



بررسی آزمایشگاهی هیدرولیک جریان سرریزهای پلکانی قوس محور متأثر از تغییرات عرض کانال پایین دست

علی فرودی خور^۱، کیومرث روشنگر^{۱*}، مجتبی صانعی^۲

^۱ دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران

^۲ گروه مهندسی رودخانه و سواحل پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری، تهران، ایران

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۳۹۷-۰۱-۰۶

بازنگری: ۱۳۹۷-۰۲-۰۶

پذیرش: ۱۳۹۷-۰۲-۲۷

ارائه آنلاین: ۱۳۹۷-۰۳-۲۲

کلمات کلیدی:

مدل فیزیکی
سرریز پلکانی
قوس محوری
عملکرد هیدرولیکی
استهلاک انرژی

خلاصه: از مشخصه های بارز در عملکرد سرریز پلکانی، قابل ملاحظه بودن استهلاک انرژی در طول آن در مقایسه با انواع سرریزهای دیگر می باشد. در این پژوهش مدلی فیزیکی از سرریز سد گرمی چای با وجه تمایز سطح بدنه ای پلکانی نسبت به نمونه واقعی، با مقیاس ۱:۵۰، در پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری ساخته شده و عملکرد هیدرولیکی سرریز تحت تأثیر تغییرات نسبت عرض کانال پایین دست سرریز به عرض سرریز در تاج ($\frac{W_h}{W}$) در بازه ۰/۲۱۴ تا ۰/۲۸۶ مورد بررسی قرار گرفت. نتایج حاصل نشان داد، برای همه نسبت عرض ها تا قبل از استغراق با افزایش بار آبی بالادست ضریب دبی نیز افزایش یافته و هم چنین تغییرات نسبت عرض در این بازه تأثیر قابل توجهی بر ضریب دبی سرریز نداشته است، اما هنگامی که سرریز در مرحله استغراق قرار می گیرد، تأثیر تغییرات نسبت عرض بر ضریب دبی چشم گیر می باشد. به عنوان مثال در $\frac{H}{H_d} = ۱/۶۶$ که بالاترین هد آبی مجاز در بالادست سرریز می باشد، مقدار ضریب دبی نسبی ($\frac{C}{C_d}$) در نسبت عرض های ۰/۲۱۴ و ۰/۲۸۶ به ترتیب برابر ۰/۷۹۸ و ۱/۶۳ گزارش گردید. علاوه بر این، مقادیر استهلاک انرژی نیز در مرحله استغراق، تأثیر پذیری خود از تغییرات عرض را به وضوح نشان داد به نحوی که هر چه نسبت عرض ($\frac{W_h}{W}$) بزرگتر باشد پارامتر استهلاک انرژی ($E\Delta$) به ازای یک دبی خاص کوچک تر خواهد بود. کارا ترین مدل در تحقیق حاضر، مدل با نسبت عرض $\frac{W_h}{W} = ۰/۲۸۶$ معرفی گردید زیرا تنها مدل شناخته شد که توان عبور حداکثر دبی سیلاب محتمل را در حداکثر ارتفاع مجاز (۵ متر) دارا می باشد.

۱- مقدمه

سرریز متناسب است، اگر عرض کانال یا مخزنی که سرریز روی آن اجرا می شود محدود باشد، یکی از راه کارهای افزایش ظرفیت سرریز، افزایش طول تاج آن با قوسی کردن در پلان می باشد. علاوه بر این برای مستهلک نمودن انرژی در پایاب سدها معمولاً تمهیدات ویژه ای اندیشیده می شود که در نتیجه به همان نسبت هزینه های اجرائی و نگهداری و نیز پایداری سد تحت تأثیر قرار می گیرد. سرریزهای پلکانی از جمله سازه هایی هستند که به منظور بهبود شرایط هیدرولیکی جریان و استهلاک انرژی می توانند به کار گرفته شوند.

سرریز یکی از کلیدی ترین اجزای سد به شمار می رود که شکست بسیاری از سدها به عدم کفایت سرریزشان نسبت داده شده است و ایمنی سدها به طور اهم ارتباط مستقیم و تنگاتنگی با کفایت ظرفیت سرریز دارد، بنابراین سرریز باید سازه ای قوی، مطمئن و با کارایی بالا انتخاب شود که هر لحظه بتواند برای بهره برداری آمادگی داشته باشد [۱]. دبی جریان در سرریزها به طور مستقیم با طول تاج

* نویسنده عهده دار مکاتبات: kroshangar@yahoo.com



روابط، جداول و نمودارهای متعددی توسط محققین مختلف ارائه شده است [۱۹ و ۲۰]، اما بررسی‌ها حاکی از آن است با وجود این تحقیقات متعدد، هیدرولیک جریان سرریزهای پلکانی که دارای پلان قوسی شکل بوده، متأثر از تغییرات عرض کانال پایین دست تاکنون مورد توجه قرار نگرفته و تحقیقی بر روی آن انجام نشده است به همین دلیل هیدرولیک این نوع خاص سرریز تاکنون ناشناخته مانده است، لذا در این تحقیق سرریز پلکانی قوس محور با دیواره‌های هادی متقارب تحت تأثیر تغییرات عرض در کانال پایین دست در پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری جهاد کشاورزی مورد آزمایش قرار گرفت.

۲- اصول و تئوری

۲-۱- آنالیز ابعادی

با توجه به هندسه خاص سرریز پلکانی-اوجی قوس محور نسبت به سرریزهای اوجی استاندارد تعیین اثر هندسه خاص سرریز بر روی پارامترهای هیدرولیکی جریان، امری مهم به نظر می‌رسد. با توجه به این مطلب یک پارامتر هیدرولیکی خاص مانند ضریب دبی به نمایندگی از سایر مشخصه‌های هیدرولیکی جریان، انتخاب و آنالیز ابعادی بر روی آن انجام گرفت. در همین راستا دانستن این مطلب کافی به نظر می‌رسد که مهم‌ترین فاکتور در محاسبه دقیق دبی عبوری از سرریز با هر شکل خاص، تخمین مناسب ضریب دبی سرریز است. ضریب دبی برای انواع مختلف سرریزها متفاوت است و برای تعیین این ضریب، معمولاً از داده‌های آزمایشگاهی مدل‌ها، تجزیه و تحلیل آن‌ها به همراه آنالیز ابعادی استفاده می‌شود. برای محاسبه ضریب دبی در سرریزهای استاندارد (نرمال) که به صورت مستقیم و عمود بر مسیر جریان احداث می‌شوند، محققان تاکنون روابط، جداول و نمودارهای متعددی ارائه کرده‌اند. پیچیدگی مهم این ضریب این است که معمولاً برای انواع مختلف سرریزها، مقدار ثابت ندارد و علاوه بر وابستگی به هندسه کانال و سرریز، به بار آبی روی سرریز نیز وابسته است که محاسبه آن را در شرایط کلی مشکل می‌نماید. با توجه به پوش بودن نوک پلکان‌های سرریز موجود بر پروفیل استاندارد سرریز اوجی، دبی در سرریز پلکانی را می‌توان با استفاده از رابطه مقابل به‌ست آورد.

در سال ۱۷۹۱ بزرگترین سد با سرریز پلکانی ساخته شد، این سد پوئنت نام داشت [۲]. علاوه بر این سدهای اپراستیل واتر، مونکسیول و استیج کوچ نیز دارای سرریز پلکانی بوده و هم‌اکنون نیز در حال استفاده می‌باشند [۳]. با توجه به اهمیت روزافزون این سرریزها تحقیقات و مطالعات فراوانی در رابطه با هیدرولیک جریان و عوامل موثر بر استهلاک انرژی، در سرریزهای پلکانی صورت پذیرفته است، انجام گرفته، مبتنی بر آزمایش‌های هیدرولیکی بر روی مدل‌های فیزیکی بوده و یا عملکرد هیدرولیکی جریان بر روی این سرریز توسط روش‌های عددی شبیه‌سازی شده است، بر همین اساس هیدرولیک جریان در سرریزهای پلکانی سه نوع گزارش شده است: ۱- جریان ریزشی ۲- جریان غلغشی ۳- جریان بینابینی [۲ و ۳]. معیارهای مؤثر در به وجود آمدن انواع جریان در سرریزهای پلکانی شامل هندسه پله‌ها (طول پله و ارتفاع پله) و میزان دبی عبوری از روی سرریز Q می‌باشند. محققین مختلف معیارهای دیگری را نیز ارائه داده‌اند [۴]. از این میان می‌توان به برخی از این تحقیقات اشاره نمود. اثر هندسه سرریز در میزان استهلاک انرژی جریان عبوری سرریز با استفاده از سیستم استنتاج فازی در پژوهشی مورد بررسی قرار گرفت، نتایج حاکی از آن بود با افزایش شیب معکوس روی هر پله، استهلاک انرژی بیشتر می‌گردد [۵]. در پژوهشی دیگر بررسی افت انرژی جریان از روی سرریزهای پلکانی به صورت آزمایشگاهی مورد بررسی قرار گرفت، نتایج نشان داد به ازای بار آبی ثابت بالادست، افزایش تعداد پلکان‌ها به میزان قابل توجهی باعث افزایش استهلاک می‌گردد [۶] هم‌چنین در تحقیقی اصول حاکم بر هیدرولیک جریان و طراحی سرریزهای پلکانی مورد بررسی قرار گرفت و بر همین اساس رابطه بهینه‌شده‌ای برای ضریب اصطکاک، که یکی از پارامترهای مؤثره در محاسبه استهلاک انرژی می‌باشد ارائه گردید [۷].

