



دانشگاه گواران

نشریه پژوهش‌های حفاظت آب و خاک

جلد بیست و هفتم، شماره ششم، ۱۳۹۹

۴۷-۶۶

<http://jwsc.gau.ac.ir>

DOI: 10.22069/jwsc.2021.17114.3258

مقاله کامل علمی - پژوهشی

بررسی آزمایشگاهی عملکرد هیدرولیکی سرریزهای پلکانی قوس محور متأثر از تغییرات شیب کانال تبدیل پایین دست

*علی فرودی^۱، کیومرث روشنگر^۲ و علیرضا آقائی فر^۳

^۱استاد مدعو گروه مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی قوچان، ^۲استاد دانشکده مهندسی عمران، گروه مهندسی آب، دانشگاه تبریز،

^۳مری دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه پیام‌نور مشهد

تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۰۶/۱۷؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۰۹/۲۵

چکیده

سابقه و هدف: سرریز پلکانی نقش قابل ملاحظه‌ای در اتلاف مؤثر انرژی جریان داشته و به‌عنوان قدرتمندترین سازه هیدرولیکی نسبت به سرریز اوجی برای مستهلک کردن انرژی جریان شناخته می‌شود. اگرچه پژوهش‌های متعددی در این زمینه انجام شده است، اما بررسی‌ها بیانگر آن است باوجود این پژوهش‌های متعدد، هیدرولیک جریان سرریزهای پلکانی قوس محور متأثر از تغییرات شیب کانال تبدیل پایین دست تاکنون مورد توجه قرار نگرفته و پژوهشی بر روی آن انجام نشده است به همین دلیل هیدرولیک این نوع خاص سرریز تاکنون ناشناخته مانده است، بنابراین در این پژوهش سرریز پلکانی قوس محور با دیواره‌های هادی متقارب تحت تأثیر تغییرات شیب تبدیل مورد آزمایش واقع شده است.

مواد و روش‌ها: این پژوهش با هدف بررسی آزمایشگاهی عملکرد هیدرولیکی سرریزهای پلکانی قوس محور تحت تأثیر تغییرات شیب کانال تبدیل انجام شده است. آزمایش‌ها در یک فلوم مستطیلی به طول ۱۵ متر، ارتفاع ۱ متر و عرض ۱ متر انجام شد. آزمایش‌ها به ازای دبی‌های مختلف بین ۰/۱۵ تا ۲/۰۱ برابر دبی طراحی سرریز انجام گردید و مدل فیزیکی ساخته شده تحت ۴ شیب کانال تبدیل پایین دست (m) شامل ۱:۲۷، ۱:۳۰، ۱:۳۳ و ۰ مورد آزمایش قرار گرفت.

یافته‌ها: نتایج آزمایش‌ها نشان داد که در سرریزهای پلکانی قوس محور تحت اثر تغییرات شیب کانال تبدیل پایین دست (m) با کاهش شیب تبدیل، ظرفیت تخلیه سرریز به‌ازای بالاترین هد مجاز بیش‌تر خواهد شد. هم‌چنین در بازه $\frac{H}{H_d} < 0.7$ (بار آبی کل بر هد طراحی) مقدار ضریب دبی در مدل فیزیکی پلکانی در همه شیب‌ها کم‌تر از مدل صاف USBR مشاهده گردید. در بازه $0.7 < \frac{H}{H_d} < 1.3$ این مقدار با ضریب آبگذری سرریز USBR تطابق دارد، اما با افزایش بار آبی در تمامی شیب تبدیل‌ها، به دلیل استغراق سرریز، نمودار ضریب دبی روند کاهشی به خود گرفته و

* مسئول مکاتبه: aliforudi.civil@yahoo.com

کاهش کارایی سرریز نسبت به سرریز اوجی استاندارد USBR مشاهده می‌شود. علاوه بر این، آزمایش‌ها نشان داد، مدل‌های با شیب کانال تبدیل $m=0$ و $m=1.33$ تنها مدل‌هایی می‌باشند که در مقیاس واقعی توان عبور حداکثر دبی سیلاب محتمل را در حداکثر ارتفاع مجاز (۵m) دارا است و از آنجایی که شیب کانال گذار $m=1.33$ دارای ابعاد هندسی کوچک‌تری در کانال پایین‌دست در مقایسه با شیب کانال گذار $m=0$ است، بنابراین این شیب می‌تواند به‌عنوان مناسب‌ترین شیب تبدیل در کانال پایین‌دست معرفی گردد.

نتیجه‌گیری: نتایج کمی و کیفی پژوهش حاضر به‌صورت زیر خلاصه می‌گردد.

۱- در سرریزهای پلکانی قوس محور با افزایش بار آبی بالادست، ضریب دبی به ازای تمامی شیب تبدیل‌ها افزایش می‌یابد و نیز تا هنگامی که سرریز در محدوده جریان‌های بحرانی و فوق بحرانی قرار دارد، تغییرات شیب تبدیل تأثیر فراوانی بر ضریب دبی ندارد. علی‌رغم این، وقتی سرریز مستغرق می‌گردد، تفاوت در ضریب دبی نمایان می‌شود که می‌تواند به خاطر استغراق موضعی در پایاب باشد. ۲- استهلاک انرژی با افزایش دبی کاهش می‌یابد، اما مدل‌ها با مقادیر شیب تبدیل کوچک‌تر انرژی بیش‌تری را در دبی‌های بالاتر مستهلک می‌کنند. ۳- مدل با شیب کانال تبدیل $m=1.33$ که توان عبور حداکثر دبی سیلاب محتمل را در حداکثر ارتفاع مجاز (۵m) دارا است می‌تواند به‌عنوان مناسب‌ترین شیب تبدیل در کانال پایین‌دست معرفی گردد.

واژه‌های کلیدی: سرریز پلکانی، عملکرد هیدرولیکی، قوس محوری، کانال تبدیل، مدل فیزیکی

مقدمه

شیب‌دار، استهلاک انرژی و کارایی حوضچه آرامش روی مدل دوبعدی سرریز پلکانی بتن غلطکی پرداختند. نتایج نشان داد که پله‌ها عوامل مؤثر در استهلاک انرژی‌اند، به‌عنوان نمونه در دبی ماکزیمم $14/5 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$ استهلاک انرژی روی سرریز پلکانی ۴۸٪ و روی سرریز صاف ۲۰٪ گزارش گردید (۱۴). اژدری مقدم (۱۹۹۷) هیدرولیک جریان روی سرریز پلکانی را با ۴ شکل مختلف پله و ۳ شیب بررسی کرد و با توجه به تأثیر شکل پله و شیب‌های مختلف سرریز به ارزیابی فاکتورهای اصطکاک و اتلاف انرژی پرداخت و همچنین شکل بهینه پله را تعیین نمود (۲). چانسون (۲۰۰۰) افت کل انرژی (ΔH) را در صورتی که جریان در انتهای سرریز به شرایط یکنواخت برسد از رابطه‌های ۱ و ۲ محاسبه کرد:

مدیریت و انتقال آب یکی از مباحث مهم در طول توسعه تمدن بشر است. برای پاسخ‌گویی به نیازها، سازه‌های هیدرولیکی متنوعی طراحی و ساخته شده است. سرریز پلکانی متشکل از پله‌هایی است که از نزدیکی تاج سرریز شروع شده و تا پایین‌دست سرریز ادامه دارد. استهلاک بالای انرژی از جمله مهم‌ترین ویژگی این نوع سرریز به شمار می‌رود، به‌طوری‌که بخش عظیمی از انرژی جنبشی جریان حین عبور آب از روی پله‌های متوالی به پایین‌دست سرریز کاهش می‌یابد. در کنار امکانات و پیشرفت‌های گسترده در امر ساخت سدهای بزرگ، لزوم توسعه روش‌های طراحی و ساخت سیستم‌هایی که بتوانند سیلاب‌ها را به‌درستی تخلیه کنند، مطرح می‌گردد. رایس و کاداوی (۱۹۹۶) به بررسی جریان انتقالی روی تاج سرریز به‌سمت پله‌های

سرریز بدون دریچه:

$$\frac{\Delta H}{H_{max}} = 1 - \frac{\left(\frac{f_e}{8\sin\alpha}\right)^{1/3} \cos\alpha + \frac{1}{2}\left(\frac{f_e}{8\sin\alpha}\right)^{-2/3}}{\frac{3}{2} + \frac{H_{dam}}{d_c}} \quad (1)$$

سرریز با دریچه:

$$\frac{\Delta H}{H_{max}} = 1 - \frac{\left(\frac{f_e}{8\sin\alpha}\right)^{1/3} \cos\alpha + \frac{1}{2}\left(\frac{f_e}{8\sin\alpha}\right)^{-2/3}}{\frac{H_{dam} + H_0}{d_c}} \quad (2)$$

آن‌ها نشان داد هر چه نسبت عرض $\left(\frac{W_{ch}}{W}\right)$ بزرگ‌تر باشد پارامتر استهلاک انرژی (ΔE) به ازای یک دبی خاص کوچک‌تر خواهد بود (۱۱). افشون و همکاران (۲۰۱۹) در پژوهشی به بررسی افت انرژی در سرریزهای پلکانی با وجود موانع بر روی پله‌ها با مدل فیزیکی و مدل ریاضی فلو تری دی^۱ پرداختند، نتایج نشان داد افزایش طول و عرض موانع باعث افزایش استهلاک شده است. هم‌چنین میزان افت انرژی در موانع مستطیلی بیش‌تر از موانع ذوزنقه‌ای و به‌ترتیب برابر با ۱۳/۷ و ۱۱/۲ نسبت به مدل شاهد بوده است (۱). بنی‌شعیب و همکاران (۲۰۲۰) افت انرژی در سرریزهای پلکانی-زیگزاگی را مورد مطالعه قرار دادند، نتایج حاصله بیانگر این مطلب بود که در ترکیب سرریز پلکانی با سرریز زیگزاگی از نظر شکل پله، به‌ترتیب در اشکال ذوزنقه‌ای، مستطیلی و مثلثی میزان افت انرژی بیش‌تر است، هم‌چنین سرریزهای زیگزاگی دو سیکله دارای افت انرژی بیش‌تری نسبت به تک سیکله‌ها می‌باشند (۳). در ارتباط با سرریزهای پلکانی با تاج اوجی شکل، یادآوری این نکته ضروری است که یک تغییر در پارامترهای طراحی استاندارد مانند تغییر در شرایط جریان بالادست، تصحیح جزئی در شکل تاج، یا تغییر سازه‌ای می‌تواند مشخصه‌های

