

بررسی آزمایشگاهی اتلاف انرژی در سرریزهای کرامپ در حالت جریان آزاد و مستغرق

محمدحسن هاشمی فشارکی^۱، علی خوش فطرت^{۲*}، الهام ایزدی نیا^۳، احسان دلاوری^۴

۱. دانشجوی دکتری، گروه مهندسی عمران، واحد نجف آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، اصفهان، ایران.

۲. استادیار، گروه مهندسی عمران، واحد اصفهان (خوراسگان)، دانشگاه آزاد اسلامی، اصفهان، ایران.

۳. استادیار، گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی - مهندسی، دانشگاه شهید اشرفی اصفهانی، اصفهان، ایران.

۴. استادیار، گروه مهندسی عمران، واحد نجف آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، اصفهان، ایران.

Email: khoshfetrat@khuisf.ac.ir

تاریخ دریافت: [۱۴۰۲/۲/۲۴]

تاریخ پذیرش: [۱۴۰۲/۷/۲۷]

چکیده

سرریزهای کرامپ، سازه‌های ساده و مقرون به صرفه‌ای هستند که، بررسی اتلاف انرژی در سرریزهای کرامپ و کاهش آبستگي در آنها حائز اهمیت است. در این تحقیق سه سرریز کرامپ با ارتفاع ۰/۱۵ متر و یک سرریز کرامپ با ارتفاع ۰/۲ متر مورد بررسی قرار گرفتند. این چهار سرریز دارای شیب‌های متفاوت در بالادست و پایین دست هستند. همچنین از پنج دبي ۰/۰۳، ۰/۰۳۵، ۰/۰۴، ۰/۰۴۵ و ۰/۰۵ متر مکعب بر ثانیه استفاده شد. نتایج نشان داد که بیشترین اتلاف انرژی در سرریز با ارتفاع ۰/۱۵ متر همراه با شیب بالادست ۹۰ درجه و شیب پایین دست ۳۰ درجه به وجود می‌آید. اتلاف انرژی در حالت جریان آزاد بیشتر از اتلاف انرژی در سرریزها با حالت جریان مستغرق است. همچنین با افزایش ارتفاع سرریزها، اتلاف انرژی کاهش می‌یابد. شیب پایین دست سرریزها بر اتلاف انرژی تأثیر بیشتری می‌گذارند و با کاهش آن، اتلاف انرژی افزایش می‌یابد. وجود بافل باعث افزایش اتلاف انرژی می‌شود. همچنین نتایج نشان داد که به‌طور میانگین، وجود بافل‌ها نسبت به حالت بدون بافل در جریان آزاد، باعث افزایش ۵۰/۳ درصدی اتلاف انرژی می‌شوند.

واژگان کلیدی: اتلاف انرژی، بافل، جریان آزاد، جریان مستغرق، کرامپ.

۱. مقدمه

سدها از جمله بهترین راه برای ذخیره بلندمدت آب به حساب می‌آیند [1]. به طور کلی افزایش ضریب آبگذری، اتلاف انرژی بیشتر و به دنبال آن کاهش آبستتگی پایین دست سدها و سازه‌های هیدرولیکی مورد اهمیت است. سرریزها جزء سازه‌های هیدرولیکی هستند که در مواقع سیلاب، دبی بیشتری را از خود عبور می‌دهند. سرریز کرامپ نیز با عبوردهی جریان مازاد در مواقع سیلاب، باعث افزایش بهبود و حفاظت از سدها و بدنه سرریز می‌شود. افزایش اتلاف انرژی نیز باعث جلوگیری و یا کاهش مقدار آبستتگی شده و همین امر از احتمال ترک خوردگی و واژگونی سرریز کرامپ جلوگیری می‌کند. مطالعات ارزشمندی در زمینه هیدرولیک جریان سرریزهای کرامپ انجام شده است که به تعدادی از آن‌ها پرداخته می‌شود. کلر (۱۹۹۳)، مطالعات خود را روی سرریز کرامپ شیب‌دار با مقیاس ۱:۱۰ و ۱:۳ انجام داد و دریافت که با افزایش عمق جریان در بالادست سرریز، سازه مانند نصف یک سرریز کرامپ مسطح V شکل عمل می‌کند و با کاهش عمق جریان در بالادست سرریز، ضریب آبگذری افزایش می‌یابد [2]. حبیبی و خسروچردی (۱۳۸۷)، با استفاده از نرم‌افزار Fluent، عبور جریان از روی سرریزهای کرامپ را شبیه‌سازی کردند و دریافتند که با افزایش ارتفاع آب در بالادست سرریز، ضریب آبگذری کاهش می‌یابد [3]. حاجی‌پور و همکاران (۱۳۸۸)، با مطالعه آزمایشگاهی روی سرریزهای کرامپ با ارتفاع‌های ۰/۱۵، ۰/۱۶ و ۰/۱۷ متری دریافتند که با افزایش ارتفاع سرریز، ضریب آبگذری کاهش می‌یابد و با افزایش شیب پایین دست سرریز، ضریب آبگذری افزایش می‌یابد [4]. لانگو (۲۰۱۰)، به بررسی و تحلیل سطوح سیال و اندازه‌گیری سه مولفه‌ی سرعت سیال با ایجاد یک میدان جریان ثابت روی سرریز کرامپ پرداخت. نتایج نشان داد که برای اعداد فرود کمتر، سطح آزاد معمولاً صاف است [5]. کومار و همکاران (۲۰۱۱)، ضریب آبگذری سرریزهای مثلثی کرامپ را در حالت جریان آزاد مورد بررسی قرار دادند. ایشان دریافتند که با کاهش زاویه رأس و افزایش مقدار نسبت عمق جریان در بالادست سرریز با ارتفاع سرریز، ضریب

