزان کاهش هد سرریز در یک دبی ثابت برای سرریز نعل اسبی با یک سرریز هم عرض، از یک سرریز لبه تیز مستطیلی که در محل انتهای قوس سرریز نعل اسبی جایگذاری شد، استفاده گردید (شکل 3). برای محاسبه دبی عبوری از سرریز نعل اسبی و سرریز مستطیلی از رابطه 1 استفاده گردید.

بار آبی جریان بر روی سرریز، با کمک یک سطح-سنج اندازه‌گیری شد و دبی خروجی از سرریز با استفاده از چاهک آرام کننده و سرریز مثلثی کالیبره شده در انتهای چاهک، مورد اندازه‌گیری قرار گرفت. برای اندازه‌گیری سرعت از میکرومولینه استفاده گردید. مشخصات پروفیل جریان در مخزن، روی سرریز و داخل آن توسط ارتفاع سنج نقطه‌ای با دقت $\pm 0/1$ میلی‌متر اندازه‌گیری گردید.

فشار استاتیکی جریان نیز در داخل سرریز نعل اسبی و بر روی شوت در 8 نقطه قرائت شد.

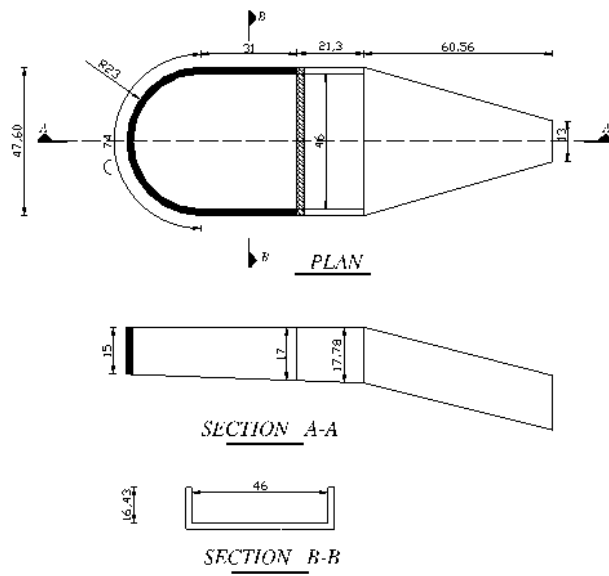
تأمین آب آن از یک مخزن زیرزمینی، یک پمپ با قدرت 100 اسب بخار با بیشینه دبی 60 لیتر بر ثانیه و مخزن استوانه‌ای تشکیل شده که آب توسط پمپ از مخزن زیرزمینی به مخزن استوانه‌ای هدایت می‌شود. مخزن استوانه‌ای دارای سطح آزاد بوده و یک سرریز در داخل آن سطح آب را کنترل می‌کند.

به این ترتیب در طول آزمایش ارتفاع آب درون مخزن استوانه‌ای مقدار ثابتی است. مخزن اصلی مدل به-شکل مکعب مستطیل بوده و دارای ابعادی به طول 1/8 متر، عرض 1 متر و ارتفاع 1/2 متر می‌باشد.

در بالادست مخزن (قسمت ورودی جریان) ناحیه آرام کننده جریان قرار دارد. این ناحیه به شکل مکعب مستطیل بوده و ابعاد آن $1 \times 1/2 \times 0/1$ متر می‌باشد که از دو چهارچوب فلزی (نبتی شماره 3) و شبکه جوشی (مش) قرار گرفته شده در چهارچوب مذکور، تشکیل شده و این دو چهارچوب با یک فاصله 10 سانتی‌متری به هم جوش داده شده‌اند.

مدل فیزیکی سرریز نعل اسبی با استفاده از پلاکسی گلاس و با ابعاد مشخص شده در شکل 2 ساخته شد و در داخل مخزن اصلی قرار گرفت. سرریز نعل اسبی در پلان از یک ناحیه قوس‌دار و دو خط موازی تشکیل شده است. طول و شعاع قسمت قوس‌دار به ترتیب برابر 74 و 23 سانتی‌متر می‌باشد.

همچنین شیب کف سرریز برابر 0/036 درصد در نظر گرفته شد. ارتفاع دیواره در ابتدای سرریز (نوک



شکل 2 - مشخصات هندسی سرریز نعل اسبی.



شکل 3 - بالا: جریان گذرنده از سرریز نعل اسبی، پایین: جریان گذرنده از سرریز مستطیلی هم عرض سرریز نعل اسبی ($L_w=46$ cm).

از عبارت $S / r L_w$ که بیان‌کننده تأثیر عدد وبر می‌باشد، صرف‌نظر نمود. با توجه به آن که در آزمایش‌های انجام یافته، D, t, P ثابت در نظر گرفته شده‌اند، لذا تأثیر پارامترهای بی‌بعد مربوط به آنها در بررسی‌ها لحاظ نگردید.