تحقیقات هیدرولیکی متعددی در خصوص جریان و پارامترهای هیدرولیکی مربوطه بر روی سرریزهای پلکانی انجام شده است و طی این تحقیقات روابط مختلفی برای نوع جریان و هم‌چنین محاسبات افت و استهلاک انرژی در طول سرریزهای پلکانی انجام شده گردیده است [۸-۱۸]. هم‌چنین، در ارتباط با انواع سرریزهای استاندارد (به‌عنوان مثال: اوجی، پلکانی و دیگر موارد) که به صورت مستقیم و عمود بر مسیر جریان احداث می‌شوند، تاکنون

معنای فیزیکی باشند، رابطه ۴ می تواند بصورت زیر بیان گردد.

$$\frac{3\sqrt{3}}{2\Pi_5(2\Pi_2)^{0.5}} = \psi(\Pi_2, \Pi_3, \Pi_4, \Pi_6, \frac{1}{\Pi_7}, \frac{\Pi_8}{\Pi_1}, \Pi_9, \Pi_{10}, \Pi_{11}, \Pi_{12}) \quad (5)$$

باجایگذاری روابط Π_1 تا Π_{12} از رابطه ۴ در معادله ۵ خواهیم

داشت:

$$\frac{Q}{\frac{2}{3}WH\sqrt{\frac{2}{3}gH}} = \psi\left(\frac{H}{P}, \frac{H}{H_d}, \frac{h_d}{H}, \frac{d+h_d}{H}, \frac{\rho Q}{\mu H}, \frac{\sigma}{\rho g H^2}, \frac{h}{P}, \frac{W_{ch}}{W}, \theta, \alpha\right) \quad (6)$$

در معادله ۶، ψ یک نماد کاربردی است، هم چنین 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 معنادار باشد و عدد وبر نیز بر ضریب دبی تأثیر گذارد. با توجه به محدوده عمق جریان روی تاج سرریز، از تأثیر عدد وبر صرف نظر شده است. چون 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 [۲۲]. در این پژوهش، زاویه وجه بالادست سرریز قائم و ضریب تصحیح ضریب دبی برابر یک است. با توجه به توضیحات مندرج در بندهای بالا و هم چنین بنابر محدودیت های فلوم آزمایشگاهی، مقادیر پارامترهای θ و $\frac{h}{P}$ نیز در آزمایش حاضر ثابت می باشند و از معادله حذف می گردند. در نهایت معادله ۶ بصورت زیر بیان می گردد.

$$C_d = \psi\left(\frac{H}{H_d}, \frac{d+h_d}{H}, \frac{h_d}{H}, \frac{W_{ch}}{W}\right) \quad (7)$$

۲-۲- تجهیزات آزمایشگاهی

در این پژوهش مدلی فیزیکی از سرریز سد گرمی چای با وجه تمایز سطح بدنه ای پلکانی نسبت به نمونه واقعی، مورد بررسی قرار گرفت. آزمایش هایی در پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری جهاد کشاورزی بر روی این مدل پلکانی قوس محور با مقیاس ۱:۵۰، در زاویه همگرایی ۱۲۰ درجه دیواره های هادی انجام شد. مدل سرریز با استفاده از جنس پلی اتیلن که ضد آب است ساخته و برای ساخت دیواره ها و کانال از پلکسی گلاس استفاده گردید. پروفیل استاندارد

$$Q = \frac{2}{3}C_d LWH^{3/2} \quad (1)$$

که در این رابطه Q ظرفیت تخلیه سرریز، C_d ضریب دبی، g شتاب ثقل، W عرض سرریز در تاج و H بار آبی بالادست سرریز می باشد.

با توجه به رابطه ۱ دبی در سرریز پلکانی را می توان وابسته به متغیرهای رابطه ۲ در نظر گرفت:

$$f(Q, H, W, W_{ch}, P, h, H_d, g, \rho, \mu, \sigma, h_d, d, \alpha, \vartheta) = 0 \quad (2)$$

که در این رابطه f یک نماد کاربردی، W_{ch} عرض کانال پایین دست، P ارتفاع سرریز، h ارتفاع پلکان ها، H_d بار طراحی، ρ = جرم مخصوص سیال، μ لزوجت سیال، σ کشش سطحی، h_d اختلاف رقوم سطح آب در سراب و پایاب سرریز، d عمق آب در پایاب، α زاویه وجه بالادست سرریز و θ = زاویه همگرایی دیوار هادی سرریز می باشد. با استفاده از آنالیز ابعادی و قضیه π باکینگهام می توان C_d را تابعی از متغیرهای بی بعد در نظر گرفت (رابطه ۳).

$$\Pi_1 = \varphi(\Pi_2, \Pi_3, \Pi_4, \Pi_5, \Pi_6, \Pi_7, \Pi_8, \Pi_9, \Pi_{10}, \Pi_{11}, \Pi_{12}) \quad (3)$$

در رابطه ۳، Φ یک نماد کاربردی دیگر و Π_1 تا Π_{12} گروه های بی بعد می باشند. با توجه به در نظر گرفتن Q, H و ρ به عنوان پارامترهای دارای بعد تکراری مستقل، همان طور که در مرجع [۲۱] پیشنهاد شده است. پارامترهای بدون بعد به شکل زیر حاصل می گردند.

$$\begin{aligned} \Pi_1 &= \frac{gH^5}{Q^2}, \Pi_2 = \frac{H}{P}, \Pi_3 = \frac{H}{H_d}, \Pi_4 = \frac{h_d}{H}, \Pi_5 \\ \Pi_{11} &= \theta, \Pi_{12} = \alpha \\ &= \frac{W}{H}, \Pi_6 = \frac{d+h_d}{H}, \Pi_7 = \frac{\mu H}{\rho Q}, \Pi_8 \end{aligned} \quad (4)$$

$$= \frac{\sigma H^3}{\rho Q^2}, \Pi_9 = \frac{h}{P}, \Pi_{10} = \frac{W_{ch}}{W},$$

باتوجه به اینکه اعداد بی بعد می توانند با یکدیگر ترکیب شوند تا گروه های بی بعد جدیدی را به وجود آورند که در هیدرولیک نیز دارای

جدول ۱. پارامترهای طراحی برای مدل فیزیکی در زوایای همگرایی دیواره های هادی مختلف و نمونه واقعی
Table 1. physical Model and Prototype Design Elements for varying convergence angles

مشخصات طراحی سرریز پلکانی	نمونه واقعی از نوع اوجی صاف	مدل های فیزیکی از نوع پلکانی			
		۱	۲	۳	۴
$\frac{W_{ch}}{W}$ عرض کانال پایین دست به عرض تاج،	۰/۲۱۴	۰/۲۱۴	۰/۲۳۸	۰/۲۵۲	۰/۲۶۴
عرض کانال پایین دست (متر)	۹	۰/۱۸	۰/۲۰	۰/۲۲	۰/۲۴
زاویه همگرایی دیواره های هادی (درجه)	۱۲۰	۱۲۰			
طول تاج (متر)	۴۲/۸۳	۰/۸۳۷			
ظرفیت تخلیه (مترمکعب بر ثانیه)	۳۹۸	۰/۰۲۲۵			
حدکثر دبی سیل (مترمکعب بر ثانیه)	۷۱۷	۰/۰۴۰۵			
هد طراحی (متر)	۳	۰/۰۶			
ارتفاع سرریز (متر)	۷/۸	۰/۱۵۶			
شیب کانال پایین دست	٪۶	٪۶			