آبگذری کاهش می‌یابد [6]. عظیمی و همکاران (۲۰۱۳)، دریافتند که با افزایش شیب بالادست سرریزهای کرامپ، ضریب آبگذری کاهش می‌یابد و با افزایش شیب پایین دست سرریزهای کرامپ، این مقدار افزایش می‌یابد [7]. حسین (۲۰۱۴)، به بررسی تأثیر ارتفاع و زبری سطح سرریز کرامپ پرداخت. ایشان دریافتند که با افزایش زبری و ارتفاع آن در سرریزهای کرامپ، ضریب آبگذری به شدت کاهش می‌یابد [8]. صدرآبادی و همکاران (۱۳۹۵)، به بررسی مدل‌سازی عددی در حالت جریان آزاد روی سرریزهای کرامپ پرداختند. ایشان شش سرریز با سه دانه‌بندی مختلف را مورد بررسی قرار دادند و دریافتند که با افزایش قطر ذرات، ضریب آبگذری و همچنین اتلاف انرژی افزایش می‌یابد. ایشان همچنین دریافتند که با افزایش زوایای جانبی سرریزهای کرامپ، ضریب آبگذری کاهش می‌یابد [9]. کاردان و ساعد (۱۳۹۶)، با استفاده از Flow3D دریافتند که با افزایش ارتفاع سرریز کرامپ، ضریب آبگذری کاهش می‌یابد [10]. شاکر و همکاران (۲۰۱۷)، با بررسی آزمایشگاهی روی سرریزهای کرامپ تحت شرایط متفاوت آزاد و مستغرق دریافتند که با کاهش ارتفاع سرریزهای کرامپ، ضریب آبگذری افزایش می‌یابد [11]. همچنین افرادی مانند سلماسی و همکاران (۲۰۱۲)، خطیبی و همکاران (۲۰۱۴)، ستاری و همکاران (۲۰۱۶) و (۲۰۱۷)، رودریگز و همکاران (۲۰۱۸)، یاکوبو و عبداللهی (۲۰۱۸)، ایاز و طالب (۲۰۱۸) و براکینی و همکاران (۲۰۱۹)، سلماسی و همکاران (۲۰۲۱)، بیابانی و همکاران (۲۰۲۲)، مطالعاتی روی ضریب آبگذری سرریزهای کرامپ و سرریزهای مشابه انجام دادند [12-22]. مروری بر تحقیقات قبلی نشان می‌دهد که پژوهشگران کمی به اتلاف انرژی در سرریزهای کرامپ پرداخته‌اند. همچنین اتلاف انرژی در حالت‌های جریان آزاد و مستغرق روی سرریزهای کرامپ مورد بررسی قرار نگرفته است. یکی از حالت‌هایی که می‌تواند افزایش اتلاف انرژی به همراه داشته باشد، وجود موانع روی شیب پایین دست سرریزهای کرامپ است. برای درک بهتر این موارد، در این تحقیق از سرریزهای کرامپ با ارتفاع و شیب بالادست و پایین دست متفاوت استفاده شد.

همچنین به دلیل عمق کافی جریان روی لبه سرریز (بیشتر از ۰/۰۳ متر) از اثر کشش سطحی و عدد وبر ($We = \frac{\rho h_t V_1^2}{\sigma}$) صرف نظر شده است (نواک و همکاران ۱۹۸۱) [23,24]. همچنین برای راحتی کار دو پارامتر α و β را باهم ترکیب

$$E_L = f\left(\frac{h_t}{P}, Re, we, \alpha, \beta\right) \quad (5)$$

کرده و با این تفاسیر، اتلاف انرژی در سرریزهای کرامپ را می توان تابع پارامترهای رابطه ی (۶) دانست.