بنابراین پارامترهای مؤثر بر روی ضریب دبی سرریز نعل اسبی که در این تحقیق مورد بررسی قرار گرفته‌اند عبارتند از:

$$C = f_3 \left(\frac{h}{L_w}, \frac{\sqrt{gL_w}}{V}, \frac{m}{r VL_w}, \frac{\ddot{\theta}}{\theta} \right) \quad [4]$$

نتایج و بحث

نمودار تغییرات C (ضریب دبی سرریز نعل اسبی) نسبت به h/L_w در شکل 4 ارائه شده است. با توجه به شکل مذکور مشخص می‌گردد که با افزایش نسبت h/L_w ضریب دبی در محدوده مشخصی کاهش پیدا می‌کند. با توجه به روند فوق، طبیعی است که با افزایش h و یا کاهش L_w ، مقدار ضریب دبی کاهش پیدا می‌نماید. لازم به ذکر است در دبی‌های $12/5$ و $13/5$ لیتر بر ثانیه در سه نسبت h/L_w کمتر از $0/03$ ناهماهنگی در نتایج ضریب دبی مشاهده می‌گردد.

با بررسی نتایج مشخص گردید که نسبت کاهش ضریب دبی با افزایش نسبت h/L_w برای طول سرریز تا 112 سانتی‌متر یک روند معنادار دارد ولی برای طول سرریز بزرگتر از آن روند دیگری مشاهده می‌گردد که در شکل‌های 5 و 6 قابل مشاهده است.

نمودار تغییرات C سرریز نعل اسبی نسبت به $\sqrt{gL_w}/V$ برای طول‌های مختلف سرریز، در شکل 7 برای مدل ارائه شده است. با دقت در نمودار ارائه شده مشخص می‌گردد که با افزایش نسبت $\sqrt{gL_w}/V$ در هر یک از طول‌ها، ضریب دبی در محدوده مشخصی افزایش پیدا می‌کند. این افزایش در محدوده $0/6$ الی $0/7$ می‌باشد.

تحلیل ابعادی: پارامترهایی که در مطالعه ضریب دبی سرریز نعل اسبی با اهمیت بوده و در این تحقیق مد نظر قرار گرفته‌اند عبارت‌اند از:

L_w : طول مؤثر سرریز

t : ضخامت دیواره سرریز

V : سرعت جریان قبل از سرریز

μ : لزجت آب

σ : کشش سطحی

h : بار آبی (هد) روی سرریز

P : ارتفاع سرریز بیرونی

D : قطر قسمت نیم‌دایره سرریز

ρ : چگالی آب

g : شتاب ثقل

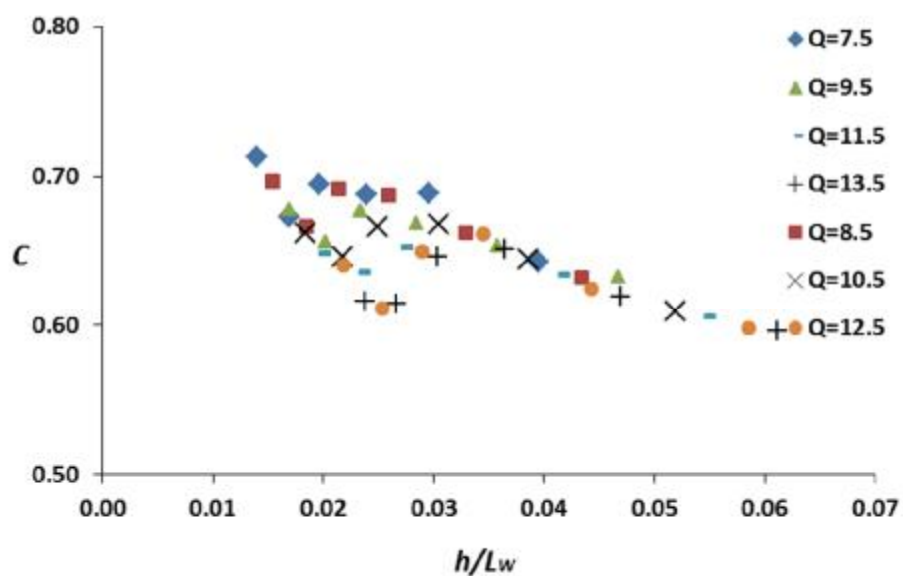
تابع کلی متغیرهای مؤثر در سرریز نعل به صورت ذیل می‌باشد:

$$f_1 \left(\frac{h}{L_w}, h, t, P, V, D, \ddot{\theta}, \frac{m}{r}, \mu, \sigma, g, C, \frac{\ddot{\theta}}{\theta} \right) = 0 \quad [2]$$