خروجی استفاده شد، برای برداشت داده ها قرائت پروفیل سطح آب توسط یک ارتفاع سنج 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 دیواره های هادی و قطاع دیگر در بین این دو قطاع قرار داشت، برای برداشت فشار استاتیکی نیز از ۳۶ پیژومتر واقع بر قطاع های مذکور، ۱۲ پیژومتر به ازای هر قطاع استفاده شد. محاسبات سرعت نیز با استفاده از رابطه پیوستگی با معلوم بودن دبی و عرض هر مقطع و برداشت عمق جریان در مقطع مورد نظر انجام شد. در انتها نیز برای محاسبه استهلاک انرژی بر روی سرریز مشابه تحقیق شمسایی و صداقت نژاد، میزان افت انرژی آزمایشگاهی از روابط زیر محاسبه گردید:

$$E_1 = P + H \quad (8)$$

$$E_2 = d + \frac{V^2}{2g} = d + \frac{Q^2}{2gA^2} \quad (9)$$

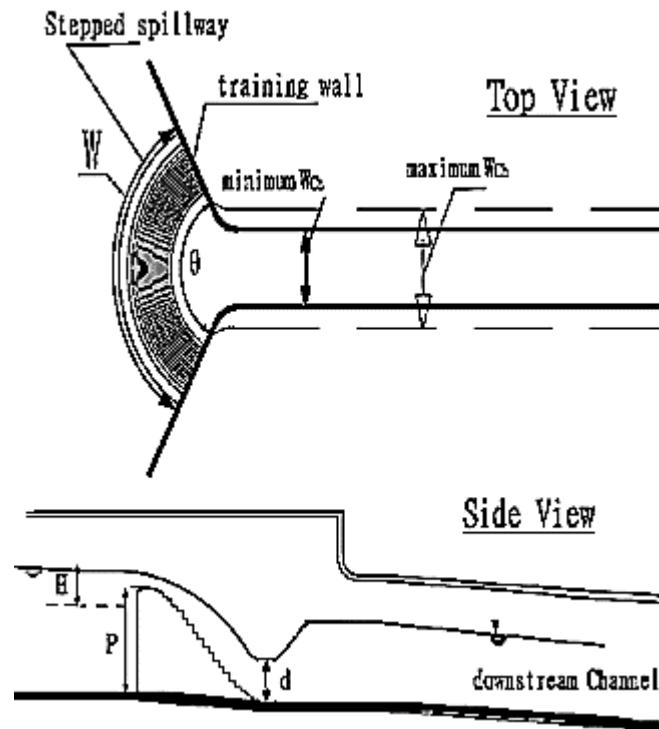
$$\Delta E = \frac{E_1 - E_2}{E_1} \times 100 \quad (10)$$

که در این روابط:

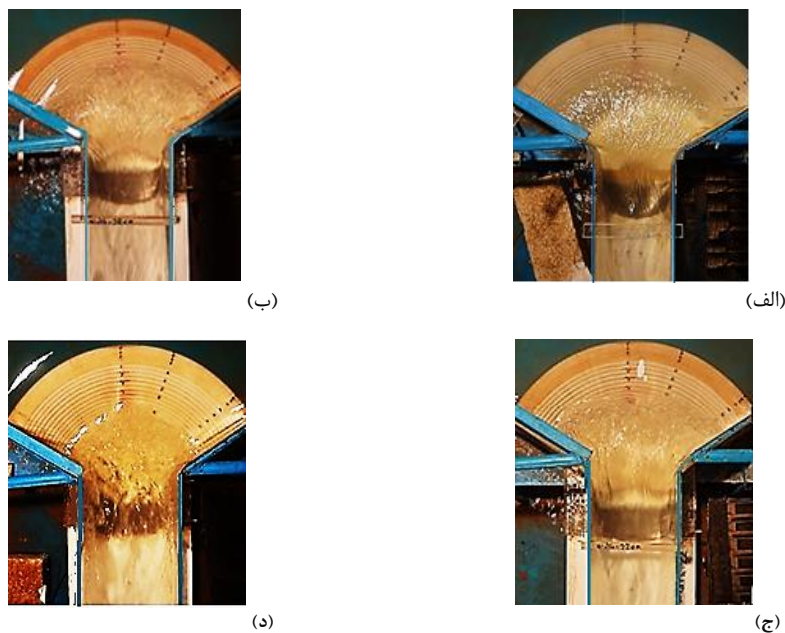
E_1 میزان انرژی در بالادست سرریز، P ارتفاع سرریز، E_2 انرژی در پنجه سرریز، d عمق جریان در پنجه، V سرعت جریان در پنجه،

تاج سرریز دارای معادله $y = -0.169524x^{1.85}$ می باشد. که توسط دو قوس با شعاع های R_1 برابر با $4/8$ سانتی متر و R_2 با مقدار $1/2$ سانتی متر به وجه قائم بالادست متصل شده است. در زیر نقطه تماس، پروفیل سرریز، شیب $1:1.5$ را داشته که توسط یک اوجی به قوس $10/59$ سانتی متر به پنجه متصل شده است. از پله ۴ به بعد ارتفاع پله ها یکنواخت و برابر $1/05$ سانتی متر بوده اند. ارتفاع ۴ پله اول متغیر و به ترتیب برابر $0/5$ ، $0/6$ ، $0/7$ و $0/9$ سانتی متر، در نظر گرفته شد تا نوک پله ها بر پروفیل استاندارد سرریز مماس باشد. به منظور تشابه شرایط هیدرولیکی در مدل و نمونه واقعی از تشابه فرودی استفاده گردید، مشروط بر آن که عدد رینولدز از حد خاصی (10^4) بزرگتر بوده تا اثر لزجت قابل صرف نظر باشد [۲۳]. در جدول ۱ خلاصه پارامترهای طراحی برای مدل و نمونه واقعی ارائه شده است. آزمایش ها به ازای دبی های مختلف بین $0/073$ تا $2/94$ برابر دبی طراحی انجام گردید و مدل فیزیکی ساخته شده تحت ۴ نسبت عرض متفاوت (نسبت عرض کانال پایین دست به عرض سرریز در تاج) شامل $0/214$ ، $0/238$ ، $0/262$ و $0/286$ مورد آزمایش قرار گرفت.

در شکل ۱ شماتیک سرریز پلکانی قوس محور تحت عرض کانال های متفاوت و شکل ۲ تصاویری از مدل تحت همین تغییر عرض ها نشان داده شده است. برای اندازه گیری دبی جریان از یک سرریز لبه تیز مثلثی با زاویه رأس 90 درجه در قسمت انتهایی کانال

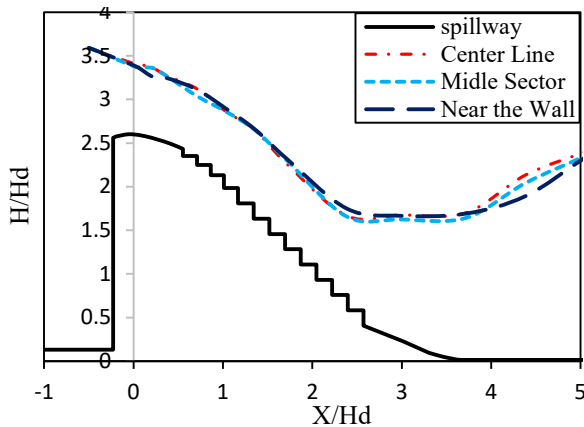


شکل ۱. شماتیک مدل سرریز مدول سرریز اوجی قوس محور تحت همگرایی دیواره‌های هادی
 Fig. 1. Schematic of a typical converging stepped spillway with curve axis



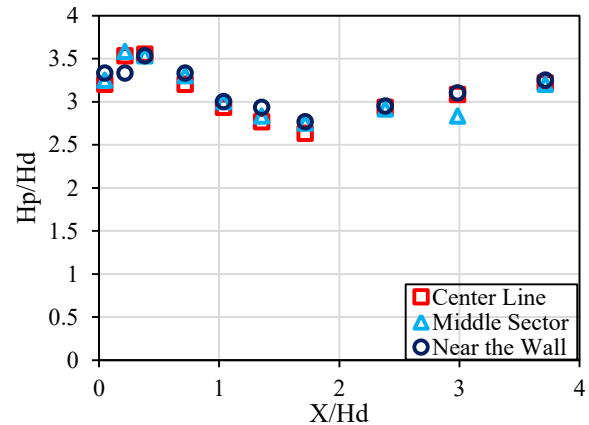
شکل ۲. تصاویری از سرریز پلکانی قوس محور تحت نسبت عرض‌های مختلف (الف) $\frac{W_{ch}}{W} = 0.214$ (ب) $\frac{W_{ch}}{W} = 0.238$ (ج) $\frac{W_{ch}}{W} = 0.262$ (د) $\frac{W_{ch}}{W} = 0.286$