$$E_L = f\left(\frac{h_t}{P}, \frac{\alpha}{\beta}\right) \quad (6)$$

شکل ۱. نمایی از جریان روی سرریز کرامپ

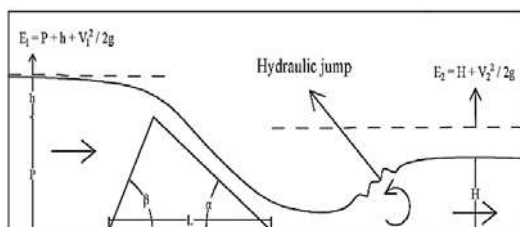


Fig. 1. Flow over crump weir

۳. مواد و روش ها

آزمایش ها در یک فلوم به طول ۱۰ متر، عرض ۰/۶ متر و ارتفاع ۱/۲ متر انجام شد. جریان از یک مخزن استخری و به وسیله ی پمپ تأمین می شود. جریان توسط آرام کننده های جریان آرام شده و پس از طی ۶ متر، به سرریز می رسد. برای ارزیابی اثر شیب و ارتفاع سرریز از سه مدل سرریز با ارتفاع ۰/۱۵ متر و یک سرریز با ارتفاع ۰/۲ متر و با شیب های متفاوت در بالادست و پایین دست سرریز استفاده شد. جدول (۱)، معرف مشخصات هندسی سرریزهای استفاده شده در تحقیق حاضر است که در آن ارتفاع سرریز، L طول جانبی سرریز، N تعداد بلوک، α زاویه ی پایین دست سرریز و β زاویه ی بالادست سرریز است. دبی های مورد استفاده ۰/۰۳، ۰/۰۴، ۰/۰۴۵ و ۰/۰۵ متر مکعب بر ثانیه هستند. با تنظیم دور موتور مناسب برای پمپ، میزان دبی وارد فلوم آزمایشگاهی شده و با سنسورهای نصب شده در بالای فلوم، عمق آب برداشت می شد. سنسور اول بالای تاج سرریز نصب

همچنین وجود بلوک (بافل) و حالت های آزاد و مستغرق جریان برای تخمین اتلاف انرژی مورد بررسی قرار گرفتند.

۲. تحلیل ابعادی

شکل (۱)، جریان از روی سرریز کرامپ و پارامترهای آن را نشان می دهد. با توجه به این شکل مقدار انرژی در بالادست و پایین دست سرریز کرامپ را می توان از روابط (۱) و (۲) و همچنین میزان اتلاف انرژی را از رابطه ی (۳)، محاسبه کرد. در روابط زیر h عمق جریان در بالادست سرریز، H عمق پایاب، P ارتفاع سرریز، g شتاب ثقل، V_1 سرعت متوسط جریان در بالادست سرریز، V_2 سرعت متوسط جریان در پایین دست سرریز، E_L اتلاف انرژی، E_1 انرژی مخصوص در بالادست سرریز و E_2 انرژی مخصوص در پایین دست سرریز هستند. سرعت متوسط جریان در بالادست سرریز، با داشتن منحنی دبی-ارتفاع جریان محاسبه شد. همچنین با توجه به معادله پیوستگی و عمق جریان در پایین دست سرریز، سرعت متوسط جریان در پایین دست سرریز نیز محاسبه شد.

$$E_1 = P + h + \frac{V_1^2}{2g} = P + h_t \quad (1)$$

$$E_2 = H + \frac{V_2^2}{2g} \quad (2)$$

$$E_L = \frac{E_1 - E_2}{E_1} \quad (3)$$

پارامترهای موثر بر اتلاف انرژی (E_L) در سرریزهای کرامپ را می توان به صورت تابع زیر نوشت:

$$E_L = f(\rho, V_1, \mu, \sigma, h_t, P, \alpha, \beta) \quad (4)$$

ρ چگالی آب، μ لزجت دینامیکی، σ ضریب کشش سطحی، h_t عمق جریان در بالادست سرریز به علاوه ارتفاع مانند انرژی جنبشی، P ارتفاع سرریز، α شیب پایین دست سرریز و β شیب بالادست سرریز هستند. با در نظر گرفتن سه متغیر تکراری چگالی آب، سرعت متوسط جریان و عمق آب در بالادست سرریز به علاوه انرژی جنبشی و با استفاده از تئوری پی باکینگهام، اتلاف انرژی تابع اعداد بدون بعد زیر می شود.

به دلیل آشفتگی زیاد جریان، عدد رینولدز ($Re = \frac{\rho h_t V_1}{\mu} \geq 4000$) قابل صرف نظر کردن است (سامر و فردسو، ۱۹۹۱) و

معرف مشخصات هیدرولیکی جریان و محاسبه میزان اتلاف انرژی در حالت جریان آزاد، مستغرق و جریان آزاد با استفاده از بافل در شیب خروجی در چهار سرریز مورد بررسی در این تحقیق است.

جدول ۱. مشخصات هندسی سرریزها

β (degree)	α (degree)	N	L (m)	P (m)	Type
60	30	۲۸	0.35	0.15	A
45	45	۲۱	0.30	0.15	B
90	30	۲۸	0.25	0.15	C
30	60	۲۸	0.40	0.20	D