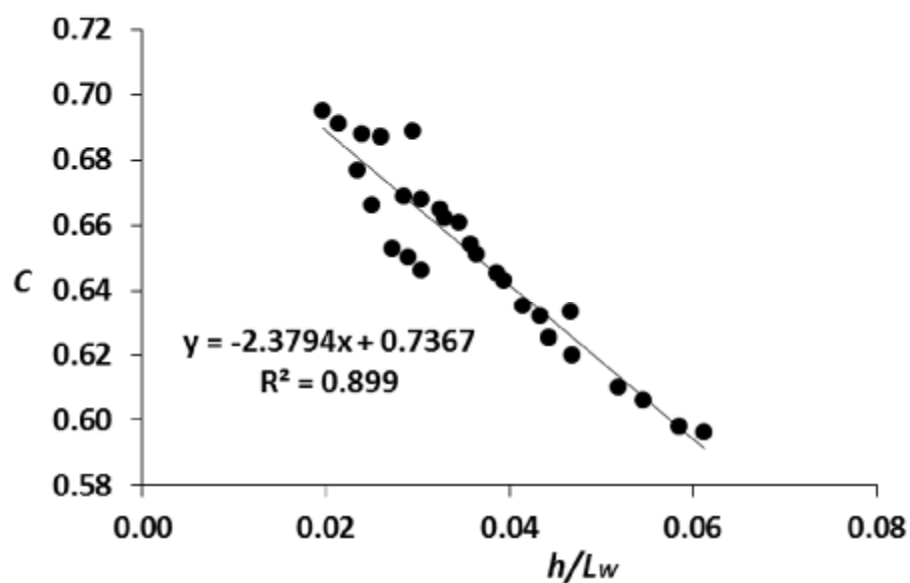
اگر سه پارامتر V, L_w, ρ به‌عنوان متغیرهای تکراری در نظر گرفته شود، ضریب دبی (C) تابعی از پارامترهای بی‌بعد زیر خواهد بود که از تحلیل ابعادی به‌روش باکینگهام به‌دست آمده‌اند:

$$C = f_2 \left(\frac{h}{L_w}, \frac{t}{L_w}, \frac{P}{L_w}, \frac{D}{L_w}, \frac{\ddot{\theta}}{\theta}, \frac{\sqrt{gL_w}}{V}, \frac{m}{r VL_w}, \frac{s}{r L_w} \right) \quad [3]$$

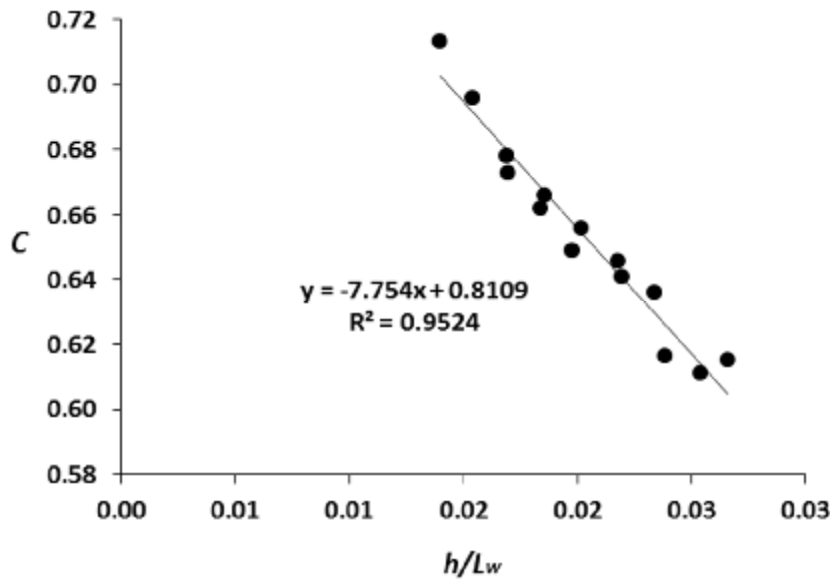
عبارات $\sqrt{gL_w}/V, m/(r VL_w)$ به‌ترتیب بیان‌کننده اثر اعداد بی‌بعد رینولدز و فرود می‌باشند. به‌منظور جلوگیری از تأثیر کشش سطحی کمینه ارتفاع آب روی سرریز برابر 2 سانتی‌متر لحاظ شده است (نواک و همکاران 2010). لذا با توجه به توضیح ارائه شده می‌توان



شکل 4- تغییرات C نسبت به h/L_w برای سرریز نعل اسبی به ازای دبی‌های مختلف.



شکل 5- تغییرات C نسبت به h/L_w برای طول سرریز کوچکتر از 112 سانتی‌متر.



شکل 6- تغییرات C نسبت به h/L_w برای طول سرریز بزرگتر از 112 سانتی متر.

پروفیل جریان بر روی سرریز

محل برداشت پروفیل‌های جریان در دو جهت عمود بر هم AA و BB (رجوع به شکل 2) نشان داده شده است.

به‌عنوان نمونه پروفیل جریان بر روی سرریز نعل اسبی برای دبی 11/5 لیتر بر ثانیه در شکل‌های 9 و 10 ترسیم گردید. پروفیل عرضی در فاصله 35 سانتی متری از دیواره انتهایی مخزن برداشت و ترسیم شده و پروفیل طولی در محل محور مرکزی سرریز، برداشت و ترسیم گردیده است.