که در آن‌ها، f_e فاکتور اصطکاک جریان‌های آب- هوا، H_{dam} هد بالادست سرریز، α شیب سرریز، d_c عمق بحرانی اختلاف ارتفاع تاج تا پنجه سرریز، H_0 ارتفاع سطح آزاد مخزن در بالای تاج سرریز می‌باشد (۶). سانچز جانی و همکاران (۲۰۰۲) با انجام مطالعات آزمایشگاهی بر روی سرریز پلکانی RCC، توزیع میدان فشار در جریان‌های مستغرق ایجادشده بر روی پلکان‌ها را بررسی نمودند (۱۶). بوس و هگر (۲۰۰۳) نیز با تمرکز در مورد هوادهی سطح آزاد و غلظت هوا، سرریزهای پلکانی را به طریق آزمایشگاهی مورد مطالعه قرار دادند و روابطی را جهت طراحی این سرریزها ارائه نمودند (۴). سوری و مجتهدی (۲۰۱۵) به بررسی الگوی جریان عبوری روی سرریز پلکانی با استفاده از مطالعه عددی و مدل فیزیکی پرداختند. نتایج نشان داد که در هر دو رژیم تیغه‌ای و رویه‌ای تغییرات حاصل از هندسه‌های متفاوت در افزایش افت انرژی مؤثر است اما تأثیر این پارامترها در رژیم جریان تیغه‌ای بسیار بیش‌تر از رژیم جریان رویه‌ای می‌باشد (۱۷). فرودی و همکاران (۲۰۱۸) عملکرد هیدرولیکی سرریز پلکانی قوس محور را تحت تأثیر تغییرات نسبت عرض کانال پایین‌دست سرریز به عرض سرریز در تاج $\left(\frac{W_{ch}}{W}\right)$ در بازه ۰/۲۱۴ تا ۰/۲۸۶ مورد بررسی قرار دادند. نتایج

بالادست، رقوم کف‌بند و درجه استغراق و نیز تأثیر این شیب بر استهلاك انرژی بررسی گردید.

مواد و روش‌ها

در این پژوهش مدلی فیزیکی از سرریز سد گرمی چای با وجه تمایز سطح بدنه‌ای پلکانی نسبت به نمونه واقعی، مورد بررسی قرار گرفت. آزمایش‌های در پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری جهاد کشاورزی بر روی این مدل پلکانی قوس محور با مقیاس ۱:۵۰، در زاویه همگرایی ۱۲۰ درجه دیواره‌های هادی انجام شد. مدل سرریز با استفاده از جنس پلی‌اتیلن که ضد آب است ساخته و برای ساخت دیواره‌ها و کانال از پلکسی‌گلاس استفاده گردید. پروفیل استاندارد تاج سرریز دارای معادله $y = -0.196524x^{1.85}$ است که توسط دو قوس با شعاع‌های $R_1=4.8\text{cm}$ و $R_2=1.2\text{cm}$ به وجه قائم بالادست متصل شده است. در زیر نقطه تماس، پروفیل سرریز، شیب $IH:IV$ را داشته که توسط یک اوجی به قوس $10/59\text{ cm}$ به پنجه متصل شده است. از پله ۴ به بعد ارتفاع پله‌ها یکنواخت و برابر $1/05\text{ cm}$ بوده‌اند. ارتفاع ۴ پله اول متغیر و به ترتیب برابر $0/5$ ، $0/6$ ، $0/7$ و $0/9$ سانتی‌متر، در نظر گرفته شد تا نوک پله‌ها بر پروفیل استاندارد سرریز مماس باشد. به منظور تشابه شرایط هیدرولیکی در مدل و نمونه واقعی از تشابه فرودی استفاده گردید، مشروط بر آن‌که عدد رینولدز از حد خاصی (10^4) بزرگ‌تر بوده تا اثر لزجت قابل صرف‌نظر باشد (۲۰). در جدول ۱ خلاصه پارامترهای طراحی برای مدل و نمونه واقعی ارائه شده است. آزمایش‌ها به ازای دبی‌های مختلف بین $0/15$ تا $2/01$ برابر دبی طراحی انجام گردید و مدل فیزیکی ساخته شده تحت ۴ شیب کانال تبدیل پایین‌دست (m) شامل $1:27$ ، $1:30$ ، $1:33$ و 0 مورد آزمایش قرار گرفت. توضیح بر این‌که در شیب‌های $1:27$ ، $1:30$ و $1:33$ در

جریان را تغییر دهد. هم‌چنین می‌دانیم به‌منظور تحقق اهداف مطالعات طرح‌های سدسازی، تمام عوامل مؤثر بر طرح مانند نوع سد، کمیت و کیفیت مصالح مصرفی، نحوه قرارگیری تأسیسات وابسته به سد، به‌ویژه سرریز با توجه به مجموع شرایط توپوگرافی، ژئوتکنیکی، شرایط پی و باربری جناحین، هیدروکلیماتولوژی و هیدرولیک مورد بررسی عمیق قرار می‌گیرند. با توجه به ویژگی‌های ذکر شده، سایت‌هایی با چنین خصوصیات، محدود به نظر می‌رسد و حال این‌که کم‌عرض بودن بستر رودخانه در پایین‌دست، وجود ریخت‌شناسی و ساختار زمین نامناسب در جناحین و مسائلی شبیه به این، ممکن است دلیل بسیاری از تغییر سایت‌های ناخواسته برای ساخت سازه سرریز شده باشد. کم‌عرض بودن بستر رودخانه در پایین‌دست، ورود جریان بلافاصله بعد از سرریز به تونل‌های کم‌عرض و یا تونل‌های با عرض کم‌شونده در راستای طولی تونل، و مانند این، یکی از محدودیت‌هایی است که در این طرح به آن پرداخته شده است. علاوه بر این، پژوهش‌های هیدرولیکی متعددی در خصوص جریان و پارامترهای هیدرولیکی مربوطه بر روی سرریزهای پلکانی انجام شده است و طی این پژوهش‌ها روابط مختلفی برای نوع جریان و هم‌چنین محاسبات افت و استهلاك انرژی در طول سرریزهای پلکانی انجام شده گردیده است (۵، ۷، ۸، ۹، ۱۲ و ۱۹)، اما بررسی‌ها بیانگر آن است باوجود این پژوهش‌های متعدد، هیدرولیک جریان سرریزهای پلکانی قوس محور متأثر از تغییرات شیب کانال تبدیل تاکنون مورد توجه قرار نگرفته و پژوهشی بر روی آن انجام نشده است به همین دلیل هیدرولیک این نوع خاص سرریز تاکنون ناشناخته مانده است، بنابراین در این پژوهش سرریز پلکانی قوس محور با دیواره‌های هادی متقارب تحت تأثیر تغییرات شیب تبدیل کانال پایین‌دست مورد آزمایش واقع گردیده و اثر شیب کانال تبدیل بر روی پارامترهای مؤثره بر ضریب دبی مانند بار آبی کل در

که در شیب $m=0$ مقادیر عرض کانال در ورودی و خروجی با هم یکسان و معادل با عرض ۱۲ متر در نمونه واقعی است.

مدل فیزیکی عرض کانال پایین دست در ورودی و خروجی مقداری ثابت داشته و در مقیاس نمونه واقعی به ترتیب برابر با ۱۲ و ۹ متر می باشد و تنها عرض مقطع تبدیل است که متغیر است و این در حالی است

جدول ۱- پارامترهای طراحی برای مدل فیزیکی و نمونه واقعی.

Table 1. Model and Prototype Design Elements and Dimensions.

مدل‌های فیزیکی از نوع پلکانی Physical models				نمونه واقعی (سرریز اوجی) Prototype (Smooth ogee spillway)	مشخصات طراحی سرریز پلکانی Design elements
4	3	2	1		
0	1:33	1:30	1:27	0	شیب تبدیل پایین دست (m, %) Downstream transition channel slope
		0.24		12	عرض کانال پایین دست در ورودی ($W_{ch, m}$) Downstream channel input width
	0.24		0.18	9	عرض کانال پایین دست در خروجی ($W_{ch, m}$) Downstream channel output width
		6%		6%	شیب کانال پایین دست (S %) Downstream channel slope
		120		120	زاویه همگرایی دیواره‌های جانبی ($\theta, degree$) Convergence angle (θ) of training walls
		0.837		42.83	طول تاج (W, m) Crest length (m)
		0.0225		398	دبی طراحی ($Q_d, m^3/s$) Design head (m)
		0.0405		717	حداکثر دبی سیل ($Q_{PMF, m^3/s}$) Maximum flood discharge (m ³ /s)
		0.06		3	هد طراحی (H_d, m) Design head
		0.156		7.8	ارتفاع سرریز (P_m) Spillway height (m)

استفاده شد، برای برداشت داده‌ها قرائت پروفیل سطح آب توسط یک ارتفاعسنج در سراسر بدنه سرریز و در ۳ قطاع که خود شامل ۱۲ ایستگاه با مختصات معلوم بود انجام شد، یک قطاع بر روی خط مرکزی سرریز در پلان (Center Line) و ۱ قطاع دیگر در مجاورت دیواره‌های هادی و قطاع دیگر در بین این دو قطاع قرار داشت، برای برداشت فشار پیزومتری نیز از ۳۶