Table 1. Geometric characteristics of weirs

شکل ۳. مشخصات سرریز بافل‌دار

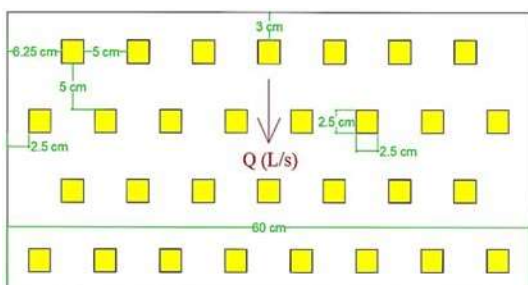


Fig. 3. Characteristics of baffled weir

جدول ۲. مشخصات آزمایش‌های انجام شده

Type	Q (m³/s)	h (m) free	H (m) submerged	E _L free	E _L submerged	E _L Free & baffle
1	2	3	4	5	6	7
A	0.03	0.213	0.214	0.54	0.20	0.73
A	0.035	0.224	0.225	0.45	0.15	0.62
A	0.04	0.234	0.235	0.37	0.10	0.54
A	0.045	0.244	0.245	0.20	0.06	0.35
A	0.05	0.253	0.254	0.06	0.03	0.21
B	0.03	0.216	0.217	0.56	0.25	0.57
B	0.035	0.227	0.228	0.50	0.18	0.50
B	0.04	0.237	0.238	0.41	0.14	0.42
B	0.045	0.247	0.248	0.23	0.09	0.38
B	0.05	0.256	0.257	0.10	0.06	0.27
C	0.03	0.220	0.221	0.57	0.29	0.80
C	0.035	0.232	0.233	0.52	0.22	0.70
C	0.04	0.243	0.244	0.43	0.19	0.63
C	0.045	0.253	0.254	0.31	0.13	0.57
C	0.05	0.262	0.263	0.15	0.10	0.36
D	0.03	0.256	0.257	0.51	0.36	0.70
D	0.035	0.266	0.267	0.40	0.29	0.61
D	0.04	0.276	0.277	0.28	0.26	0.53
D	0.045	0.286	0.287	0.21	0.15	0.34
D	0.05	0.295	0.296	0.18	0.02	0.23

Table 2. Specifications of the performed experiments

شده است تا عمق روی سرریز را برداشت کند. همچنین سنسور دوم عمق پایاب و سنسور سوم عمق بالادست سرریز را برداشت می‌کند. شکل (۲)، محل نصب سرریز کرامپ، فلوم آزمایشگاهی و سنسورها را نشان می‌دهد. همچنین عمق جریان در بالادست و پایین‌دست سرریز به ترتیب در فاصله چهار برابر عمق آب روی تاج سرریز و در فاصله ده برابر ارتفاع سرریز اندازه‌گیری و با استفاده از روابط (۱، ۲ و ۳)، میزان اتلاف انرژی محاسبه شدند. تمام آزمایش‌ها با جریان‌های آزاد و مستغرق بررسی شدند. توسط دریچه انتهایی فلوم آزمایشگاهی، برای حالت جریان مستغرق عمق پایاب به صورت مصنوعی، تنظیم شد و تا حدی بود که ارتفاع جریان در بالادست سرریز، تا یک میلی‌متر تغییر یافت. همچنین از سرریزهای بافل‌دار برای بررسی میزان اتلاف انرژی در حالت جریان آزاد استفاده شد (شکل ۳). مطابق جدول (۲) و با توجه به اینکه وجود بافل‌ها، تغییری بر جریان بالادست و میزان آبگذری به جای نگذارند، اولین ردیف بافل‌ها ۰/۰۳ متری از تاج سرریز قرار گرفتند. در سرریز اول و سوم ($P=0/15\text{ m}$, $\alpha=30$)، از تعداد ۴ ردیف بلوک به ابعاد $0/025 \times 0/025 \times 0/025$ متر استفاده شد.

شکل ۲. نمایی از فلوم آزمایشگاهی

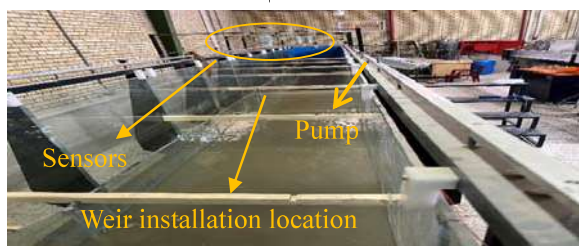


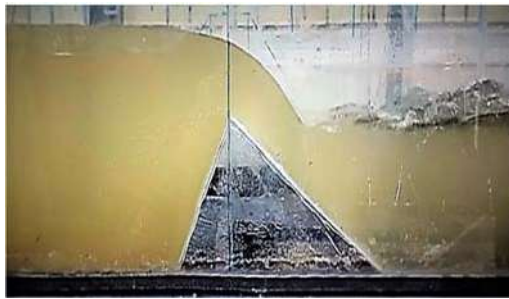
Fig. 2. A view of the experimental flume

همچنین در سرریز چهارم ($P=0/2\text{ m}$, $\alpha=45$) از ۴ ردیف بلوک با مشخصات بالا استفاده شد. در سرریز دوم ($P=0/15\text{ m}$, $\alpha=45$) به دلیل محدودیت‌های هندسی در طول شیب‌دار سرریز، از ۳ ردیف بلوک با مشخصات بالا استفاده شد. بافل‌ها، با توجه به سرریزهای مجهز به بارشکن (سرریز کانکولی در آمریکا) و همچنین با توجه به هندسه محدود کرامپ‌ها به صورت زیگزاکی، طراحی شدند. جدول (۲).