Fig. 2. Photographs of the stepped spillway for varying downstream channel width a) $\frac{W_{ch}}{W} = 0.214$ b) $\frac{W_{ch}}{W} = 0.238$ c) $\frac{W_{ch}}{W} = 0.262$ d) $\frac{W_{ch}}{W} = 0.286$



شکل ۴. پروفیل فشار بر امتداد طولی سرریز در دبی طراحی در مدل با $\frac{W_{ch}}{W} = 0.214$

Fig. 4. The piezometric pressure along the spillway central line model in the design discharge and $\frac{W_{ch}}{W} = 0.214$



شکل ۳. پروفیل سطحی آب بر امتداد طولی سرریز در دبی طراحی در مدل با $\frac{W_{ch}}{W} = 0.214$

Fig. 3. The piezometric pressure profile for the model in the design discharge and $\frac{W_{ch}}{W} = 0.214$

شده‌است. همچنین در دبی‌های بزرگ‌تر از این مقدار، یک پرش هیدرولیکی ثابت در قسمت پنجه سرریز مشاهده می‌گردد که در طی روند افزایش دبی از پرش هیدرولیکی آزاد به پرش مستغرق تغییر ماهیت می‌دهد و علت نیز چنین می‌تواند توضیح داده شود در دبی‌های بالاتر به دلیل پس‌زدگی جریان ناشی از کم‌عرض بودن کانال پایین‌دست، عمق جریان در ابتدای کانال افزایش می‌یابد و سبب می‌شود در هنگام تشکیل پرش هیدرولیکی عمق ثانویه پرش از عمق موجود در ورودی کانال (واقع در پایین دست پرش)، کمتر شده و جریان به سمت مقطع شروع پرش پس‌زده شود که در نهایت موجب استغراق پرش می‌گردد. شکل ۶(الف) و ۶(ب) به ترتیب پرش هیدرولیکی و پرش مستغرق مذکور را نمایش می‌دهد.

۳-۲- ضریب دبی

می‌دانیم مهم‌ترین فاکتور در محاسبه دقیق ظرفیت تخلیه یک سرریز، تخمین مناسب ضریب دبی آن سرریز می‌باشد. معمولاً جریان نوع ریزشی در دبی‌های کم اتفاق می‌افتد و جریان نوع غیرریزشی در دبی‌های زیاد رخ می‌دهد. با توجه به این مطلب در این تحقیق جریان نوع دوم که در سرریزهای پلکانی سدها متداول است، مدل شده‌است. با توجه به آنالیز ابعادی که بر روی ضریب دبی سرریزهای پلکانی مذکور در این تحقیق انجام شد، ارتفاع آب در سراب، ارتفاع

A سطح مقطع جریان در پنجه، Q دبی جریان و H ضخامت تیغه آب بر روی تاج سرریز می‌باشد [۲۴].

۳- نتایج و بحث

۳-۱- مشاهدات

مشاهدات آزمایشگاهی نشان داد در تمامی مدل‌ها با عرض کانال‌های متفاوت (نسبت‌های مختلف $\frac{W_{ch}}{W}$)، پارامترهای هیدرولیکی جریان در دوجناح سرریز متشابه می‌باشند. برای درک بهتر این مطلب، شکل‌های ۳ و ۴ که به ترتیب پروفیل سطح آب و پروفیل فشار استاتیکی در دبی طراحی در مدل با $\frac{W_{ch}}{W} = 0.214$ هستند به ازای تمامی قطاع‌های برداشتی به‌عنوان نمونه رسم شده‌است.

باتوجه به مطالب فوق‌الذکر برای مقایسه پارامترهای هیدرولیکی جریان در هر دبی از مقدارهای برداشتی در خط مرکزی سرریز (Center Line) به‌عنوان شاخص مقایسه استفاده گردید [۲۵]. در تمامی مدل‌ها با عرض کانال‌های متفاوت در ناحیه پنجه سرریز، پدیده تداخل خطوط جریان و همگرایی به دلیل تقرب دیواره‌های هادی به سمت پایین دست اتفاق می‌افتد که منتج از آن پدیده دم‌خروسی (Rooster Tail) در آن ناحیه قابل مشاهده است. پدیده دم‌خروسی در قسمت میانی بیشترین ارتفاع را داشته و در کناره‌ها کوتاه‌تر است، این پدیده در شکل ۵(الف) و ۵(ب) نشان داده



(ب)

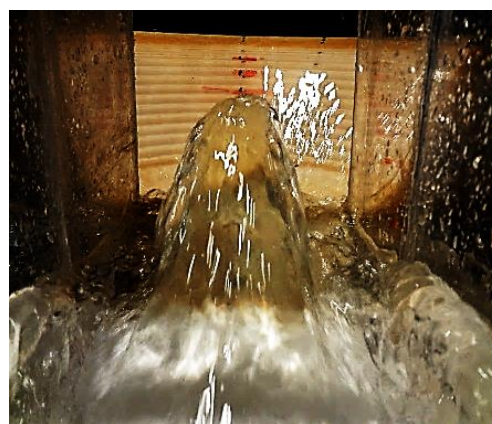


(الف)

شکل ۵. پدیده دم خروسی الف) از نمای مقابل ب) از نمای جانبی



(ب)



(الف)

شکل ۵. پدیده دم خروسی الف) از نمای مقابل ب) از نمای جانبی
Fig. 5. Rooster tail a) front view b) side view

تشکیل می شود، اما در دبی های بیشتر از آن، با توجه به کمتر بودن انرژی در پنجه از حداقل مقدار انرژی لازم برای عبور از دهانه کانال پایین دست، این پرش به صورت مستغرق اتفاق می افتد. بر این اساس در شرایط مذکور عامل کنترل کننده دبی، عمق جریان در پایین دست خواهد شد و مقطع سرریز به صورت یک مانع و ورودی کانال به عنوان دریچه عمل خواهد کرد. با توجه به شکل مشخص است در نسبت عرض $\frac{W_{ch}}{W} = 0.214$ ، که تفاوت انرژی جریان در پنجه سرریز و انرژی کمینه مورد نیاز برای عبور از ورودی کانال پایین دست بیشتر است، پرش مستغرق سریعتر رخ می دهد. همچنین شکل مذکور نشان داد، هر چه نسبت عرض افزایش می یابد، سرریز در دبی های بالاتری پدیده استغراق را مشاهده می کند. در بازه $\frac{H}{H_d} < 0.75$ مقدار ضریب دبی در مدل فیزیکی پلکانی در کلیه نسبت عرض ها کمتر از مدل صاف USBR مشاهده گردید که علت آن می تواند عدم تطابق پروفیل

آب در پایاب، رقوم کف در پایاب و عرض کانال پایین دست مهم ترین پارامترهای مؤثر بر ضریب دبی معرفی شدند. لذا با توجه به این مسأله اثر پارامترهای مذکور بر روی ضریب دبی به صورت جداگانه مورد بررسی قرار گرفت.