در شکل ۱ شماتیک سرریز پلکانی قوس محور تحت شیب‌های متفاوت کانال تبدیل و نیز تصاویری از همین مدل‌ها نشان داده شده است. آزمایش‌ها در انتهای فلومی به طول ۱۵ متر، عرض ۲ متر و ارتفاع ۱ متر از جنس مصالح بنایی بود انجام گرفت. برای اندازه‌گیری دبی جریان از یک سرریز لبه تیز مثلثی با زاویه رأس ۹۰ درجه در قسمت انتهایی کانال خروجی

دبی و عرض هر مقطع و برداشت عمق جریان در مقطع موردنظر انجام شد. در انتها نیز برای محاسبه استهلاک انرژی بر روی سرریز مشابه پژوهش شمسی و صداقت‌نژاد (۲۰۰۹)، میزان افت انرژی آزمایشگاهی از روابط زیر محاسبه گردید:

$$E_1 = P + H \tag{۳}$$

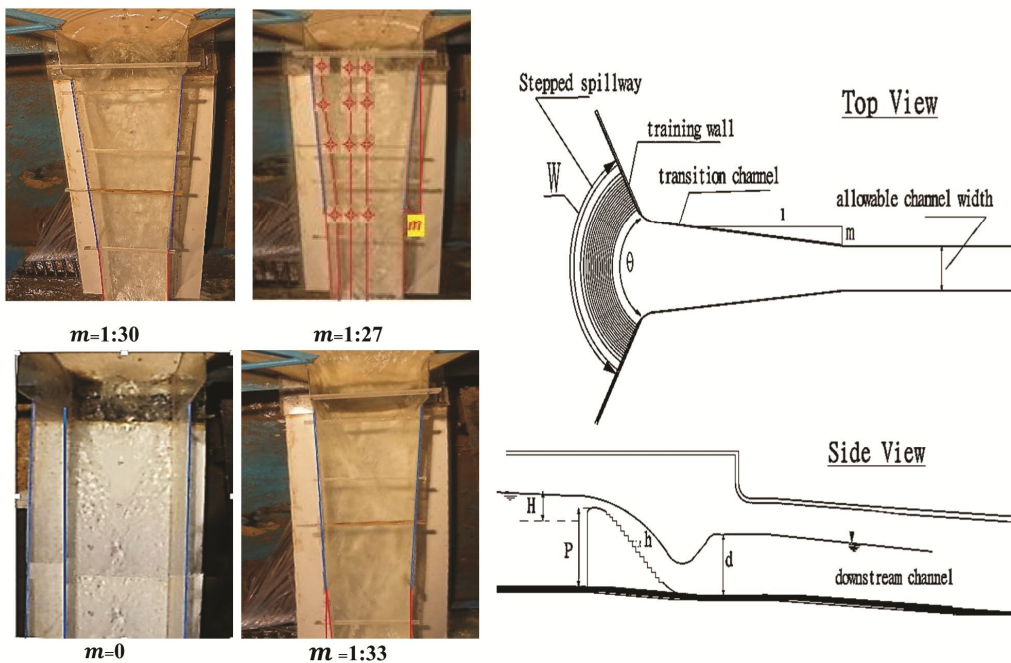
$$E_2 = d + \frac{V^2}{2g} = d + \frac{Q^2}{2gA^2} \tag{۴}$$

$$\Delta E(\%) = \frac{E_1 - E_2}{E_1} \times 100 \tag{۵}$$

مقطع جریان در پنجه، Q دبی جریان و H ضخامت تیغه آب بر روی تاج سرریز می‌باشد (۱۵).

پیزومتر واقع بر قطاع‌های مذکور، ۱۲ پیزومتر به ازای هر قطاع استفاده شد، شماتیک نقاط برداشت داده در شکل ۱ و به‌عنوان نمونه در چند نقطه از شیب $m=1:27$ نشان داده شده است (۱۱). محاسبات سرعت نیز با استفاده از رابطه پیوستگی با معلوم بودن

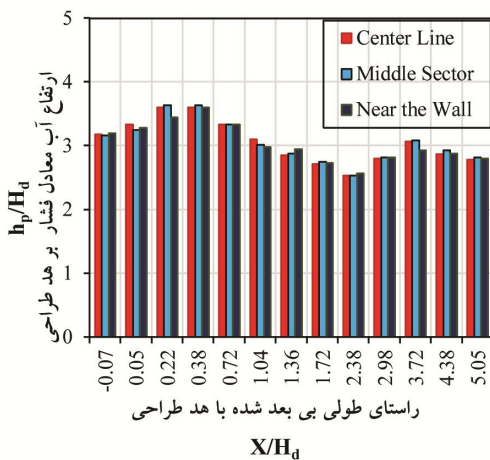
که در آنها، E_1 میزان انرژی در بالادست سرریز، P ارتفاع سرریز، E_2 انرژی در پنجه سرریز، d عمق جریان در پنجه، V سرعت جریان در پنجه، A سطح



شکل ۱- مدل شماتیکی و تصاویری از سرریز پلکانی قوس محور تحت شیب‌های مختلف کانال تبدیل پایین‌دست.

Figure 1. The schematic view and developed physical models of stepped spillway.

قطاع‌های برداشتی به‌عنوان نمونه رسم شده است. با توجه به مطالب فوق‌الذکر و شکل‌های مذکور برای مقایسه پارامترهای هیدرولیکی جریان در هر دبی از مقدارهای برداشتی در خط مرکزی سرریز (Center Line) به‌عنوان شاخص مقایسه استفاده گردید (۱۱).



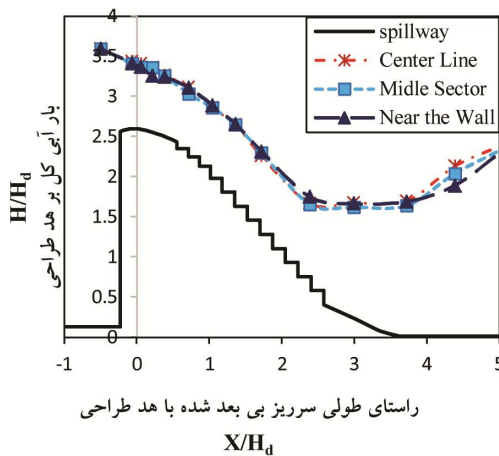
شکل ۳- پروفیل فشار بر امتداد طولی سرریز در دبی طراحی در مدل با $m = 0$.

Figure 3. The water surface profile diagram for the model with $m=0$.

است. در شکل ۵ داده‌های برداشت شده از پروفیل سطح آب به ازای m های مختلف در دبی $(1/s) 42/41$ معادل $(m^3/s) 750$ در نمونه واقعی، بالاترین دبی مشترک عبوری در بین تمامی مدل‌ها، جمع‌آوری شده است. همان‌طور که در شکل نشان داده شده است، به‌ازای شیب‌های تبدیل متفاوت هرچه مقدار شیب کانال تبدیل کاهش می‌یابد، از ارتفاع پروفیل سطح آب نیز کاسته می‌شود، علت این پدیده نیز چنین بیان می‌گردد با کاهش شیب کانال تبدیل، از همگرایی خطوط جریان در قسمت پنجه سرریز کاسته شده و متناسب با آن کاهش ارتفاع سطح جریان مشاهده می‌گردد.

نتایج و بحث

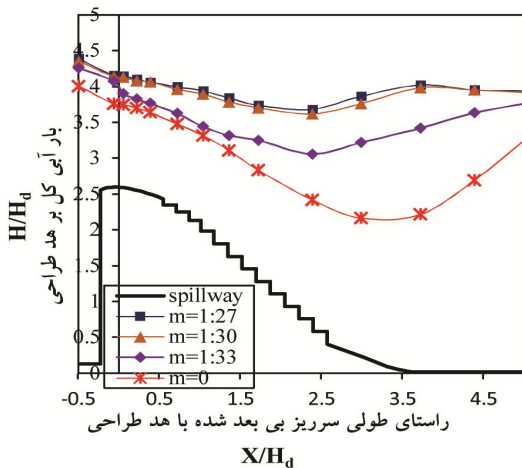
مشاهدات آزمایشگاهی نشان داد در تمامی مدل‌ها با شیب‌های متفاوت کانال تبدیل (m)، پارامترهای هیدرولیکی جریان در دو جناح سرریز متشابه می‌باشد. برای درک بهتر این موضوع، شکل‌های ۲ و ۳ که به‌ترتیب پروفیل سطح آب و پروفیل فشار پیرومتری در دبی طراحی در مدل با $m=1:27$ می‌باشد به ازای تمامی



شکل ۲- پروفیل سطحی آب بر امتداد طولی سرریز در دبی طراحی در مدل با $m = 0$.

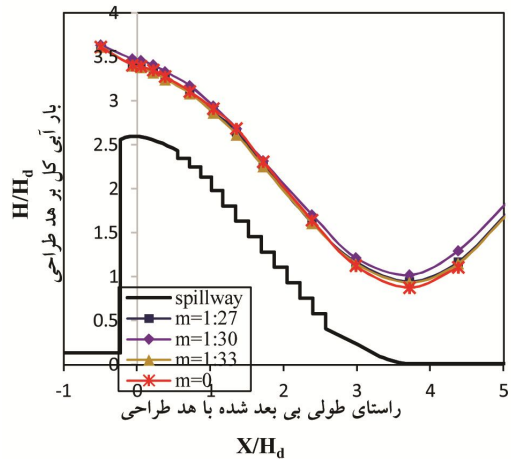
Figure 2. The piezometric pressure profile for the model with $m=0$.