با مشاهده پروفیل عرضی جریان مشخص می‌گردد که برای یک دبی ثابت با کاهش طول مؤثر سرریز، بار آبی روی سرریز افزایش و فاصله تیغه جریان از دیواره سرریز افزایش می‌یابد. همچنین ارتفاع پرش هیدرولیکی که در داخل این نوع سرریز اتفاق می‌افتد، در شکل‌ها قابل مشاهده است. ارتفاع این پرش با افزایش طول سرریز کاهش می‌یابد. در پروفیل طولی نیز مسأله ذکر شده قابل مشاهده است.

شکل 7 نشان می‌دهد که با کاهش عدد فرود، ضریب دبی از 0/6 افزایش می‌یابد. لازم به ذکر است که برای محاسبه عدد فرود بی‌بعد در رابطه 4 از سرعت متوسط استفاده شده است.

با توجه به نتایج به‌دست آمده، روابطی برای تعیین ضریب دبی با کمک نسبت $\sqrt{gL_w}/V$ برای طول‌های مختلف به صورت جدول 1 ارائه گردید.

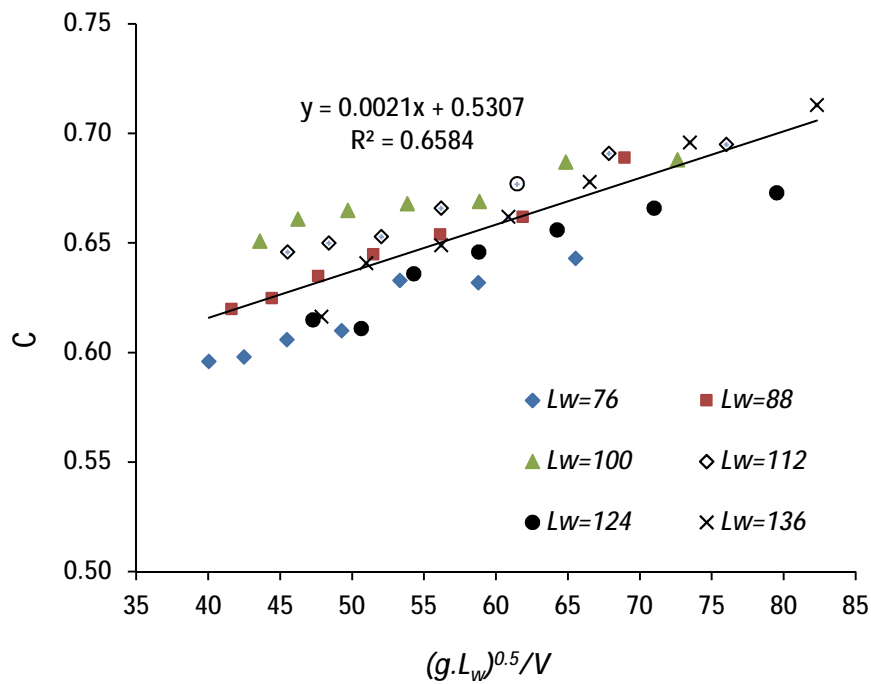
نمودار تغییرات C سرریز نعل اسبی نسبت به $m/(r VL_w)$ در شکل 8 برای سرریز نعل اسبی ارائه شده است. ملاحظه می‌گردد که با افزایش نسبت $m/(r VL_w)$ ضریب دبی در محدوده مشخصی افزایش پیدا می‌کند. این افزایش در محدوده 0/6 الی 0/7 می‌باشد. همچنین با توجه به نتایج، روابط خطی مطابق جدول 2 برای تعیین ضریب دبی بر اساس عدد بی‌بعد $m/(r VL_w)$ برای هر یک از طول‌ها قابل ذکر است.

جدول 1 - رابطه رگرسیونی ضریب دبی و $\sqrt{gL_w}/V$.