شکل ۴. جریان عبوری از روی سرریز کرامپ در حالت جریان آزاد و مستغرق



الف



ب

Fig. 4. Flow passing over the crump weir in free and submerged state

شکل ۵. محل پرش هیدرولیکی

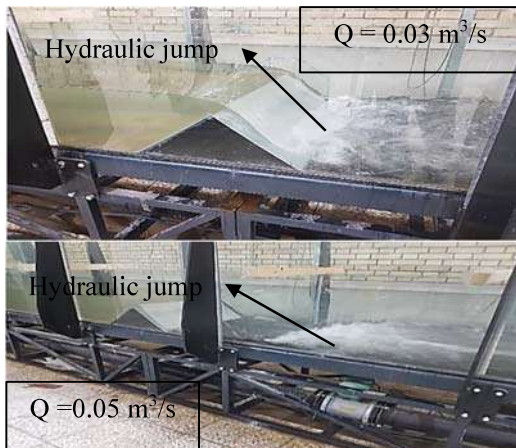


Fig. 5. Hydraulic jump place

شکل (۶)، تأثیر دبی در واحد عرض را نسبت به انرژی در پایین دست سرریز و بالادست سرریز (E_p) در حالت جریان آزاد نشان می دهد. همان طور که از شکل پیدا است، با افزایش دبی در واحد عرض و افزایش عمق جریان در بالادست سرریز، سرعت جریان و انرژی در پایین دست نیز افزایش بیشتری می یابد و همین امر باعث شده تا نمودارها روند

ستون سوم و چهارم، به ترتیب عمق جریان در بالادست سرریز در حالت جریان آزاد و مستغرق هستند. ستون های ۵، ۶ و ۷، به ترتیب میزان اتلاف انرژی در حالت جریان آزاد، جریان مستغرق و در حالت وجود بافل هستند.

۴. نتایج و بحث

شکل (۴-الف)، جریان عبوری از سرریز کرامپ در حالت جریان آزاد و شکل (۴-ب)، جریان عبوری از سرریز کرامپ در حالت مستغرق را نشان می دهد. همان طور که از شکل پیدا است، جریان به صورت جت مایل از روی سرریز به پایین دست منتقل می شود. همچنین در حالت جریان آزاد و بدون بلوک، پرش هیدرولیکی نسبتاً قوی مشاهده شد که با افزایش دبی، پرش هیدرولیکی به پایین دست منتقل می شد (شکل ۵). همچنین در سرریزهای با شیب کمتر بستر خروجی، پرش هیدرولیکی جابه جا شده و به پایین دست منتقل می شود. در سرریزهای با زاویه ی بیشتر در پایین دست سرریزهای کرامپ، پرش هیدرولیکی به پنجه ی سرریز نزدیکتر شده و از قدرت آن کاسته می شود. زاویه بیشتر در بالادست سرریز، باعث افزایش عمق جریان و در نهایت باعث افزایش اتلاف انرژی می شود. جریان روی سرریزهای بافل دار آرام تر شده و با شدت کمتری وارد پایین دست می شود. در دبی های کمتر، بافل ها مانند تیغه های جداکننده، جریان را به اطراف سوق می دهند؛ اما در دبی های بیشتر، بافل ها به زیر جریان رفته و حالت مستغرق به خود می گیرند. انحراف جریان توسط بافل ها در دبی های کمتر، باعث برخورد جریان از دو بافل کناری شده و گردابه هایی را تشکیل می دهند. برخورد این گردابه ها به ردیف بعدی بافل ها، دومرتبه باعث انحراف جریان و کاهش سرعت آن می شوند. این عمل تا ردیف انتهایی بافل ها ادامه دارد و در نهایت باعث کاهش سرعت و افزایش اتلاف انرژی شوند. در دبی های بیشتر، لایه های زیرین جریان توسط بافل ها جدا شده و باعث افزایش اتلاف انرژی می شوند. همچنین در حالت جریان مستغرق گردابه هایی با قدرت کم روی سطح جریان ایجاد شده که قابل مشاهده در شکل (۴-ب) هستند.

می‌یابد. شکل (۷-الف) و (۷-ب)، تأثیر پارامترهای ذکر شده را بر اتلاف انرژی در حالت جریان آزاد نشان می‌دهند. همان‌طور که از شکل‌ها پیدا است، در سرریز با ارتفاع بیشتر، اتلاف انرژی به مراتب کمتر است و در سرریزهای با زاویه پایین‌دست کمتر، مقدار اتلاف انرژی بیشتر است. مقدار میانگین اتلاف انرژی در حالت جریان آزاد و بدون وجود بافل، در سرریزهای نوع A، B، C و D به ترتیب برابر ۳۳/۲۹ درصد، ۳۳/۸۳ درصد، ۳۹/۷۷ درصد و ۲۷/۳۲ درصد است. همچنین رابطه‌ای (۷) برای محاسبه اتلاف انرژی در حالت جریان آزاد برای سرریزهای کرامپ ارائه شده است. در رابطه، ضریب K_f بستگی به مقدار شیب بالادست و پایین‌دست سرریز دارد که توسط رابطه (۸) قابل محاسبه است و ضریب K برابر یک در نظر گرفته می‌شود. همچنین در شکل (۷-ب)، میانگینی برای میزان اتلاف انرژی‌ها ترسیم شد. همان‌طور که مشخص است، کمترین مقدار میانگین اتلاف انرژی در سرریز با نسبت $\frac{\alpha}{\beta}$ برابر ۰/۵ مشاهده شد.

$$E_L = \left(-4.113 K_f \left(\frac{h_t}{P} \right)^2 \right) + 3.05K \frac{h_t}{P} \quad (7)$$

$$K_f = 0.208 \left(\frac{\alpha}{\beta} \right)^2 - 0.2 \frac{\alpha}{\beta} + 0.9858 \quad (8)$$

شکل (۸)، مقدار اتلاف انرژی مشاهده شده را بر حسب مقدار اتلاف انرژی محاسبه شده نشان می‌دهد. مقادیر با ضریب همبستگی ۹۵/۶۹ درصد و با خطای قابل قبولی، مورد پذیرش هستند.