پروفیل سطح آب: داده‌های برداشت شده از پروفیل سطح آب در امتداد خط مرکزی سرریز در شیب‌های تبدیل متفاوت به ازای دبی $(1/s) 22/63$ معادل دبی طراحی در نمونه واقعی $(m^3/s) 398$ ، در شکل ۴ جمع‌آوری شده است. مشاهدات آزمایشگاهی حاصله نشان داد، تراز سطح آب در راستای طولی سرریز از تاج تا پنجه افزایش می‌یابد به‌نحوی که بیش‌ترین ارتفاع پروفیل سطح آب در قسمت پنجه قابل مشاهده است. علاوه بر این در این دبی در تمامی شیب‌های تبدیل مختلف، پروفیل سطح آب بر روی بدنه سرریز تقریباً یکسان می‌باشد و این امر نیز به خاطر این است که در رژیم فوق بحرانی، حاکمیت جریان با بالادست آن



شکل ۵- پروفیل سطح جریان بی‌بعد شده در راستای طولی سرریز در عرض‌های مختلف کانال پایین‌دست در بالاترین دبی مشترک عبوری.

Figure 5. The water surface profile along the spillway central line in the maximum common discharge.

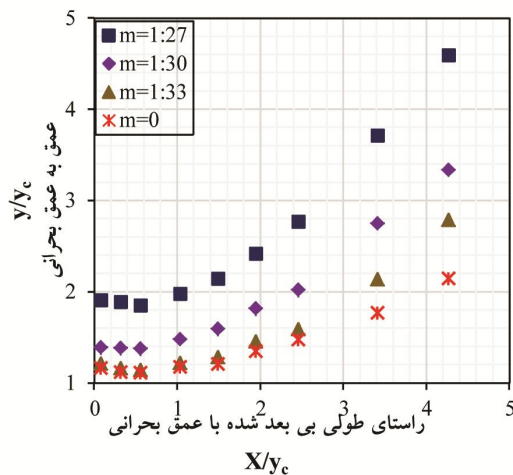


شکل ۴- پروفیل سطح جریان بی‌بعد شده در راستای طولی سرریز در عرض‌های مختلف کانال پایین‌دست در معادل دبی طراحی.

Figure 4. The water surface profile along the spillway central line in the design discharge.

جریان در بیش‌ترین شیب $m=1:27$ در ایستگاه $4/26$ ، در حدود $1/75$ برابر عمق جریان در کمترین شیب، گزارش گردید. در شکل ۷ نمودار عمق جریان در مجاورت دیواره‌های جانبی سرریز تحت شیب‌های تبدیل متفاوت، به ازای بالاترین دبی عبوری از روی هر سرریز در بالاترین هد مجاز (معادل هد m) در نمونه واقعی) رسم شده است. نتایج حاصل از این گراف ترسیمی می‌تواند یک ایده اولیه مناسب برای پیش‌بینی حداقل ارتفاع دیواره جانبی این نوع سرریزها بدهد به نحوی که روگذری جریان از روی دیواره‌های جانبی رخ ندهد. همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌گردد عمق جریان در شیب تبدیل $m=1:27$ در ایستگاه $4/26$ ، در حدود $2/14$ برابر عمق جریان در شیب تبدیل $m=0$ است.

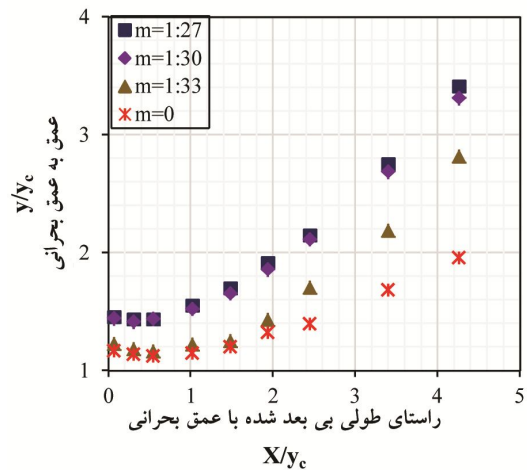
عمق جریان در مجاورت دیواره‌های جانبی: نمودار عمق جریان بی‌بعد شده با عمق بحرانی در مجاورت دیواره‌های جانبی سرریز به ازای بالاترین دبی مشترک عبوری (معادل دبی $672 \text{ (m}^3/\text{s)}$ در نمونه واقعی) تحت شیب تبدیل‌های مختلف در شکل ۶ رسم شده است. همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌گردد، عمق جریان در راستای طولی سرریز به ازای تمامی شیب‌های کانال تبدیل از تاج تا پنجه در حال افزایش می‌باشد، هم‌چنین با کاهش شیب کانال تبدیل (m)، عمق جریان بر روی سرریز روندی کاهشی دارد و علت این امر چنین می‌تواند توضیح داده شود که هر چه شیب تبدیل کم‌تر باشد، سرریز از درجه استغراق کم‌تری برخوردار بوده و پس‌زدگی جریان بر روی سرریز کم‌تر است و بر همین اساس است که عمق



شکل ۷- عمق بی بعد جریان در مجاورت دیواره‌های جانبی در شیب کانال تبدیل‌های مختلف و بالاترین هد مجاز.

Figure 7. The flow depth near the spillway training walls in the maximum allowable head passing over each spillway.

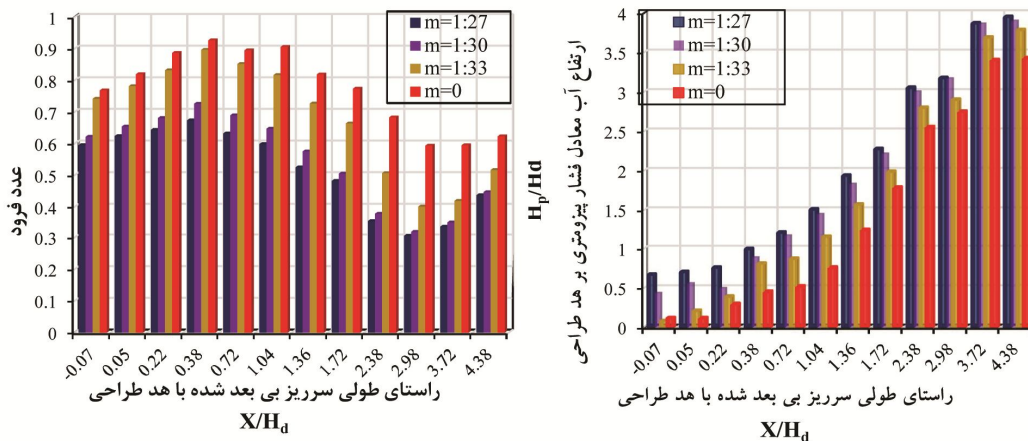
کانال تبدیل $m=0$ دارای کم‌ترین مقدار فشار پیزومتری در قسمت تاج به ترتیب با مقادیر $\frac{H_p}{H_d}=0/67$ و $\frac{H_p}{H_d}=0/11$ می‌باشند. همان‌طور که قبلاً نیز ذکر گردید مقادیر فشار پیزومتری و عدد فرود در راستای طولی مدل سرریز با یکدیگر رابطه معکوس دارند، به‌طور مثال شیب تبدیل $m=1:27$ که دارای بالاترین مقادیر فشار پیزومتری در بین تمامی شیب‌های کانال تبدیل به‌ازای بالاترین دبی مشترک است، در همین دبی کم‌ترین مقادیر عدد فرود را به خود اختصاص داده است، هر چه مقدار عدد فرود بیش‌تر باشد، نشان‌دهنده سرعت بالاتر جریان بر روی سرریز در آن ایستگاه خاص است که این افزایش سرعت باید با کاهش عمق جریان همراه گردد تا توازن رابطه انرژی برقرار گردد.



شکل ۶- عمق بی بعد جریان در مجاورت دیواره‌های جانبی در شیب کانال تبدیل‌های مختلف در بالاترین دبی مشترک عبوری.

Figure 6. The flow depth near the spillway training walls in the maximum common discharge passing over each spillway.

فشار پیزومتری: هم‌چنین، مقادیر فشار پیزومتری به ازای تمامی شیب‌های کانال تبدیل در قسمت تاج سرریز روندی افزایشی با روندی ملایم و پس‌از آن، از ابتدای شوت تا ورودی کانال پایین‌دست روندی افزایشی را تجربه می‌کند؛ بنابراین با توجه به شکل ۸ که مقادیر بی‌بعد شده فشار استاتیکی با هد طراحی و نیز تغییرات عدد فرود را برای کلیه شیب‌های تبدیل مختلف، نشان می‌دهد، فشار پیزومتری با کاهش شیب کانال تبدیل، کاهش پیدا می‌کند. علت این امر چنین می‌تواند توضیح داده شود که هرچه شیب تبدیل کم‌تر باشد، سرریز از درجه استغراق کمتری برخوردار بوده و پس‌زدگی جریان بر روی سرریز کم‌تر است، بر همین اساس است که فشار پیزومتری (ایستایی) که خود ناشی از عمق جریان در محل موردنظر می‌باشد با کاهش شیب تبدیل کاهش نشان می‌دهد. به‌عنوان مثال شیب کانال تبدیل $m=1:27$ دارای بیش‌ترین و شیب



شکل ۸- تغییرات پروفیل فشار و عدد فرود بی‌بعد شده در راستای طولی سرریز به‌ازای تغییر شیب تبدیل‌های مختلف در راستای طولی سرریز.

Figure 8. The piezometric pressure variation, and the Froude number variation for all developed physical models.

انجام شد تا اثر این هندسه خاص بر عملکرد هیدرولیکی این نوع سرریز بهتر نمایش داده شود.