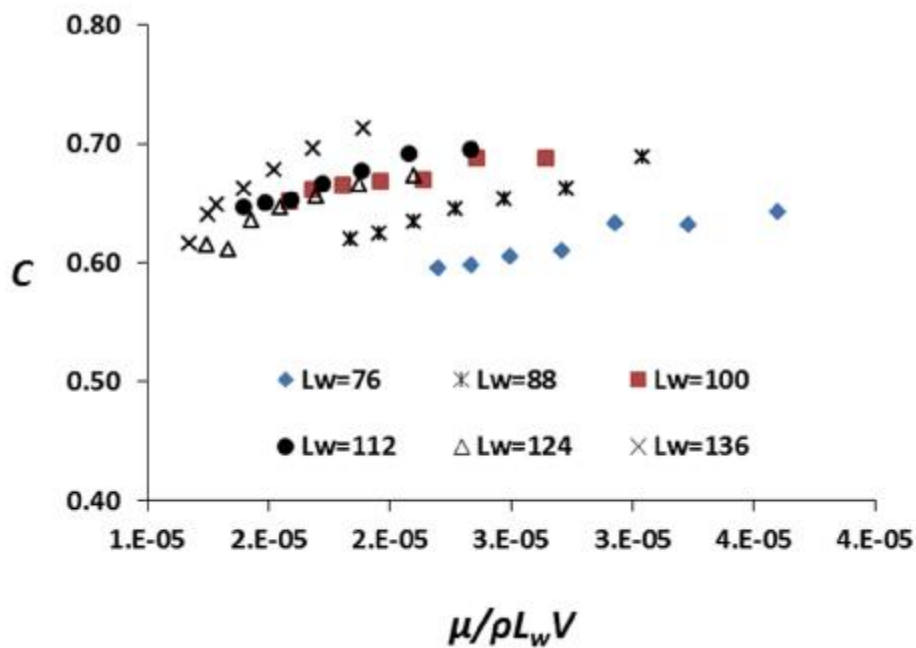
R ²	رابطه برازشی	طول سرریز (cm)
0.9273	$C = 0.002(\sqrt{L_w \cdot g} / V) + 0.516$	76
0.9827	$C = 0.0024(\sqrt{L_w \cdot g} / V) + 0.519$	88
0.9132	$C = 0.0012(\sqrt{L_w \cdot g} / V) + 0.601$	100
0.9643	$C = 0.0018(\sqrt{L_w \cdot g} / V) + 0.565$	112
0.9071	$C = 0.002(\sqrt{L_w \cdot g} / V) + 0.523$	124
0.975	$C = 0.0027(\sqrt{L_w \cdot g} / V) + 0.499$	136

جدول 2- رابطه رگرسیونی ضریب دبی و $m/(rVL_w)$.

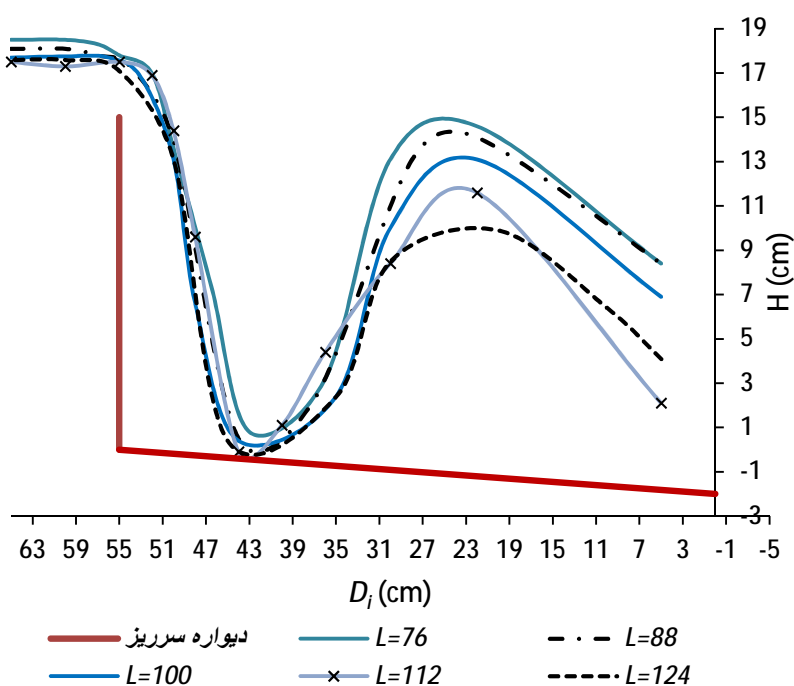
R ²	رابطه	طول سرریز (cm)
0.9273	$C = 3607 \frac{m}{e \sqrt{r} L_w} + 0.52$	76
0.9827	$C = 5459 \frac{m}{e \sqrt{r} L_w} + 0.52$	88
0.9132	$C = 3377 \frac{m}{e \sqrt{r} L_w} + 0.60$	100
0.9643	$C = 5806 \frac{m}{e \sqrt{r} L_w} + 0.57$	112
0.9071	$C = 7525 \frac{m}{e \sqrt{r} L_w} + 0.52$	124
0.9573	$C = 12657 \frac{m}{e \sqrt{r} L_w} + 0.48$	136