شکل ۸ مقایسه مقادیر محاسبه شده و مشاهده شده در اتلاف انرژی

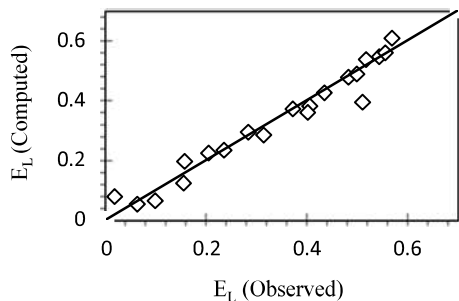


Fig. 8. Computed versus observed results at energy loss

صعودی را نشان بدهند. این روند در سرریز با ارتفاع ۰/۲۰ متر بیشتر است؛ زیرا اتلاف انرژی در آن کمتر است.

شکل ۶. افت انرژی نسبت به دبی در واحد عرض

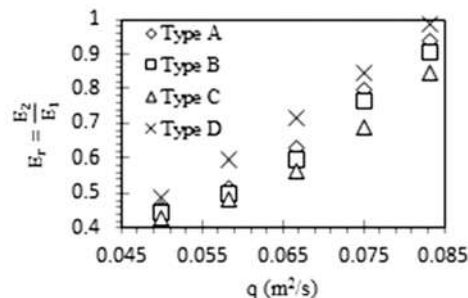
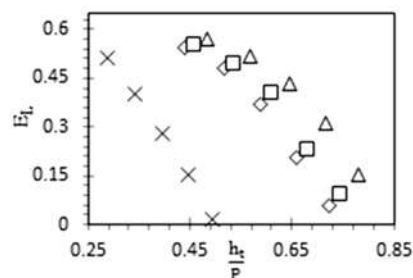


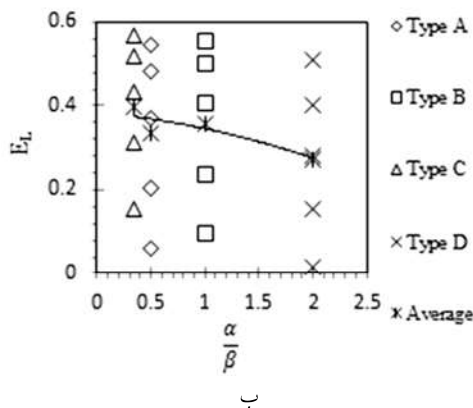
Fig. 6. Energy loss in relation to the flow rate per unit width

شکل ۷. تأثیر پارامترهای $\frac{\alpha}{\beta}$ و $\frac{h_t}{P}$ بر اتلاف انرژی در سرریزهای کرامپ در حالت آزاد



◆ Type A □ Type B ▲ Type C × Type D

الف



ب

Fig. 7. The effect of parameters $\frac{h_t}{P}$ and $\frac{\alpha}{\beta}$ on the Energy loss of crump weirs in a free state

یکی از پارامترهایی که بر اتلاف انرژی تأثیرگذار است، نسبت عمق جریان به علاوه‌ی انرژی جنبشی در بالادست سرریز به ارتفاع سرریز است. با افزایش این نسبت، اتلاف انرژی کاهش

شکل (۹- الف و ب)، میزان اتلاف انرژی را بر حسب پارامترهای بدون بعد $\frac{h_t}{p}$ و $\frac{\alpha}{\beta}$ در حالت جریان مستغرق نشان می‌دهند. همانطور که از شکل پیدا است، بر خلاف جریان آزاد، با افزایش ارتفاع سرریز میزان اتلاف انرژی افزایش می‌یابد. با افزایش عمق جریان به‌علاوه‌ی انرژی جنبشی در بالادست سرریز و به دنبال افزایش سرعت و دبی جریان، اتلاف انرژی کاهش می‌یابد. شکل (۱۰- الف و ب)، میزان اتلاف انرژی را بر حسب پارامترهای بدون بعد $\frac{h_t}{p}$ و $\frac{\alpha}{\beta}$ در حالت جریان آزاد با وجود بافل‌ها نشان می‌دهند. همانطور که از شکل‌ها پیدا است، وجود بافل باعث افزایش اتلاف انرژی می‌گردد. به دلیل اینکه جریان روی شیب پایین‌دست سرریز به‌صورت فوق بحرانی است؛ پس از بالادست خود تأثیر پذیرفته و ضریب آبگذری را کاهش یا افزایش نمی‌دهد (جدول ۲).