ضریب دبی: در این بخش با توجه به هندسه خاص سرریز موجود، آنالیز ابعادی بر روی ضریب دبی به نمایندگی از سایر مشخصه‌های هیدرولیکی جریان

$$Q = \frac{2}{3} C_d \sqrt{2g} WH^{3/2} \tag{6}$$

می‌توان وابسته به متغیرهای رابطه ۷ در نظر گرفت: با توجه به رابطه ۶، دبی در سرریز پلکانی را

$$\alpha(Q, H, W, W_{ch}, P, h, H_d, g, \rho, \mu, \sigma, h_d, d, m, \alpha, \theta) = \dots \tag{7}$$

d (م) عمق آب در پایاب، α (°) زاویه وجه بالادست سرریز و θ (°) زاویه همگرایی دیواره جانبی سرریز می‌باشد. با استفاده از آنالیز ابعادی و قضیه Π باکینگهام می‌توان C_d را تابعی از متغیرهای بی‌بعد در نظر گرفت (رابطه ۸).

که در آن، m (٪) شیب جمع‌شدگی کانال پایین‌دست، W_{ch} (م) عرض کانال پایین‌دست، P (م) ارتفاع سرریز، h (م) ارتفاع پلکان‌ها، H_d (م) بار طراحی، ρ (kg/m^3) جرم مخصوص سیال، μ ($kg/m.s$) لزوجت سیال، σ (N/m) کشش سطحی، h_d (م) اختلاف رقوم سطح آب در سراب و پایاب سرریز،

$$\kappa(\Pi_1, \Pi_2, \Pi_3, \Pi_4, \Pi_5, \Pi_6, \Pi_7, \Pi_8, \Pi_9, \Pi_{10}, \Pi_{11}, \Pi_{12}, \Pi_{13}) = 0 \tag{8}$$

نالوری (۱۹۸۲) پیشنهاد شده بود (۱۰)، به‌عنوان پارامترهای دارای بعد تکراری مستقل، پارامترهای بدون بعد به شکل زیر حاصل می‌گردند.

که در آن، κ یک نماد کاربردی دیگر و Π_1 تا Π_{13} گروه‌های بی‌بعد می‌باشند. با توجه به در نظر گرفتن H و Q همان‌طور که در یافته‌های فدرستون و

(۹)

$$\Pi_1 = \frac{gH^5}{Q^2}, \Pi_2 = \frac{H}{p}, \Pi_3 = \frac{H}{H_d}, \Pi_4 = \frac{h_d}{H}, \Pi_5 = \frac{W}{H}, \Pi_6 = \frac{d+h_d}{H}, \Pi_7 = \frac{\mu H}{\rho Q}, \Pi_8 = \frac{\sigma H^3}{\rho Q^2},$$

$$\Pi_9 = \frac{H}{p}, \Pi_{10} = \frac{W_{ch}}{W}, \Pi_{11} = m, \Pi_{12} = \theta, \Pi_{13} = \alpha$$

باتوجه به این که اعداد بی بعد می توانند با زیر بیان گردد.
ترکیب اعداد بی بعد رابطه ۱۰ می تواند به صورت

$$\frac{3\sqrt{3}}{2\Pi_5(2\Pi_1)^{0.5}} = f(\Pi_2, \Pi_3, \Pi_4, \Pi_5, \Pi_6, \frac{1}{\Pi_7}, \frac{\Pi_8}{\Pi_1}, \Pi_9, \Pi_{10}, \Pi_{11}, \Pi_{12}, \Pi_{13}) \quad (10)$$

با جایگذاری رابطه ۹ در رابطه ۱۰ خواهیم داشت:

$$\frac{Q}{\frac{2}{3}WH\sqrt{\frac{2}{3}gH}} = f\left(\frac{H}{p}, \frac{H}{H_d}, \frac{h_d}{H}, \frac{L}{H}, \frac{d+h_d}{H}, \frac{\rho Q}{\mu H}, \frac{\sigma}{\rho g H^2}, \frac{h}{p}, \frac{W_{ch}}{W}, m, \theta, \alpha\right) \quad (11)$$

طراحی سرریزهای اوجی برابر یک در نظر گرفته می شود (۱۸). با توجه به توضیحات مندرج در بندهای بالا و همچنین بنا بر محدودیت های فلوم آزمایشگاهی، مقادیر پارامترهای H_d و همچنین P ثابت می باشند، به این خاطر هردوی نسبت های H/P و H/H_d تنها نشانگر تغییرات H می باشند، بنابراین برای جلوگیری از تکرار اعداد بی بعد یکسان، H/H_d به نمایندگی از این دو نسبت انتخاب و نسبت H/P از معادله حذف گردید. مطلب مذکور در ارتباط با مقادیر پارامترهای θ و $\frac{W_{ch}}{W}$ نیز که در آزمایش حاضر ثابت است وجود داشته و از معادله حذف می گردند. در نهایت رابطه ۱۲ به صورت زیر بیان می گردد.

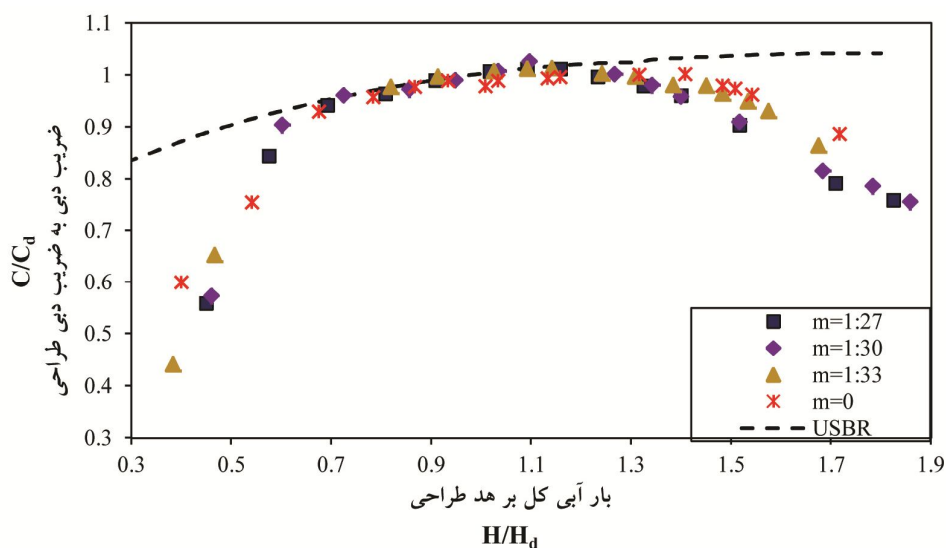
در رابطه ۱۱، f یک نماد کاربردی است. سمت چپ این معادله بیانگر رابطه ضریب دبی می باشد. ششمین و هفتمین ترم سمت راست معادله مذکور نیز به ترتیب نشان دهنده اعداد رینولدز و وبر می باشند. اگر بار آبی روی سرریز دارای مقادیر کوچکی باشد، ممکن است نیروی کشش سطحی بامعنی باشد و عدد وبر بر ضریب دبی تأثیر گذارد، اما با توجه به کوچک نبودن محدوده عمق جریان روی تاج سرریز، از تأثیر عدد وبر صرف نظر شده است. همچنین از آنجا که جریان عبوری از کانال رسش و سرریز، در محدوده جریان کاملاً متلاطم قرار دارد، عدد بی بعد رینولدز از تحلیل داده ها کنار گذاشته می شود (۱۳). در این پژوهش، زاویه وجه بالادست سرریز قائم بوده ($\alpha=90^\circ$)، بنابراین ضریب تصحیحی ضریب دبی طبق ضوابط طراحی USBR در

$$C_d = \psi\left(\frac{H}{H_d}, \frac{d+h_d}{H}, \frac{h_d}{H}, m\right) \quad (12)$$

ψ نیز یک نماد کاربردی است.

می‌یابد، سرریز در دبی‌های بالاتری پدیده استغراق را مشاهده می‌کند. در بازه $\frac{H}{H_d} < 0.7$ مقدار ضریب دبی در مدل فیزیکی پلکانی در همه شیب‌ها کم‌تر از مدل صاف USBR مشاهده گردید که علت آن می‌تواند عدم تطابق پروفیل جریان با پروفیل تاج سرریز پلکانی و همچنین اصطکاک ناشی از پلکان‌ها گزارش گردد. در بازه $0.7 < \frac{H}{H_d} < 1.3$ این مقدار با ضریب آبگذری سرریز USBR تطابق دارد که به نظر می‌رسد دلیل آن افزایش سرعت جریان در قسمت تاج سرریز پلکانی متناسب با افزایش دبی و شکل‌گیری کامل جریان غیرریزشی باشد که منتج از آن با کاهش تأثیر پلکان‌ها بر روی ضریب دبی مدل حاضر، نزدیکی عملکرد سرریز پلکانی موجود و سرریز صاف USBR قابل مشاهده است. اما با افزایش بار آبی در تمامی شیب‌های کانال تبدیل، به دلیل استغراق سرریز، نمودار ضریب دبی روند کاهشی به خود گرفته و کاهش کارایی سرریز نسبت به سرریز اوجی استاندارد USBR مشاهده می‌شود.