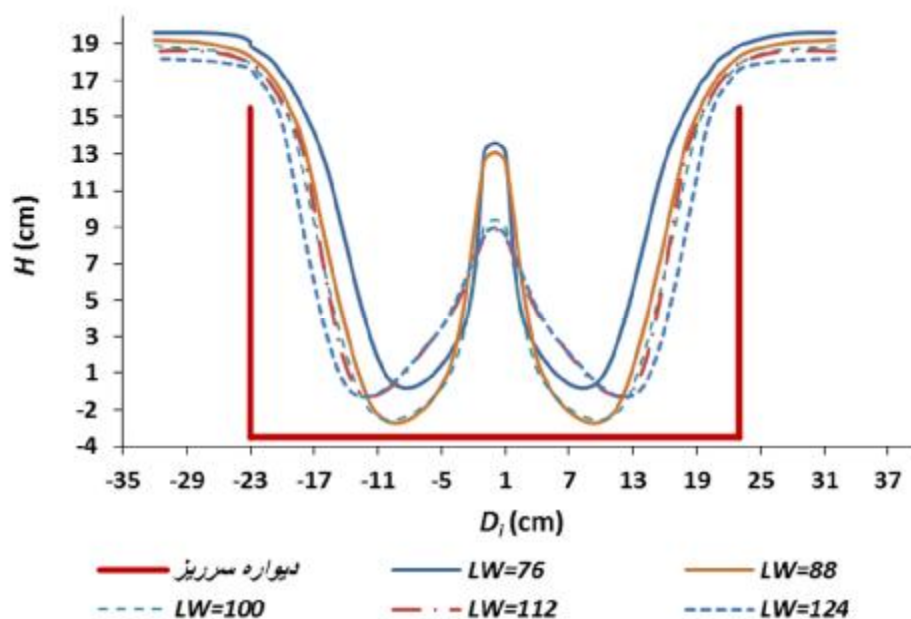
شکل 7- تغییرات C نسبت به $\sqrt{gL_w}/V$ برای سرریز نعل اسبی.



شکل 8- تغییرات C نسبت به $m/(\rho L_w V)$ برای سرریز نعل اسبی.



شکل 9- پروفیل طولی سطح آب (مقطع A-A) جریان در دبی 11/5 لیتر بر ثانیه.



شکل 10- پروفیل عرضی سطح آب (مقطع B-B) جریان در دبی 11/5 لیتر بر ثانیه.

مستطیلی و نعل اسبی را نشان می‌دهد. با توجه به شکل مذکور مشخص می‌گردد که زیادی بین بار آبی سرریز در حالت مستطیلی و نعل اسبی وجود دارد و سرریز نعل اسبی موفق شده است، برای دبی‌های مختلف، به مقدار میانگین 54 درصد از بار آبی روی سرریز نسبت به بار

سرریز مستطیلی: به منظور مقایسه عملکرد سرریز نعل اسبی با سرریز هم عرض مستطیلی، سرریز مستطیلی در عرض معادل سرریز نعل اسبی ساخته شد و نتایج حاصل از آزمایش‌ها ثبت و تحلیل شد. شکل 11 نمودار مقایسه‌ای بار آبی روی سرریز برای سرریز

می‌پیوندند. در شکل 12 تصویر جریان‌های مذکور ارائه شده است.

با بررسی‌های انجام شده مشخص گردید که ارتفاع جریان پشت تیغه با افزایش دبی و کاهش طول سرریز بیرونی، افزایش یافته و مابین 4 الی 7 سانتی‌متر می‌باشد.

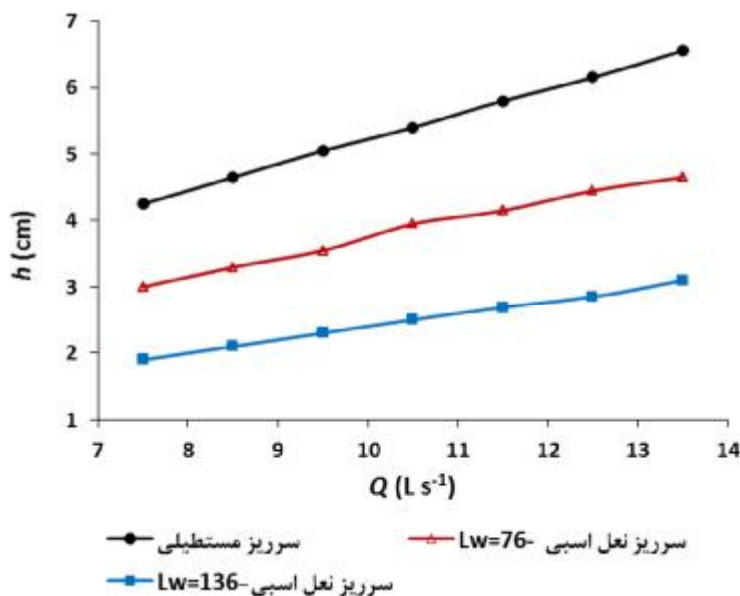
سرعت جریان: به‌منظور بررسی سرعت جریان در مخزن و اطمینان از ایجاد جریان آرام در داخل آن و همچنین ایجاد جریانی با سرعت نزدیک شونده آهسته و متناسب با شرایط مخزن واقعی، اندازه‌گیری سرعت در چند نقطه از مخزن و بر روی تاج سرریز نیز انجام گرفت. لازم به توضیح است که اندازه‌گیری سرعت در 3 تراز روی تاج، نصف بار آبی روی سرریز و 0/2 ارتفاع از سطح جریان انجام شده است. برای نشان دادن روند تغییرات سرعت در مخزن و روی سرریز، برای نمونه نتایج مربوط به سرریز با $L_w = 88\text{cm}$ در شکل 13 ارائه شده است.