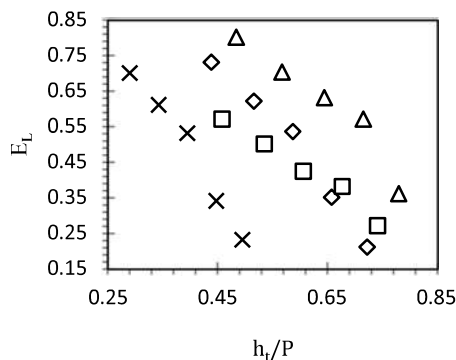
شکل ۹. تأثیر پارامترهای $\frac{h_t}{p}$ و $\frac{\alpha}{\beta}$ بر اتلاف انرژی در سرریزهای کرامپ در حالت مستغرق

محاسبه اتلاف انرژی در حالت مستغرق از رابطه (۹) پیروی می‌کند. در رابطه (۹)، ضریب K تابعی از نسبت زاویه پایین‌دست به بالادست سرریز است که در سرریز با نسبت $\frac{\alpha}{\beta} = 2$ این ضریب برابر $\frac{2}{3}$ و در مابقی سرریزها برابر ۱ است. همچنین رابطه (۱۰) برای محاسبه ضریب K_s ارائه شده است. محاسبه اتلاف انرژی در حالت آزاد همراه با بافل نیز از رابطه‌ی (۱۱) پیروی کرده و رابطه (۱۲) برای محاسبه ضریب K_b ارائه شده است. در رابطه (۱۱)، ضریب K تابعی از نسبت زاویه پایین‌دست به بالادست سرریز است که در سرریز با نسبت $\frac{\alpha}{\beta} = 2$ این ضریب برابر $\frac{1}{36}$ و در مابقی سرریزها برابر ۱ است. همچنین در شکل (۹-ب)، میانگینی برای میزان اتلاف انرژی‌ها ترسیم شد. همانطور که مشخص است، کمترین مقدار میانگین اتلاف انرژی در سرریز با نسبت $\frac{\alpha}{\beta}$ و در حالت جریان مستغرق، مانند حالت جریان آزاد، برابر $\frac{1}{5}$ مشاهده شد.

$$E_L = \left(-1.308 K_s \left(\frac{h_t}{p} \right)^2 \right) + 0.975 K \frac{h_t}{p} \quad (9)$$

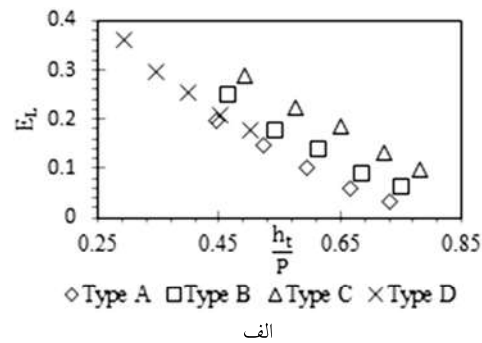
$$K_s = 1.139 \left(\frac{\alpha}{\beta} \right)^2 - 1.421 \frac{\alpha}{\beta} + 1.277 \quad (10)$$

شکل ۱۰. تأثیر پارامترهای $\frac{h_t}{p}$ و $\frac{\alpha}{\beta}$ بر اتلاف انرژی در سرریزهای کرامپ در حالت آزاد بافل‌دار

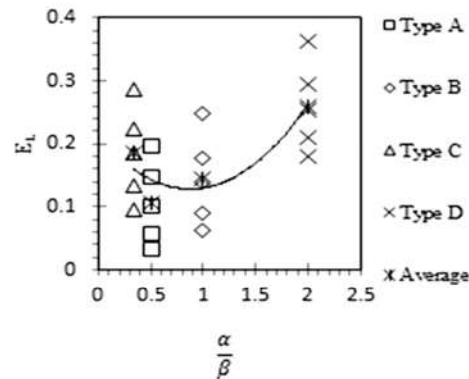


◆ Type A □ Type B ▲ Type C × Type D

الف



الف



ب

Fig. 9. The effect of parameters $\frac{h_t}{p}$ and $\frac{\alpha}{\beta}$ on the Energy loss of crump weirs in a submerged state

شکل ۱۱. مقایسه‌ی مقادیر محاسبه شده و مشاهده شده اتلاف انرژی

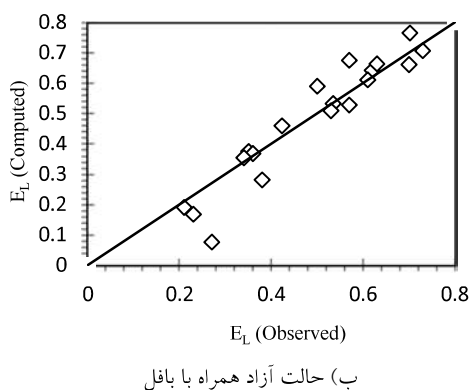
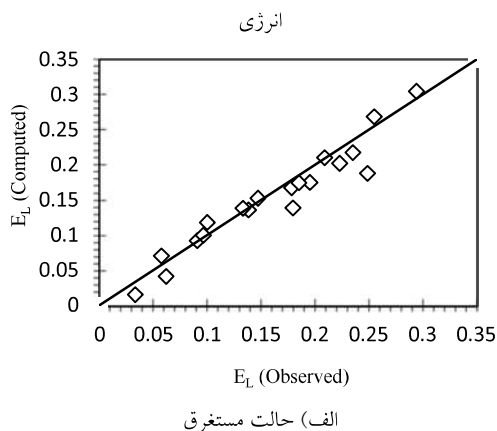