اثر بار آبی کل در بالادست بر ضریب دبی: معمولاً جریان نوع ریزشی در دبی‌های کم اتفاق می‌افتد و جریان نوع غیر ریزشی در دبی‌های زیاد رخ می‌دهد. با توجه به این مطلب در این پژوهش جریان نوع دوم که در سرریزهای پلکانی سدها متداول است مدل شده است. علاوه بر این، ضریب دبی جریان از آنجا که ماهیت پرش هیدرولیکی در دبی‌های کم‌تر و بیش‌تر از دبی طراحی متفاوت می‌باشد، در دو بخش مورد بررسی قرار گرفت. در دبی‌های کم‌تر از دبی طراحی، پرش هیدرولیکی در پنجه سرریز تشکیل می‌شود، اما در دبی‌های بیش‌تر از آن، این پرش به صورت مستغرق اتفاق می‌افتد. در شکل ۹ تغییرات بار آبی بالادست سرریز در برابر دبی‌های متفاوت به‌ازای شیب‌های کانال تبدیل سرریز پلکانی مدل موجود و همچنین سرریز اوجی استاندارد USBR رسم شده است. با توجه به شکل مشخص است در شیب کانال تبدیل $m=1:33$ که تفاوت انرژی جریان در پنجه سرریز و انرژی کمینه موردنیاز برای عبور از ورودی کانال پایین‌دست بیش‌تر است، پرش مستغرق سریع‌تر رخ می‌دهد. همچنین شکل مذکور نشان داد، هرچه شیب کانال تبدیل کاهش

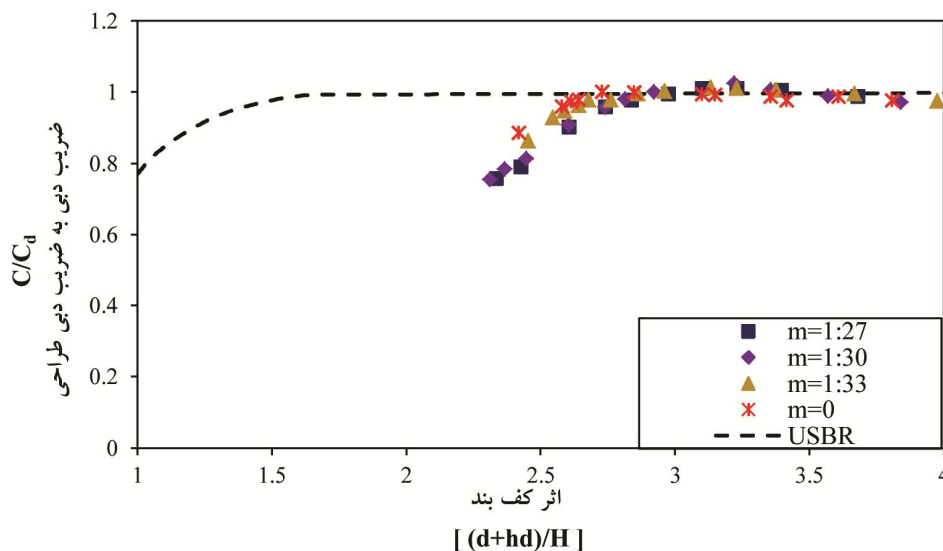


شکل ۹- نمودار ارتفاع سطح آب-ضریب دبی به ازای شیب تبدیل‌های مختلف.

Figure 9. The variations of the upstream spillway water head versus the discharge coefficient.

جریان در این ناحیه در دبی‌های بالای عبوری که در بازه $\frac{d+h_d}{H} < 2/65$ وجود دارد، گردد. از طرفی کاهش سرعت جریان باعث افزایش عمق در این منطقه و متناسب با آن افزایش نیروی عمود بر سطح و در نهایت افزایش نیروی اصطکاک جنبشی می‌گردد که خود عاملی مقاوم در برابر سرعت تخلیه جریان در ورودی کانال پایین دست می‌باشد. اما به‌ازای $\frac{d+h_d}{H} > 2/65$ مقادیر ضریب دبی نسبی به ازای تمامی شیب‌های کانال تبدیل مختلف برابر ۱ شده است و این بدان معناست که در این بازه رقوم کف‌بند تأثیری بر روی ضریب دبی ندارد.

اثر رقوم کف‌بند بر ضریب دبی: با توجه به شکل ۱۰ که برای نشان دادن تأثیر رقوم کف‌بند بر ضریب دبی رسم شده است، در بازه $\frac{d+h_d}{H} < 2/65$ مقادیر ضریب دبی نسبی برای شیب‌های کانال تبدیل مختلف کم‌تر از ۱ بوده و نشانگر تأثیر رقوم کف‌بند بر روی ضریب دبی است، هم‌چنین در این بازه تأثیرپذیری سرریز اوجی متقارب مورداستفاده در این پژوهش نسبت به سرریز اوجی استاندارد USBR بیش‌تر است. البته دلیل آن می‌تواند تنگ‌شدگی بیش‌تر عرض کانال پایین دست در این زوایا نسبت به سرریز اوجی استاندارد USBR باشد که این تنگ‌شدگی بیش‌تر باعث همگرایی بیش‌تر خطوط جریان و کاهش سرعت

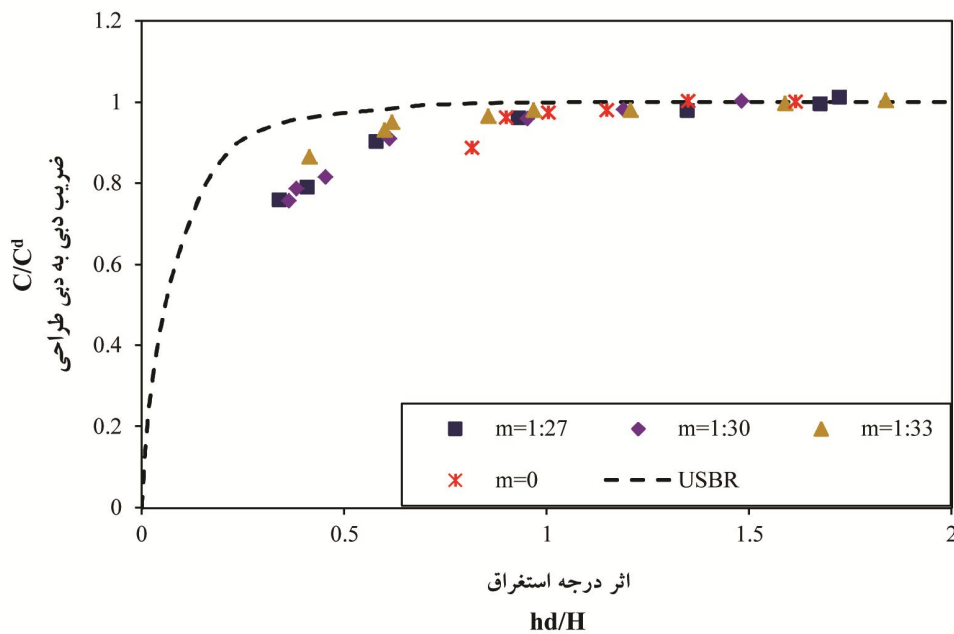


شکل ۱۰- نمودار اثر کف‌بند بر ضریب دبی به‌ازای شیب تبدیل‌های مختلف.

Figure 10. Ratio of discharge coefficients caused by position of downstream apron effects.

تقرب دیواره‌های جانبی و بالا بودن درجه استغراق سرریز در شیب‌های کانال تبدیل مختلف، مقادیر ضریب دبی نسبت به سرریز اوجی استاندارد USBR، کم‌تر می‌باشد. اما به‌ازای مقادیر $\frac{h_d}{H} > 0/8$ سرریز در درجات بالایی قرار داشته و ضریب دبی دیگر تأثیرپذیری از مقادیر $\frac{h_d}{H}$ نشان نمی‌دهد.

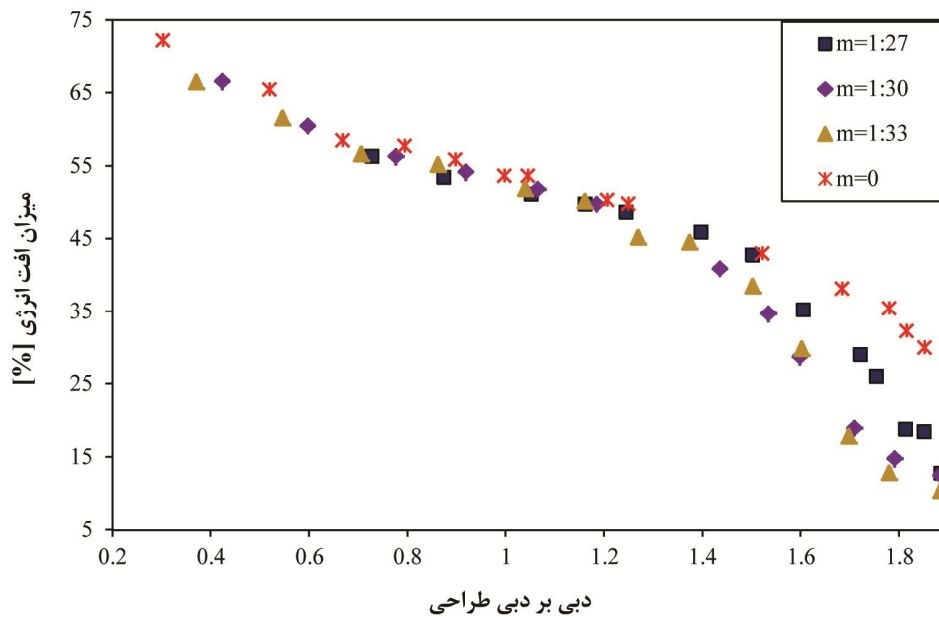
اثر درجه استغراق بر ضریب دبی: در شکل ۱۱ اثر درجه استغراق بر ضریب دبی برای نسبت عرض‌های متفاوت نشان داده شده است. با توجه به شکل ۱۱، به‌ازای مقادیر $\frac{h_d}{H} < 0/8$ ، استغراق در درجات بالایی قرار داشته، به همین دلیل ضریب دبی در این بازه متأثر از درجه استغراق بوده و نرخ کاهش از خود نشان می‌دهد. این در حالی است که به‌دلیل



شکل ۱۱- نمودار اثر درجه استغراق بر ضریب دبی به ازای شیب‌های مختلف.
Figure 11. Ratio of discharge coefficients caused by tailwater effects.