۳-۲-۱- اثر ارتفاع آب در سراب بر ضریب دبی

در شکل ۷ تغییرات بار آبی بالادست سرریز بر ضریب دبی به ازای نسبت عرض های مختلف سرریز پلکانی مدل موجود و همچنین سرریز اوجی استاندارد USBR رسم شده است. با توجه به این نکته که ماهیت پرش هیدرولیکی در دبی های کمتر و بیشتر از دبی طراحی متفاوت می باشد و این تفاوت تأثیر گذار بر ضریب دبی جریان می باشد، ضریب دبی در دو بخش مورد بررسی قرار گرفت. در دبی های کمتر از دبی طراحی، پرش هیدرولیکی در پنجه سرریز

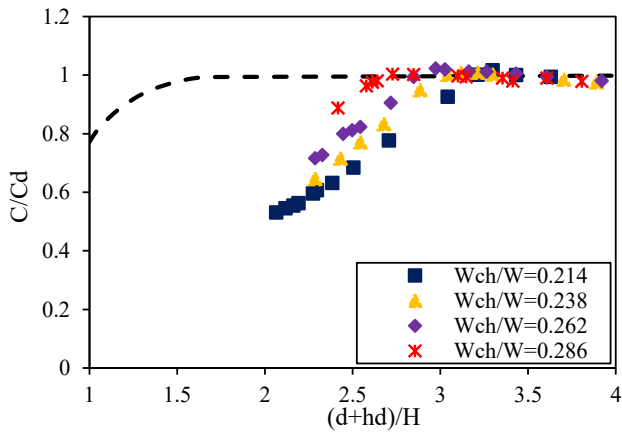


(ب)



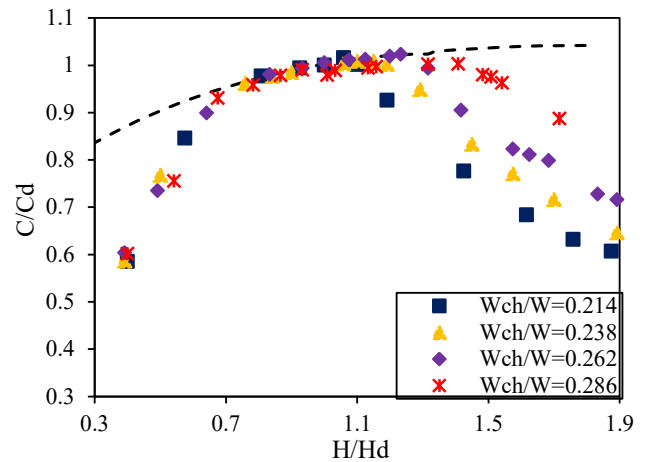
(الف)

شکل ۶. پدیده پرش هیدرولیکی: (الف) آزاد (ب) مستغرق
Fig. 6. Hydraulic jump a) Free b) Submerge



شکل ۸. نمودار رقوم کف بند-ضریب دبی به ازای نسبت عرض های مختلف

Fig. 8. Ratio of discharge coefficients caused by position of downstream apron effects for varying downstream channel width



شکل ۷. نمودار ارتفاع سطح آب-ضریب دبی به ازای نسبت عرض های مختلف

Fig. 7. The upstream spillway water head versus the discharge coefficient for varying downstream channel width

نسبت به سرریز اوجی استاندارد USBR مشاهده می شود.

۳-۲-۳- اثر رقوم کف درپایاب بر ضریب دبی

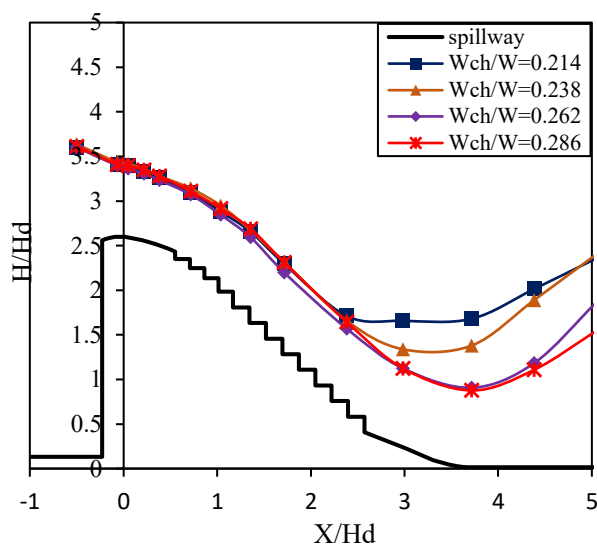
برای تعیین اثر رقوم کف بند بر ضریب دبی از شکل ۸ استفاده شده است، همان طور که از این شکل پیداست به ازای $\frac{d+h_d}{H} > \frac{3}{2}$ مقادیر نسبت ضریب دبی به ازای تمامی نسبت عرض ها برابر ۱ شده است و این بدان معنا است که در این بازه رقوم کف بند تأثیری بر روی ضریب دبی ندارد، اما در بازه $\frac{d+h_d}{H} < \frac{3}{2}$ مقادیر نسبت ضریب دبی کمتر از ۱ بوده و نشان گر تأثیر رقوم کف بند بر روی

جریان با پروفیل تاج سرریز پلکانی و هم چنین اصطکاک ناشی از پلکان ها گزارش گردد. در بازه $\frac{H}{H_d} < \frac{1}{23} < \frac{H}{H_d} < \frac{1}{75}$ این مقدار با ضریب آب گذری سرریز USBR تطابق دارد که به نظر می رسد دلیل آن افزایش سرعت جریان در قسمت تاج سرریز پلکانی متناسب با افزایش دبی و شکل گیری کامل جریان غیرریزشی باشد که منتج از آن با کاهش تاثیر پلکان ها بر روی ضریب دبی مدل حاضر، نزدیکی عملکرد سرریز پلکانی موجود و سرریز صاف USBR قابل مشاهده است. اما با افزایش بار آبی کل، در تمامی نسبت عرض ها، به دلیل استغراق سرریز، نمودار ضریب دبی روند کاهشی به خود گرفته و کاهش کارایی سرریز

متأثر از درجه استغراق می باشد. به بیان دیگر هر چه درجه استغراق سرریز در این بازه کمتر باشد (مقادیر $\frac{h_d}{H}$ در حال افزایش باشند)، ضریب دبی نسبی ($\frac{C}{C_d}$) افزایش بیشتری نشان می دهد و این در حالی است که بدلیل تقرب دیواره های هادی و استغراق زودرس سرریز مذکور نسبت به سرریز اوجی استاندارد USBR، ضریب دبی در این بازه از مقادیر USBR کمتر می باشد. اما به ازای مقادیر $0.7 > \frac{h_d}{H}$ ، سرریز در درجات استغراق پایینی قرار داشته و ضریب دبی دیگر تأثیر پذیری از مقادیر $\frac{h_d}{H}$ نشان نمی دهد. علاوه بر این در بازه تأثیر پذیری ضریب دبی از درجات استغراق، با افزایش نسبت $\frac{W_{ch}}{W}$ ، ضریب دبی مقداری افزایش از خود نشان می دهد. به عنوان مثال به ازای مقدار تقریبی $0.25 \cong \frac{h_d}{H}$ ، بالاترین مقدار ضریب دبی برابر با 0.81 مربوط به نسبت عرض $0.286 = \frac{W_{ch}}{W}$ و کمترین مقدار ضریب دبی برابر با 0.66 مربوط به $0.214 = \frac{W_{ch}}{W}$ می باشد.

۳-۳-۳- پروفیل سطح آب

داده های برداشت شده از پروفیل سطح آب در امتداد خط مرکزی سرریز در نسبت عرض های مختلف به ازای دبی $22/3$ لیتر بر ثانیه معادل دبی طراحی در نمونه واقعی (۳۹۸ مترمکعب بر ثانیه)، در شکل ۱۰ جمع آوری شده است. مشاهده های آزمایشگاهی حاصل نشان داد، در تمامی مدل های مذکور در قسمت پنجه و کف بند، نواحی

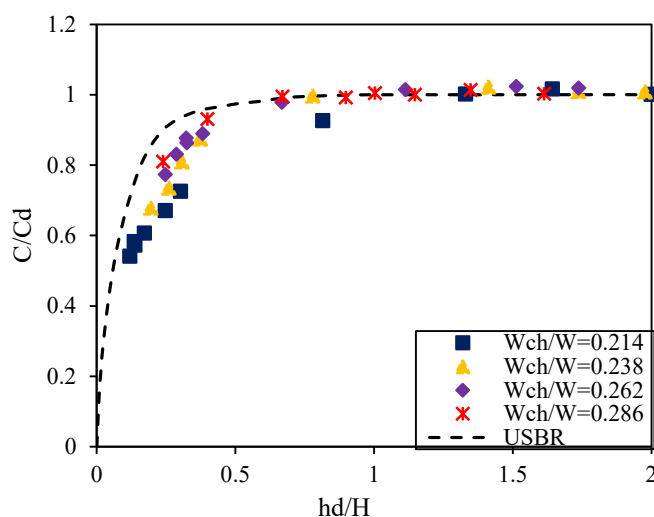


شکل ۱۰. پروفیل سطح جریان بی بعد شده در راستای طولی سرریز در عرض های مختلف کانال پایین دست در دبی $22/3$ لیتر بر ثانیه
Fig. 10. Water surface over the ogee-spillway normalized by design head With varying downstream channel width and $q=22.63 \text{ l/m.s}$