همان‌طور که در شکل 13 مشاهده می‌گردد، به‌طور طبیعی با افزایش دبی، سرعت نیز افزایش می‌یابد.

آبی روی سرریز مستطیلی بکاهد. این میزان برای سرریز نعل اسبی با $L_w = 76\text{cm}$ برابر 28 درصد است.

الگوی جریان: در آزمایش‌های انجام گرفته برای سرریز نعل اسبی مشاهده گردید که جریان ریزشی از مخزن، در داخل سرریز به دو قسمت تقسیم می‌گردد: 1- جریان به سمت داخل سرریز، 2- جریان مابین دیواره سرریز و تیغه جریان.

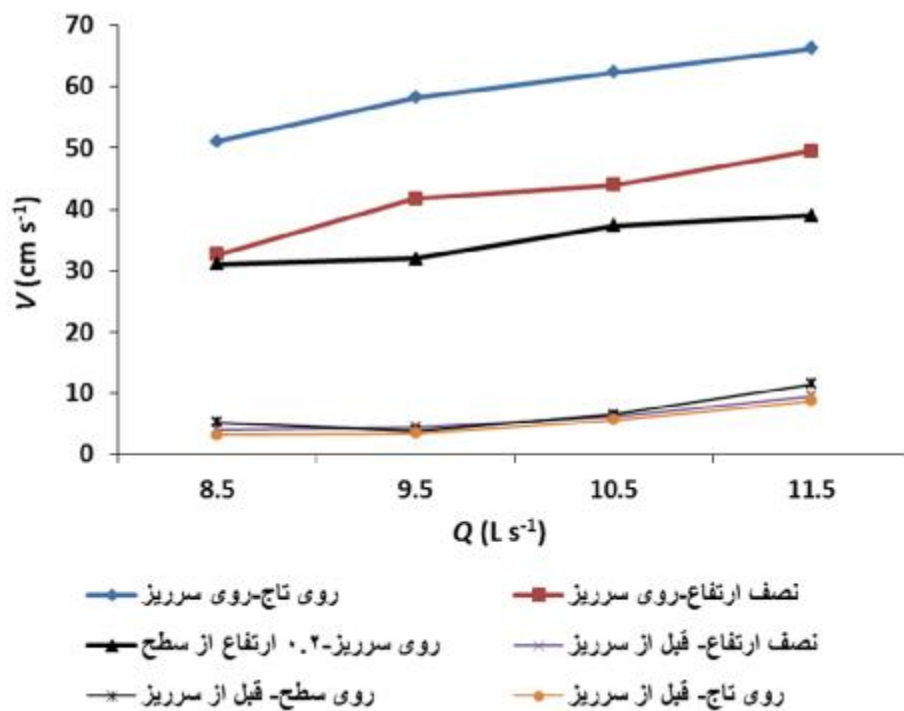
جریانی که به‌سمت داخل سرریز حرکت می‌نماید در محور وسط سرریز به جریانی که از وجه‌های مختلف سرازیر می‌شود، برخورد نموده و باعث به وجود آمدن پرش هیدرولیکی می‌شود. بعد از پرش هیدرولیکی، جریان با زاویه‌ای واگرا به دیواره‌ها برخورد می‌نماید. محل برخورد این جریان‌ها به دیوار، بسته به طول پرش، طول سرریز و دبی جریان متفاوت بوده ممکن است در بالادست شوت و یا داخل شوت انجام گیرد. جریان دوم (بین دیواره و تیغه جریان) به صورت چرخشی بوده و پس از حرکت در پشت تیغه جریان و تجمع در طول سرریز، از آخرین محل ریزش تیغه جریان در پایین‌دست، پرتاب شده و در محل تبدیل شوت به جریان اولیه



شکل 11- مقایسه‌ی بار آبی بین سرریز نعل اسبی (با $L_w = 76\text{cm}$ و $L_w = 136\text{cm}$) و سرریز مستطیلی.



شکل 12- جریان به سمت داخل سرریز و پشت تیغه جریان.



شکل 13- تغییرات سرعت جریان بر روی تاج و بالا دست سرریز (5 سانتی متری) در محل قوس سرریز نعل اسبی.

مذکور قابل توجه نبوده و می توان اعلام نمود که سرعت نزدیک شدن جریان به سرریز در حد قابل قبول است.