استهلاک انرژی: با توجه به شکل ۱۲ مشاهده می‌شود که با افزایش دبی استهلاک انرژی کاهش می‌یابد که این امر به دلیل کاهش زبری پله‌ها در اثر استغراق آن‌ها می‌باشد. همان‌طور که در شکل نشان داده شده است تا قبل از $\frac{Q}{Q_d} < 1/1$ تغییرات شیب کانال تبدیل تأثیر کمتری بر روی استهلاک انرژی دارد زیرا در بازه مذکور سرریز به ازای همه شیب‌های تبدیل در حالت جریان آزاد قرار دارد، اما با افزایش دبی، هرچه شیب کانال تبدیل (m) کوچک‌تر باشد پارامتر استهلاک انرژی (AE) در دبی‌های بالاتری سیر نزولی از خود نشان داده و اختلاف در میزان استهلاک انرژی به ازای اختلاف نسبت دبی ($\frac{Q}{Q_d}$) در بازه دبی‌های بالاتر

کوچک‌تر است. این مطلب به‌گونه‌ای است که مقدار کاهش افت انرژی جریان به ازای اختلاف دو نسبت دبی تقریبی یکسان شامل $\frac{Q}{Q_d} = 1/52$ و $\frac{Q}{Q_d} = 1/81$ برای شیب تبدیل‌های ۱:۲۷، ۱:۳۰، ۱:۳۳ و ۰ به ترتیب برابر ۱۱٪، ۱۹٪، ۲۲٪ و ۲۴٪ گزارش گردید. هم‌چنین به‌عنوان مثال در نمودار زیر بیش‌ترین استهلاک انرژی معادل ۶۱٪، در نسبت دبی $\frac{Q}{Q_d} = 0/3$ و کم‌ترین استهلاک انرژی معادل ۱۰٪ در $\frac{Q}{Q_d} = 1/87$ در شیب کانال تبدیل $m=1:27$ گزارش گردید.

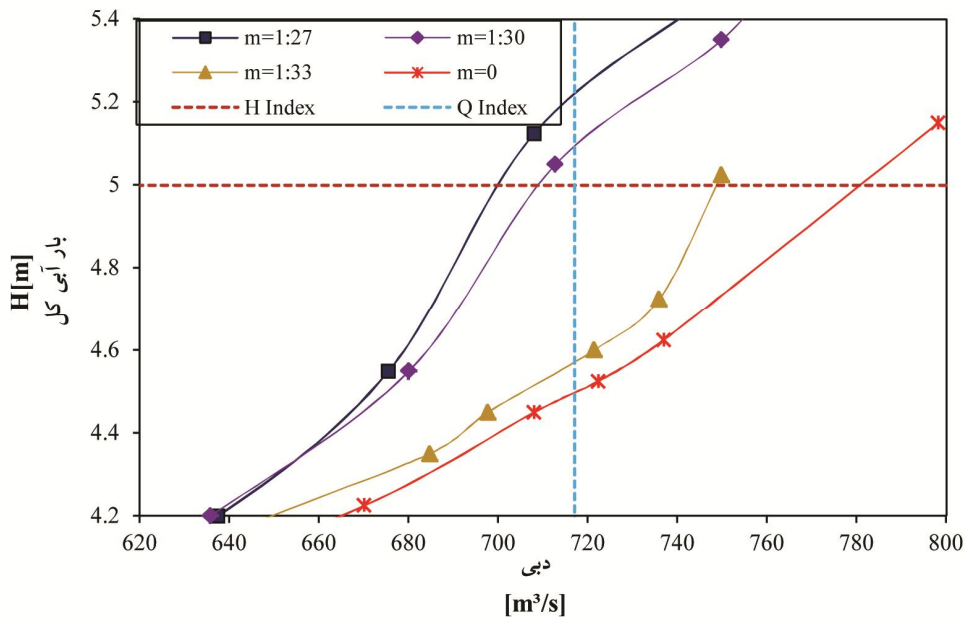


شکل ۱۲- تغییرات پارامتر استهلاك انرژی در شیب کانال تبدیل های مختلف.

Figure 12. The variations of the energy dissipation parameter (ΔE) versus the discharge ratio.

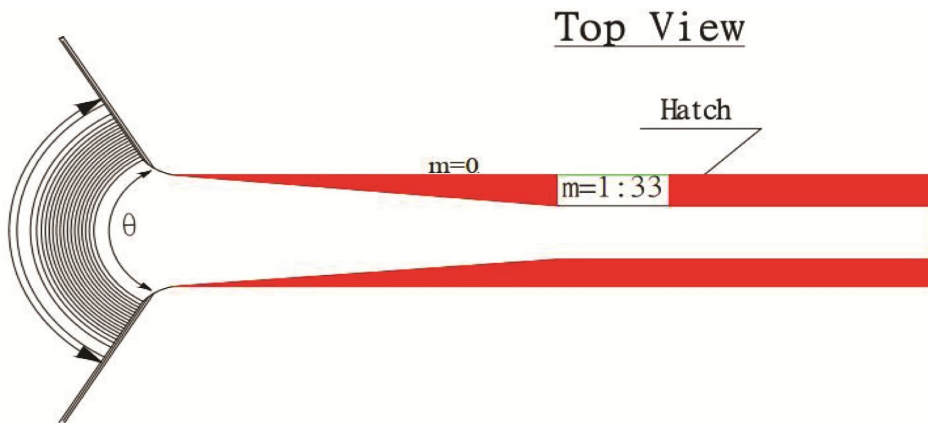
پایین دست در مقایسه با شیب کانال تبدیل $m = 0$ برابر با ناحیه هاشور خورده در شکل ۱۴ است؛ بنابراین، این شیب می تواند به عنوان مناسب ترین شیب تبدیل در کانال پایین دست معرفی گردد. قابل توجه است که طرح این نوع سرریز صرفه جویی مناسبی در زمینه اجرا و زمان ساخت داشته و عملاً در سایت هایی که عرض سرریز مورد نیاز برای عبور دبی حداکثر کافی نیست و یا عرض کانال و یا رودخانه در پایین دست با بالادست تطابق ندارد می تواند طرح مناسبی باشد.

دبی-اشل: گراف دبی-اشل سرریز معادل شده به مقیاس نمونه واقعی تحت شیب های کانال تبدیل مختلف، در شکل ۱۳ رسم گردید. با توجه به شکل ۱۳ به نظر می رسد که هرچه شیب کانال تبدیل پایین دست (m) کاهش می یابد دبی عبوری به ازای ماکزیمم هد مجاز نیز در حال افزایش است و این در حالی است که تنها مدل های با شیب کانال تبدیل $m = 0$ و $m = 1:33$ می باشند که توان عبور حداکثر دبی سیلاب محتمل را در حداکثر ارتفاع مجاز ($5m$) دارا می باشد و از آنجایی که شیب کانال تبدیل $m = 1:33$ دارای ابعاد هندسی کوچک تری در کانال



شکل ۱۳- دبی-اشل سرریز در شیب کانال تبدیل‌های مختلف مقیاس شده به مقادیر نمونه واقعی.

Figure 13. The stage - discharge diagram for all considered models.



شکل ۱۴- نمای کانال تبدیل در دو شیب $m=0$ و $m=1:33$.

Figure 14. Comparison of transition channel geometry in two slopes: $m = 0$ and $m = 1: 33$.

آزمایش‌ها نشان داد، در تمامی مدل‌ها با شیب‌های متفاوت، پارامترهای هیدرولیکی جریان در دو جناح سرریز متشابه است، بر همین اساس برای مقایسه پارامترهای هیدرولیکی جریان در هر دبی از مقدارهای برداشتی در خط مرکزی سرریز به‌عنوان شاخص مقایسه استفاده گردید. داده‌های برداشتی از پروفیل سطح آب در امتداد خط مرکزی سرریز در شیب

نتیجه‌گیری کلی

در پژوهش حاضر عملکرد هیدرولیکی سرریز پلکانی قوس محور تحت اثر تغییرات شیب کانال تبدیل پایین‌دست (m) مورد بررسی قرار گرفت و برای این منظور پارامترهای هیدرولیکی جریان مانند پروفیل سطح آب، فشار پیزومتری، ضریب دبی، استهلاک انرژی و دبی-اشل تک‌تک مدل‌ها مقایسه شد.

استهلاک انرژی دارد زیرا در بازه مذکور سرریز به ازای همه شیب‌های گذار در حالت جریان آزاد قرار دارد، اما با افزایش دبی، هر چه شیب کانال گذار (m) کوچک‌تر باشد پارامتر استهلاک انرژی (ΔE) در دبی‌های بالاتری سیر نزولی از خود نشان می‌دهد.

نمودار دبی-اشل سرریز معادل شده در مقیاس نمونه واقعی تحت نسبت عرض‌های مختلف، به‌عنوان شاخصی کمی برای یافتن مناسب‌ترین نسبت عرض در بین این مدل‌ها استفاده گردید. بر این اساس، تنها مدل‌های با شیب کانال گذار $m=0$ و $m=1:33$ می‌باشند که توان عبور حداکثر دبی سیلاب محتمل را در حداکثر ارتفاع مجاز ($5m$) دارا است و از آنجایی که شیب کانال گذار $m=1:33$ دارای ابعاد هندسی کوچک‌تری در کانال پایین‌دست در مقایسه با شیب کانال گذار $m=0$ است، بنابراین این شیب می‌تواند به‌عنوان مناسب‌ترین شیب گذار در کانال پایین‌دست معرفی گردد.

تقدیر و تشکر

نویسندگان از داوران و سردبیر محترم نشریه وزین پژوهش‌های حفاظت آب‌و‌خاک که در پویایی و جذابیت بیشتر این مقاله نقش کلیدی بر عهده داشته‌اند سپاسگزارند. هم‌چنین از همکاری مسئولین و کارکنان محترم پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری تهران و نیز مساعدت و همکاری آقای محمد صدرا فرودی و سرکار خانم مهندس سارا حسینی که در طی آزمایش‌ها و تدوین مقاله همکاری شایانی داشته‌اند، کمال تشکر و قدردانی را دارند.