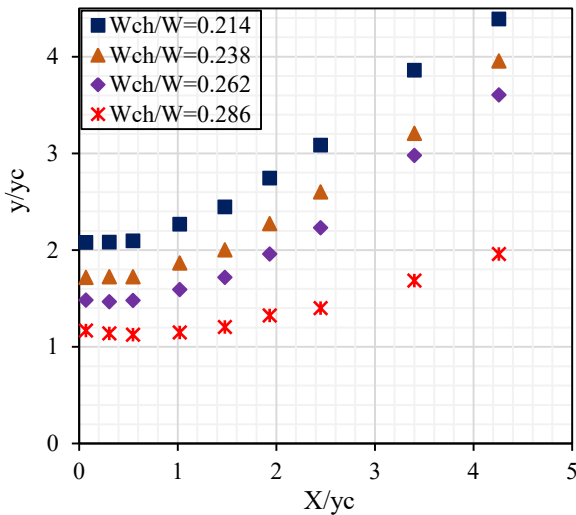
ضریب دبی می باشد، همچنین در این بازه تأثیرپذیری سرریز پلکانی مورد استفاده در این تحقیق نسبت به سرریز اوجی استاندارد USBR بیشتر بوده که دلیل آن می تواند تنگ شدگی عرض کانال پایین دست در اثر همگرایی سرریز به سمت پایین دست و ایجاد پرش مستغرق در این ناحیه گزارش گردد. نکته دیگری که با این استدلال و با توجه به شکل قابل حصول می باشد این است که دلیل کاهش نسبی تأثیر پذیری ضریب دبی از رقوم کف بند با افزایش نسبت $\frac{W_{ch}}{W}$ در بازه مذکور ($2 < \frac{d+h_d}{H} < 3/2$) نیز همین استدلال می تواند باشد، به عبارت دیگر هر چه عرض کانال پایین دست بیشتر می گردد، پرش مستغرق در پنجه سرریز به تعویق افتاده و به همان نسبت ضریب دبی نیز دیرتر سیر نزولی پیدا می کند.

۳-۳-۳- اثر رقوم پایاب بر ضریب دبی

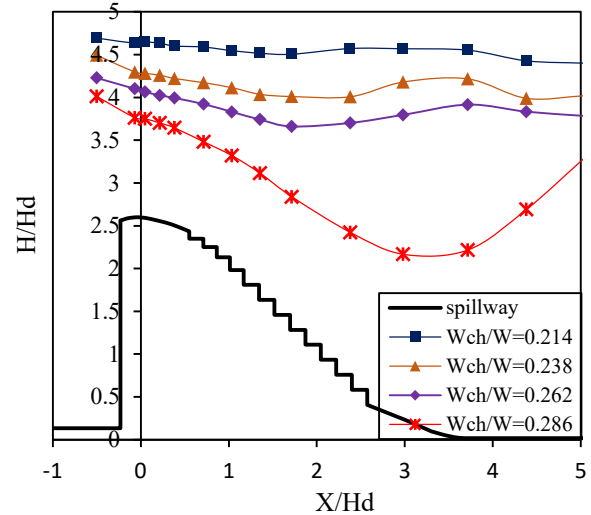
در شکل ۹ منحنی مربوط به اثر عمق پایاب بر ضریب دبی رسم شده است، از اثر $\frac{h_d}{H}$ در برخی مراجع بنام اثر درجه استغراق نیز نام برده شده است [۲۶]، با این توضیح که تغییرات درجه استغراق دقیقاً عکس نسبت $\frac{h_d}{H}$ می باشد، به عبارت دیگر هر چه مقدار $\frac{h_d}{H}$ کمتر باشد، استغراق در درجه بالاتری قرار دارد. همانطور که در شکل مشاهده می گردد به ازای مقادیر $0.7 < \frac{h_d}{H}$ ، درجه استغراق در درجات بالایی قرار داشته، به همین دلیل ضریب دبی در این بازه



شکل ۹. نمودار رقوم پایاب-ضریب دبی به ازای نسبت عرض های مختلف
Fig. 9. Comparison of discharge coefficient for varying downstream channel width against (h_d/H)



شکل ۱۲. عمق بی بعد جریان در مجاورت دیواره های هادی در عرض های مختلف کانال پایین دست در دبی ۳۸/۰۱ لیتر بر ثانیه
 Fig. 12. Flow depth near the training wall versus distance from crest normalized by critical depth for varying downstream channel width and $q=38.01$ l/m.s



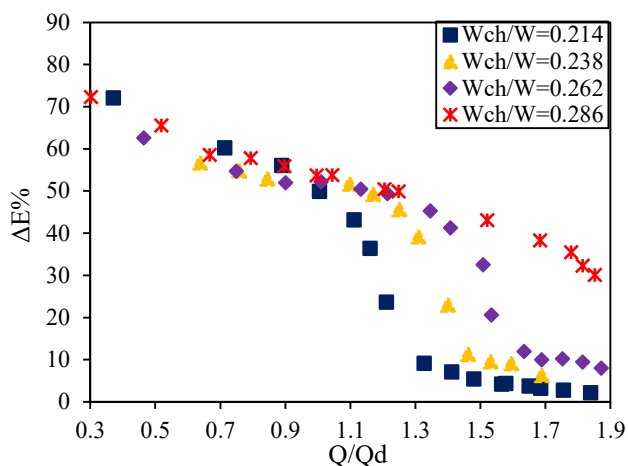
شکل ۱۱. پروفیل سطح جریان بی بعد شده در راستای طولی سرریز در عرض های مختلف کانال پایین دست در دبی ۳۸/۰۱ لیتر بر ثانیه
 Fig. 11. Water surface over the ogee spillway normalized by design head With varying downstream channel width and $q=38.01$ l/m.s

ازای عرض کانال های مختلف هر چه مقدار عرض کانال پایین دست و یا به عبارت دیگر نسبت عرض $\frac{W_{ch}}{W}$ افزایش می یابد، ارتفاع پروفیل سطح آب کاهش می یابد، به عبارت دیگر نسبت $\frac{W_{ch}}{W}$ و ارتفاع سطح آب با یکدیگر ارتباط عکس دارند، علت این پدیده نیز چنین بیان می گردد با افزایش نسبت عرض کانال پایین دست به عرض سرریز در محل تاج، از همگرایی خطوط جریان کاسته شده و متناسب با آن کاهش ارتفاع سطح جریان مشاهده می گردد.

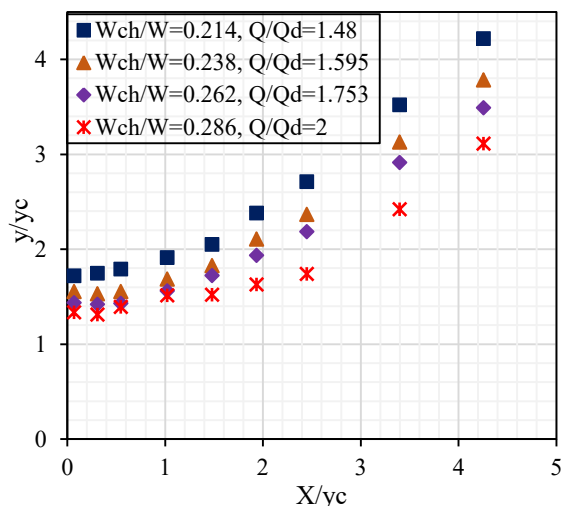
۴-۳- عمق جریان در مجاورت دیواره های هادی

نمودار عمق جریان بی بعد شده با عمق بحرانی در مجاورت دیواره های هادی سرریز به ازای بالاترین دبی مشترک عبوری (معادل دبی ۶۷۲ مترمکعب بر ثانیه در نمونه واقعی) تحت نسبت عرض های مختلف در شکل ۱۲ رسم شده است. همانطور که در این شکل مشاهده می گردد، عمق جریان در راستای طولی سرریز به ازای تمامی نسبت عرض ها $(\frac{W_{ch}}{W})$ از تاج تا پنجه در حال افزایش می باشد، همچنین با افزایش نسبت عرض $\frac{W_{ch}}{W}$ عمق جریان بر روی سرریز روندی کاهشی دارد، بر همین اساس است که عمق جریان در در ایستگاه ۴/۲۶، در کمترین نسبت عرض، $\frac{W_{ch}}{W} = 0.214$ ، در حدود $\frac{W_{ch}}{W} = 0.286$ برابر عمق جریان در بزرگترین نسبت عرض، گزارش شده است. در شکل ۱۳ نمودار عمق جریان در مجاورت