نتیجه گیری کلی

در طی آزمایش ها مشخص گردید که جهت جلوگیری از تلاطم جریان در مخازن نسبتاً کوچک و

روند افزایش سرعت در هر دو محل، تقریباً به صورت خطی بوده و در ارتفاع های ذکر شده نیز روند یکسانی را دنبال می نماید. با توجه به سرعت های اندازه گیری شده در داخل مخزن (5 سانتی متر به سمت بالا دست سرریز)، مشخص می گردد که سرعت های

جریان‌های سرریز شونده به‌داخل سرریز، پرش هیدرولیکی از نوع پرش دم خروسی به وجود می‌آید. مقایسه نتایج به‌دست آمده از آزمایش‌ها برای سرریز مستطیلی هم عرض سرریز نعل اسبی مؤید آن است که تفاوت زیادی بین بار آبی روی سرریز مستطیلی و نعل اسبی برای یک دبی مشخص وجود دارد و سرریز نعل اسبی موفق شده است برای دبی‌های مختلف بار آبی روی سرریز را به مقدار میانگین 54 درصد (با $L_w=136\text{cm}$) کاهش دهد. با توجه به عدم وجود مطالعات و پژوهش‌های مختلف در خصوص سرریزهای نعل اسبی، به‌نظر می‌رسد انجام تحقیقاتی در خصوص موارد پیشنهادی ذیل، دارای دست‌آوردهای مناسبی باشد.

1- بررسی تأثیر شکل دیواره سرریز نعل اسبی (در مقطع) در پارامترهای هیدرولیکی آن. 2- ساخت همزمان مدل سرریز نعل اسبی و یک سازه هیدرولیکی دیگر (از جمله آبگیر) در یک سازه واحد و بررسی اثر متقابل سازه‌ها بر شرایط هیدرولیکی یکدیگر. 3- شبیه‌سازی عددی سرریز نعل اسبی با استفاده از نرم‌افزارهای دینامیک سیالات محاسباتی. 4- مقایسه عملکرد سرریز نعل اسبی با سرریزهای کنگره‌ای و سرریزهای جانبی.

ایجاد جریان آرام در مخزن که دارای سرعت نزدیک شدن کمی باشد، استفاده از آرام‌کننده با عرض 10 سانتی‌متر که دارای مصالح شن با اندازه ذرات 18-32 میلی‌متر است، بسیار مناسب بوده و برای آزمایش‌ها گوناگون توصیه می‌شود.

نتایج حاصل از سنجش سرعت مخزن نیز مؤید این مسأله است. در سرریزهای نعل اسبی که نمونه‌های واقعی (پروتوتیپ) آن در سدهای مختلف در حال افزایش است، با افزایش نسبت h/L_w ضریب دبی در محدوده $0/6$ الی $0/7$ کاهش پیدا می‌کند. با بررسی نتایج مشخص گردید که نسبت کاهش ضریب دبی با افزایش نسبت h/L_w ، برای طول سرریز کوچکتر از 112 سانتی‌متر و بزرگتر از آن روند متفاوتی دارد و لذا روابط خطی برای تعیین C با استفاده از نسبت مذکور ارائه شدند که دارای R^2 مناسبی بودند. همچنین در این نوع سرریز تأثیر اعداد بی‌بعد $\sqrt{gL_w}/V, m/(rVL_w)$ به صورتی است که با افزایش نسبت‌های مذکور، ضریب دبی در محدوده $0/6$ الی $0/7$ افزایش پیدا می‌کند. در این نوع سرریز جریان ریزشی از مخزن به داخل سرریز به دو قسمت تقسیم می‌گردد: الف) جریان بین دیواره سرریز و تیغه جریان ب) جریان به‌سمت داخل سرریز که در اثر برخورد

منابع مورد استفاده

بازرگان ج و مهرانی س، 1386. بررسی تأثیر پارامترهای مؤثر بر روی ضریب دبی سرریزهای نیم دایره‌ای در پلان، ششمین کنفرانس هیدرولیک ایران، دانشگاه شهرکرد.
حیدرپور م، موسوی ف و روشنی زرمهری ع، 1385. بررسی سرریزهای چند وجهی با پلان مستطیلی و U شکل، مجله علوم و فنون کشاورزی و منابع طبیعی، سال 10، شماره 3 (الف)، صفحه‌های 1 تا 11.
شمسائی ا، 1385. طراحی و ساخت سدهای مخزنی، جلد چهارم (تأسیسات هیدرولیکی)، انتشارات دانشگاه علم و صنعت ایران.

Aydin CM, 2011. CFD simulation of free-surface flow over triangular labyrinth side weir, J Advances in Engineering Software 45: 159–166.
Falvey HT, 2003. Hydraulic Design of Labyrinth Weirs, ASCE, USA.
Kaya N, Emiroglu ME and Agaccioglu H, 2011. Discharge coefficient of a semi-elliptical side weir in subcritical flow, Journal of Flow Measurement and Instrumentation 22: 25–32.
Khatsuria RM, 2005. Hydraulics of Spillways and Energy Dissipators, Marcel Dekker Press, New York.
Novak P, Guinot V, Jeffrey A and Reeve D, 2010. Hydraulic Modelling –An Introduction, Spon Press, New York.