داده‌ها و اطلاعات

منبع و منشأ داده‌ها و اطلاعات مورداستفاده در این مقاله، از نتایج رساله دکتری عمران گرایش سازه‌های هیدرولیکی آقای علی فرودی فارغ‌التحصیل دانشگاه

تبدیل‌ها و دبی‌های مختلف بیانگر این مطلب بود، به‌ازای شیب‌های تبدیل متفاوت هرچه مقدار شیب کانال تبدیل کاهش می‌یابد، از ارتفاع پروفیل سطح آب نیز کاسته می‌شود، بر همین اساس است که عمق جریان در بیشترین شیب $m=1:27$ در ایستگاه $4/26$ ، در حدود $1/75$ برابر عمق جریان در کم‌ترین شیب، $m=0$ گزارش شده است.

فشار پیژومتری در همه شیب‌ها، در تاج کاهش و در شوت و پنجه سرریز در حال افزایش گزارش شده است، فشار پیژومتری با افزایش نسبت عرض، کاهش پیدا می‌کند، به‌عنوان مثال شیب کانال تبدیل $m=1:27$ دارای بیش‌ترین و شیب کانال تبدیل $m=0$ دارای کم‌ترین مقدار فشار استاتیکی در قسمت تاج به ترتیب با مقادیر $\frac{H_p}{H_d}=0/11$ و $\frac{H_p}{H_d}=0/67$ می‌باشند.

آزمایش‌ها نشان داد هرچه شیب کانال تبدیل کاهش می‌یابد، سرریز در دبی‌های بالاتری پدیده استغراق را مشاهده می‌کند. به‌عنوان مثال در شیب کانال تبدیل $m=1:33$ که تفاوت انرژی جریان در پنجه سرریز و انرژی کمینه موردنیاز برای عبور از ورودی کانال پایین‌دست بیش‌تر است، پرش مستغرق سریع‌تر رخ می‌دهد. هم‌چنین در بازه $\frac{H}{H_d} < 0/7$ مقدار ضریب دبی در مدل فیزیکی پلکانی در کلیه شیب‌ها کم‌تر از مدل صاف USBR مشاهده گردید. در بازه $1/3 < \frac{H}{H_d} < 0/7$ این مقدار با ضریب آگذری سرریز USBR تطابق دارد، اما با افزایش بار آبی در تمامی شیب تبدیل‌ها، به دلیل استغراق سرریز، نمودار ضریب دبی روند کاهشی به خود گرفته و کاهش کارایی سرریز نسبت به سرریز اوجی استاندارد USBR مشاهده می‌شود.

استهلاک انرژی با افزایش دبی، کاهش می‌یابد، علاوه بر این نتایج نشان داد، تا قبل از $1/1 < \frac{Q}{Q_d}$ تغییرات شیب کانال گذار تأثیرپذیری کم‌تری بر روی

تعارض منافع

در این مقاله تعارض منافی وجود ندارد و این مسأله مورد تأیید همه نویسندگان است.

تبریز است و آزمایش‌های مربوطه در پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری در تهران در سال ۱۳۹۷ به انجام رسیده است.

منابع

1. Afshoon, H.R., Kamanbedast, A.A., Masjedi, A.R., Heidarnejad, M., and Bordbar, A. 2019. Investigation of energy loss in step-spillway with obstacles on the step using physical and Flow-3D model. *J. Soil Cons.* 26: 2. 138-156. (In Persian)
2. Azhdary Moghaddam, M. 1997. The hydraulics of flow on stepped ogee-profile spillways. Ph.D Thesis, University of Ottawa.
3. Banishoab S.A., Bordbar, A.A., Kamanbedast, A., Masjedi, A., and Heidarnejad, M. 2020. The study of energy loss in stepped- labyrinth spillways. *JWSC*, 23: 29-41. (In Persian)
4. Boes, R.M., and Hager, W.H. 2003. Two-Phase Flow Characteristics of Stepped Spillways. *J Hydraul. Eng. ASCE*. 129: 661-670.
5. Chamani, M.R., and Rajaratnam, N. 1994. Jet flow on stepped spillways. *J. Hydraul. Eng.* 120: 2. 254-259.
6. Chanson, H. 2000. Characteristics of Skimming Flow over Stepped Spillways. *J. Hydraul. Eng.* 126: 11. 862-865.
7. Chanson, H. 2001. A transition flow regime on stepped spillways: the facts. Tsinghua University Press. Pp: 490-498.
8. Chanson, H. 2002. Hydraulics of stepped chutes and spillways, CRC Press.
9. Essery, I.T.S., and Horner, M.W. 1971. The hydraulic design of stepped spillways, Construction Industry Research and Information Association.
10. Featherstone, R.E., and Nalluri, C. 1982. Civil Engineering Hydraulics: Essential Theory with Worked Examples. Granada, Spain.
11. Foroudi, A., Roushangar, K., and Saneie, M. 2018. Experimental Study of Hydraulic Performance of Stepped Spillway with a Curve Axis Affected by Downstream Channel Width Changes. *Amirkabir*. 51: 5. 19-33. (In Persian)
12. Hunt, S.L., Kadavy, K.C., Abt, S.R., and Temple, D.M. 2008. Impact of converging chute walls for roller compacted concrete stepped spillways. *J. Hydraul. Eng.* 134: 7. 1000-1003.
13. Mohammadzadeh-Habili, J., Heidarpoor, M., and Afzalimehr, H. 2013. Hydraulic characteristics of a new weir entitled of quarter-circular crested weir. *FLOW MEAS INSTRUM*. 33: 168-178.
14. Rice, C.E., and Kadavy, K.C. 1996. Model study of a roller compacted concrete stepped spillway. *J. Hydraul. Eng.* 122: 6. 292-297.
15. Sedaghatnejad, S. 2009. Investigation of energy dissipation in stepped overflows with end-points. M.Sc. Dissertation, University of Sharif, Tehran, Iran. (In Persian)
16. S' nchez-Juny, M., Bladé, E., and Dolz, J. 2007. Pressures on a stepped spillway. *J. Hydraul. Res.* 45: 4. 505-511.
17. Sori, N., and Mojtahedi, A. 2015. Investigation of Effects of the Geometry on Rate of Energy Dissipation of the Flow over the Stepped Spillway using Fuzzy Inference Systems. *IJCEE*. 45: 3. 25-39. (In Persian)
18. USACE, US, Army Corps of Engineers. 1952. Hydraulic Design Criteria. Revised in subsequent years.
19. USACE, US, Army Corps of Engineers. 1995. Gravity Dam Design-Engineering and design (engineer manual), EM 1110-2-2200.
20. U.S. Bureau of Reclamation. 1977/1987. Design of small dams. 3rd ed. Technical Service Center, Denver, USA.



Gorgan University of Agricultural
Sciences and Natural Resources

J. of Water and Soil Conservation, Vol. 27(6), 2021
http://jwsc.gau.ac.ir
DOI: 10.22069/jwsc.2021.17114.3258

Research Full Paper

Experimental Study of Hydraulic Performance of Stepped Spillway with a Curve Axis Affected by Downstream Transition Channel slope Changes

*A. Foroudi¹, K. Roushangar² and A.R. Aghaeifar³

¹Senior Lecturer, Dept. of Civil Engineering, Quchan University of Technology, Iran,

²Professor, Faculty of Civil Engineering, University of Tabriz, Iran,

³Senior Lecturer, Faculty of Civil Engineering, University of Payame Noor, Iran

Received: 09.08.2019; Accepted: 12.15.2020

Abstract

Background and Objectives: The stepped spillway plays a significant role in the effective energy dissipation and is known as the most powerful hydraulic structure compared to ogee spillway to dissipate flow energy. Although several studies have been conducted in this field, there is a lack of research on the comprehensive study of hydraulic performance of stepped spillway with curve axis under downstream transition channel slope variation. Therefore, in this study, several physical models of curve axis stepped spillway with converging training walls were made and the impact of downstream transition channel slope variation on the hydraulic characteristics of this type spillway was assessed.

Materials and Methods: This study was conducted with the aim of investigating the hydraulic performance of stepped spillway with curve axis under downstream transition channel slope variation. The experiments were carried out in a rectangular flume with length of 15 m, height of 1 m and width of 2 m. The experiments were performed at different discharge rates from 0.015 to 2.1 times the design discharge and the physical model was tested under four different transition channel slopes of $m=0$, $m=1:33$, $m=1:30$ and $m=1:27$.

Results: The results of the experiments indicate that in the converging stepped spillway with downstream transition channel slope variation, by decreasing slope of transition channel, the discharge flood in the maximum head allowed will be higher. Also, it is found that in the range of $H/H_d = 0.7$, the discharge coefficient in the stepped physical model for all transition slopes was less than the smooth USBR model and in the range of $0.7 < H/H_d < 1.3$ there was a good consistency with the USBR model. However, with increasing the total water head, due to the spillway submergence, the discharge coefficient for all transition slopes showed a descending trend and the spillway efficiency decreased compared with the standard USBR ogee spillway. Moreover, the results showed that the models with slope of 0 and 1:33 are the only models which can pass the probable maximum flood discharge in the maximum allowable height successfully and since the model dimension of physical model with downstream transition channel slope of $m=1:33$ is smaller than that of $m=0$, Therefore, model with slope of $m=1:33$ can be selected as the most efficient model.

Conclusion: According to the results, 1. In the converging stepped spillway by increasing total upstream head, the discharge coefficient increases for each of the transition Channel slope (m) and until the downstream flow is at either supercritical or critical stages, the discharge coefficient is independent of variation of transition Channel slope. However, at the submergence

* Corresponding Author; Email: aliforudi.civil@yahoo.com

stage for the spillway, the difference in the discharge coefficient can be due to tailwater submergence occurring in the spillway. 2. It was observed that energy dissipation over converging stepped spillway decreases with increasing the discharge ratio, but model with smaller amount of transition slope (m) lead to decline more energy dissipation in higher discharge. 3. It was also found that the model with slope of $m=1:33$ can be selected as the best model due to it's ability to pass the probable maximum flood in the Maximum allowable head.

Keywords: Curve axis, Energy dissipation, Hydraulic performance, Physical model, Stepped spillway, Transition channel