نزدیک به خط میانی سرریز به دلیل همگرایی خطوط جریان بالاترین سطح ارتفاع سیال وجود دارد اما در کناره ها ارتفاع جریان کمتر است، ارتفاع سطح آب در راستای طولی سرریز از تاج تا پنجه افزایش می یابد به نحوی که بیشترین ارتفاع پروفیل سطح آب در قسمت پنجه قابل مشاهده است. علاوه بر این در این دبی چون در تمامی نسبت عرض های $(\frac{W_{ch}}{W})$ مختلف سرریز در حالت آزاد قرار دارد، پروفیل سطح آب بر روی بدنه سرریز تقریباً یکسان بوده و تفاوت در پروفیل سطح آب فقط در قسمت پنجه سرریز قابل مشاهده می باشد و این مسأله چنین می تواند توضیح داده شود که رژیم جریان در این دبی در تمامی مدل ها فوق بحرانی بوده و تنها تأثیرپذیری از بالادست خود دارد که باتوجه به شرایط بالادست یکسان برای تمامی مدل ها، این امر باعث انطباق پروفیل جریان در سطح بدنه سرریز می گردد، اما در قسمت پنجه با توجه به کم عرض شدن سرریز تفاوت در میزان تداخل خطوط جریان و همگرایی باعث تفاوت در پروفیل سطح آب می گردد، به نحوی که هر چه میزان تنگ شدگی کانال پایین دست بیشتر باشد ارتفاع سطح آب در آن ناحیه بیشتر است. در شکل ۱۱ داده های برداشت شده از پروفیل سطح آب به ازای $\frac{W_{ch}}{W}$ های مختلف در دبی ۳۸/۰۱ لیتر بر ثانیه معادل ۶۷۲ مترمکعب بر ثانیه در نمونه واقعی، بالاترین دبی مشترک عبوری در بین تمامی مدل ها، جمع آوری شده است. همان طور که در شکل نشان داده شده است، به



شکل ۱۴. تغییرات پارامتر استهلاک انرژی در نسبت عرض های متفاوت
 Fig. 14. Energy dissipation over the stepped spillway With varying downstream channel width



شکل ۱۳. عمق بی بعد جریان در مجاورت دیواره های هادی در نسبت عرض های مختلف و بالاترین دبی مجاز
 Fig. 13. Flow depth near the training wall versus distance from crest normalized by critical depth for varying downstream channel width and maximum allowable discharge

بالاتری سیر نزولی از خود نشان می دهد. به عنوان مثال در نمودار $\frac{Q}{Q_d} = 0.3$ در نسبت دبی ۷۳٪، در بیشترین استهلاک انرژی معادل ۰/۲۷٪ در نسبت $\frac{Q}{Q_d} = 1.87$ و کمترین استهلاک انرژی معادل ۰/۲۱۴٪ گزارش گردید. عرض $\frac{W_{ch}}{W} = 0.214$

۵-۳-۶- نمودار دبی-اشل

با توجه به این مطلب که سرریزها به نحوی طراحی می گردند که توان عبور ماکزیمم دبی محتمل سیلاب (Q_{PMF}) را در حداکثر ارتفاع مجاز مخزن داشته باشند، نمودار دبی-اشل سرریز معادل شده در مقیاس نمونه واقعی تحت نسبت عرض های مختلف، در شکل ۱۵ رسم گردید تا از آن به عنوان شاخصی تخمینی برای یافتن مناسب ترین عرض کانال پایین دست با توجه به عرض سرریز در تاج در بین این نسبت عرض ها استفاده گردد. با توجه به شکل ۱۵ به نظر می رسد که هرچه نسبت عرض کانال پایین دست به عرض سرریز در تاج $(\frac{W_{ch}}{W})$ افزایش می یابد دبی عبوری به ازای ماکزیمم هد مجاز نیز در حال افزایش است و این در حالی است که تنها مدل با نسبت عرض $\frac{W_{ch}}{W} = 0.286$ است که توان عبور حداکثر دبی سیلاب محتمل را در حداکثر ارتفاع مجاز (۵ متر) دارا می باشد بنابراین این نسبت عرض می تواند به عنوان مناسب ترین نسبت عرض در بین این مدل ها معرفی گردد. قابل توجه است که طرح این نوع سرریز صرفه جویی مناسبی در زمینه اجرا و زمان ساخت داشته و عملا در سایت هایی

دیواره های هادی سرریز تحت نسبت عرض های مختلف، به ازای بالاترین دبی عبوری از روی هر سرریز در بالاترین هد مجاز (معادل هد ۵ متر در نمونه واقعی) رسم شده است. با توجه به نتایج حاصل از این گراف ترسیمی می توان به یک پیش بینی اولیه برای تخمین حداقل ارتفاع دیواره هادی موردنیاز برای جلوگیری از روگذری جریان از روی دیواره های هادی دست یافت. همان طور که در این شکل مشاهده می گردد عمق جریان در نسبت عرض $\frac{W_{ch}}{W} = 0.214$ در ایستگاه ۴/۲۶، در حدود ۱/۳۵ برابر عمق جریان در نسبت عرض $\frac{W_{ch}}{W} = 0.286$ است.

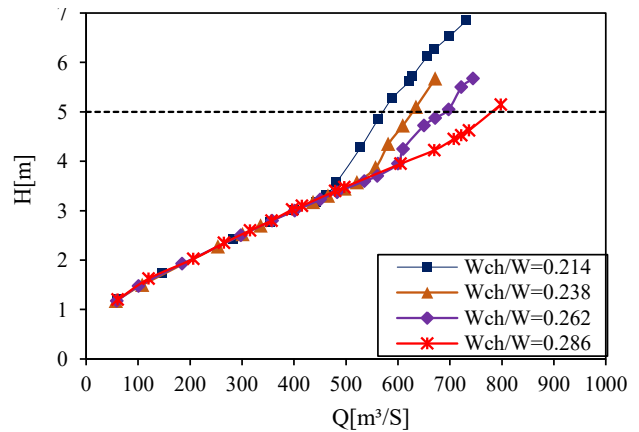
۴-۳-۵- استهلاک انرژی

با توجه به شکل ۱۴ مشاهده می شود که با افزایش دبی استهلاک انرژی کاهش می یابد که این امر به دلیل کاهش زبری پله ها در اثر استغراق آن ها می باشد. همان طور که در شکل نشان داده شده است تا قبل از $\frac{Q}{Q_d} < 1/1$ تغییرات نسبت عرض تأثیر چندانی بر روی استهلاک انرژی ندارد و نرخ یکسان کاهش استهلاک انرژی در این بازه به ازای تمامی نسبت عرض ها، به دلیل یکسان بودن مشخصات هندسی پله اعم از تعداد و طول و عرض یکسان آن می تواند باشد، مضاف بر اینکه در این بازه سرریز به ازای همه نسبت عرض ها در حالت جریان آزاد قرار دارد. اما با افزایش دبی، هر چه نسبت عرض $(\frac{W_{ch}}{W})$ بزرگتر باشد پارامتر استهلاک انرژی ($E\Delta$) در دبی های

افزایش پیدا می کند، ارتفاع سطح آب در قسمت شوت و پنجه کاهش می یابد، بر همین اساس است که عمق جریان در کمترین نسبت عرض، $\frac{W_{ch}}{W} = 0.214$ ، در ایستگاه ۴/۲۶، در حدود ۲/۴۲ برابر عمق جریان در بزرگترین نسبت عرض، $\frac{W_{ch}}{W} = 0.286$ ، گزارش شده است. آزمایش ها نشان داد هر چه نسبت عرض افزایش می یابد، سرریز در دبی های بالاتری پدیده استغراق را مشاهده می کند. در بازه ۰/۷۵ $\frac{H}{H_d} <$ مقدار ضریب دبی در مدل فیزیکی پلکانی در کلیه نسبت عرض ها کمتر از مدل صاف USBR مشاهده گردید. در بازه ۱/۲۳ $\frac{H}{H_d} <$ این مقدار با ضریب آب گذاری سرریز USBR تطابق دارد، اما با افزایش بار آبی کل، در تمامی نسبت عرض ها، به دلیل استغراق سرریز، نمودار ضریب دبی روند کاهشی به خود گرفته و کاهش کارایی سرریز نسبت به سرریز اوجی استاندارد USBR مشاهده می شود. استهلاك انرژی با افزایش دبی، کاهش می یابد، علاوه بر این نتایج بررسی شده نشان داد، تا قبل استغراق سرریز برای تمامی مدل ها $(\frac{Q}{Q_d} < 1/1)$ تغییرات نسبت عرض تأثیر چندانی بر روی استهلاك انرژی ندارد، اما با افزایش دبی، هر چه نسبت عرض $(\frac{W_{ch}}{W})$ بزرگتر باشد پارامتر استهلاك انرژی $(E\Delta)$ در دبی های بالاتری سیر نزولی از خود نشان می دهد. نمودار دبی-اشل سرریز معادل شده در مقیاس نمونه واقعی تحت نسبت عرض های مختلف، به عنوان شاخصی کمی برای یافتن مناسب ترین نسبت عرض در بین این مدل ها استفاده گردید. هرچه نسبت عرض کانال پایین دست به عرض سرریز در تاج $(\frac{W_{ch}}{W})$ افزایش می یابد دبی عبوری به ازای ماکزیمم هد مجاز نیز در حال افزایش است، اما تنها مدل با نسبت عرض $\frac{W_{ch}}{W} = 0.286$ است که توان عبور حداکثر دبی سیلاب محتمل را در حداکثر ارتفاع مجاز (۵ متر) دارا می باشد، بنابراین این نسبت عرض می تواند به عنوان مناسب ترین نسبت عرض در بین این مدل ها معرفی گردد.

۷- فهرست علائم

A	سطح مقطع جریان در پنجه، m^2
C	ضریب دبی
C_d	ضریب دبی طراحی
d	عمق جریان در پنجه، m
E1	میزان انرژی در بالادست سرریز، m
E2	انرژی در پنجه سرریز، m



شکل ۱۵. دبی-اشل سرریز در نسبت عرض های مختلف مقیاس شده به مقادیر نمونه واقعی

Fig. 15. The stage - discharge diagram for all considered models

که عرض سرریز مورد نیاز برای عبور دبی حداکثر و عرض کانال و یا رودخانه در پایین دست تطابق ندارد می تواند طرح مناسبی باشد.

۶- نتیجه گیری

در پژوهش حاضر عملکرد هیدرولیکی سرریز پلکانی قوس محور تحت اثر تغییرات نسبت عرض کانال پایین دست به عرض سرریز $(\frac{W_{ch}}{W})$ مورد بررسی قرار گرفت و برای این منظور پارامترهای هیدرولیکی جریان مانند پروفیل سطح آب، ضریب دبی، استهلاك انرژی و دبی-اشل هر یک از مدل ها مقایسه شد. آزمایش ها نشان داد، در تمامی مدل ها با نسبت عرض های متفاوت، پارامترهای هیدرولیکی جریان در دو جناح سرریز متشابه می باشد، بر همین اساس برای مقایسه پارامترهای هیدرولیکی جریان در هر دبی از مقدارهای برداشتی در خط مرکزی سرریز (Center Line) به عنوان شاخص مقایسه استفاده گردید. با توجه به اهمیت اثرات هندسه خاص سرریز پلکانی مورد استفاده بر روی پارامترهای هیدرولیکی جریان، فاکتوری مهم مانند ضریب دبی به نمایندگی از سایر مشخصه های هیدرولیکی جریان، انتخاب و آنالیز ابعادی بر روی آن انجام گرفت. با توجه به آنالیز ابعادی انجام شده، ارتفاع آب در سراب، ارتفاع آب در پایاب، رقوم کف در پایاب و عرض کانال پایین دست به عنوان مهم ترین پارامترهای مؤثر بر ضریب دبی این نوع سرریز معرفی شدند. داده های برداشتی از پروفیل سطح آب در امتداد خط مرکزی سرریز در نسبت عرض ها و دبی های مختلف بیانگر این مطلب بود هر چه مقدار $\frac{W_{ch}}{W}$

spillways, Technical University press, Tehran, 38(2) (2004) 339-347 [In Persian].

[8] H. Chanson, Jet flow on stepped spillways. Journal of Hydraulic Engineering, 121(5) (1995) 441-448.

[9] H. Chanson, R.L. Whitmore, Investigation of the gold creek dam spillway, Australia, 1996

[10] M. Chamani, N. Rajaratnam, Characteristics of skimming flow over stepped spillways. Journal of Hydraulic Engineering, 125(4) (1999) 361-368.

[11] M. Chamani, Rajaratnam, N. Onset of skimming flow on stepped spillways. Journal of Hydraulic Engineering, 125(9) (1999) 969-971.

[12] H. Chanson, Prediction of the transition nappe/skimming flow on a stepped channel. Journal of Hydraulic Research, 34(3) (1996) 421-429.

[13] H. Chanson, Hydraulics of stepped chutes and spillways, CRC Press, 2002.

[14] H. Chanson, Y. Yusuda, I. Ohtsu, Flow resistance in skimming flow: a critical review, Balkema, (2000) 95-102,

[15] I.T.S. Essery, M.W. Horner, The hydraulic design of stepped spillways, Construction Industry Research and Information Association, 1971.

[16] K. Frizell, Hydraulics of stepped spillways for RCC dams and dam rehabilitations, ASCE, (1992) 423-439.

[17] D. Stephenson, Energy dissipation down stepped spillways. International water power & dam construction, 43(9) (1991) 27-30.

[18] M.R. Chamani, N. Rajaratnam, Jet flow on stepped spillways. Journal of Hydraulic Engineering, 120(2), (1994) 254-259.

[19] Mohammadzadeh-Habili, J., Heidarpour, M., Afzalimehr, H.: Hydraulic characteristics of a new weir entitled of quarter-circular crested weir. Flow Measurement and Instrumentation 33, 168-178 (2013).

[20] Ranga Raju, K.G., Asawa, G.L.: Viscosity and

شتاب گرانشی زمین، m/s^2	g
ارتفاع تیغه آب روی تاج سرریز، m	H
ارتفاع طراحی سرریز، m	H_d
ارتفاع سرریز، m	P
دبی جریان، m^3/s	Q
دبی طراحی جریان، m	Q_d
شعاع قوس های تشکیل دهنده پروفیل تاج سرریز، m	R₁, R₂
سرعت جریان در پنجه، m^2/s	v
عرض سرریز در تاج، m	W
عرض کانال پایین دست سرریز، m	W_{ch}
عمق جریان در راستای طولی جریان، m	Y
عمق بحرانی در تاج سرریز، m	Y_c
اختلاف میزان انرژی در بالادست و پایین دست سرریز، m	EΔ

مراجع

[1] M.K. Beirami, Water conveyance structures, Isfahan university of technology press, Isfahan, Iran, 1977 [In Persian].

[2] H. CHANSON. Self-aerated flows on chutes and spillways. Journal of hydraulic engineering, 119.1993, 220-243.

[3] CHANSON, Hydraulic design of stepped channels and spillways, Department of Civil Engineering, University of Queensland, 1994.

[4] N. Rajaratnam, Skimming flow in stepped spillways. Journal of Hydraulic Engineering, 116(4) (1990) 587-591.

[5] N. Sori, A. Mojtahedi, Investigation of Effects of the Geometry on Rate of Energy Dissipation of the Flow over the Stepped Spillway using Fuzzy Inference Systems. Journal of Civil and Environmental Engineering, 45(3) (2015) 25-39 [In Persian].

[6] F. Salmasi, M. Bina, H. Musavi, Energy dissipation on stepped spillways. 6th International Conference on Civil Engineering, Isfahan University of technology, Isfahan, Iran, 2003 [In Persian].

[7] H.M. Vali Samani, M.R. Nazarzadeh, Evaluation of the principles of hydraulic flow and design of stepped

2009. [In Persian].
- [23]S.L. Hunt, K.C. Kadavy, S.R. Abt, D.M. Temple, Impact of converging chute walls for roller compacted concrete stepped spillways. Journal of Hydraulic Engineering 134(7) (2008) 1000-1003.
- [24]USBR, US, Bureau of Reclamation: Design of small dams, 3rd ed. Technical Service Center, Denver, USA (1977/1987)
- surface tension effects on weir flow. Journal of the Hydraulics Division 103(10), 1227-1231 (1977).
- [21]USACE, US, Army Corps of Engineers. Gravity Dam Design–Engineering and design (engineer manual), EM 1110-2-2200, 1995.
- [22]S. Sedaghat nejad, Investigation of energy dissipation in stepped overflows with end-points. MSc Dissertation, University of Sharif, Tehran, Iran,

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

A. Foroudi, K. Roushangar, M. Saneie, *Experimental Study of Hydraulic Performance of Stepped Spillway with a Curve Axis Affected by Downstream Channel Width Changes*, *Amirkabir J. Civil Eng.*, 51(5) (2019) 1063-1076.

DOI: [10.22060/ceej.2018.14250.5602](https://doi.org/10.22060/ceej.2018.14250.5602)