Fig.11. Computed versus observed results at energy loss

با توجه به شکل (۱۲)، مقدار میانگین اتلاف انرژی در حالت جریان آزاد و با وجود بافل، در سرریزهای نوع A، B، C و D به ترتیب برابر ۴۸/۹ درصد، ۴۲/۸۶ درصد، ۶۱/۲۴ درصد و ۴۸/۲ درصد است. در سرریزهای ذکر شده و به ترتیب مقدار اتلاف انرژی در حالت جریان آزاد با وجود بافل، ۳۱/۹۳، ۱۶/۳۹، ۳۵/۰۶ و ۴۳/۳۱ درصد بیشتر از مقدار اتلاف انرژی در سرریز بدون بافل با جریان آزاد است. همچنین مقدار اتلاف انرژی در سرریزهای ذکر شده در حالت جریان مستغرق به ترتیب ۱۰/۶۷، ۱۴/۳۷، ۱۸/۵ و ۲۶/۰۳ درصد هستند. به طور میانگین اتلاف انرژی در سرریزهای کرامپ مورد بررسی در این تحقیق و در حالت‌های جریان آزاد، مستغرق و جریان آزاد همراه با بافل برابر ۳۴/۰۵، ۱۷/۳۹ و ۵۰/۳ درصد محاسبه گردید.

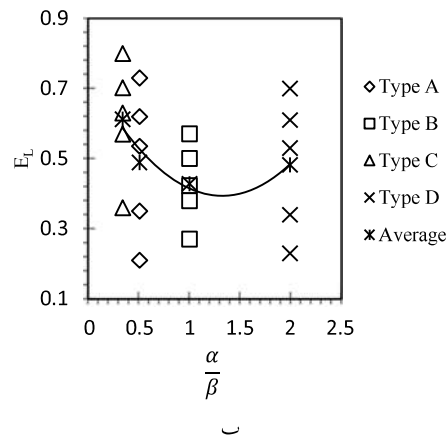


Fig. 10. The effect of parameters $\frac{h_t}{p}$ and $\frac{\alpha}{\beta}$ on the Energy loss of crump weirs in a free and baffled state

$$E_L = \left(-4.7254 K_b \left(\frac{h_t}{P} \right)^2 \right) + 3.682K \frac{h_t}{P} \quad (11)$$

$$K_b = 0.4631 \left(\frac{\alpha}{\beta} \right)^2 - 0.442 \frac{\alpha}{\beta} + 1.028 \quad (12)$$

شکل (۱۱-الف)، اتلاف انرژی محاسبه شده از روابط (۹) و (۱۰) را نسبت به اتلاف انرژی مشاهده شده در سرریزهای کرامپ در حالت مستغرق و شکل (۱۱-ب)، اتلاف انرژی محاسبه شده از روابط (۱۱) و (۱۲) را نسبت به اتلاف انرژی مشاهده شده در سرریزهای کرامپ در حالت جریان آزاد و همراه با بافل نشان می‌دهند. همانطور که از شکل‌ها پیدا است، با تقریب قابل قبولی، روابط مورد پذیرش هستند. همچنین در شکل (۱۰-ب)، میانگینی برای میزان اتلاف انرژی‌ها ترسیم شد. همانطور که مشخص است، کمترین مقدار میانگین اتلاف انرژی در سرریز با نسبت $\frac{\alpha}{\beta}$ و در حالت جریان آزاد همراه با بافل، مانند حالت جریان آزاد و مستغرق نیست و در حالت برابر ۱ مشاهده شد. در حالت زاویه‌های بالادست و پایین‌دست سرریز برابر ۴۵ درجه، کمترین مقدار انرژی مشاهده شد.

خطی بودن سرریز، نسبت کمتر h_t/P و ریزش جریان از کلیدهای ورودی و ایجاد گردابه باشد. همچنین میانگین اتلاف انرژی در سرریزهای کرامپ بافل‌دار تقریباً و با خطای ۰/۰۲۵ درصد برابر با میزان اتلاف انرژی در سرریز کلیدپیانویی بدون پله است.

۵. نتیجه‌گیری

- با افزایش نسبت عمق جریان به‌علاوه ارتفاع مانند انرژی جنبشی به ارتفاع سرریز، مقدار اتلاف انرژی کاهش می‌یابد.
- میانگین مقدار اتلاف انرژی در حالت جریان آزاد با وجود بافل حدود ۳۱/۷ درصد، بیشتر از میانگین مقدار اتلاف انرژی در حالت جریان آزاد و بدون بافل است.

- میانگین مقدار اتلاف انرژی در حالت جریان مستغرق حدود ۴۸/۲ درصد، کمتر از میانگین مقدار اتلاف انرژی در حالت جریان آزاد است.

- در حالت جریان مستغرق و در خلاف جریان آزاد، با افزایش نسبت زاویه پایین‌دست سرریز به زاویه بالادست آن، اتلاف انرژی افزایش می‌یابد.

- مقدار اتلاف انرژی در حالت جریان آزاد در سرریزهای نوع A، B، C و D به‌ترتیب برابر ۳۳/۲۹، ۳۳/۸۳، ۳۹/۷۷ و ۲۷/۳۲ درصد است.

- در حالت جریان آزاد، مستغرق و در حالت جریان آزاد با وجود بافل به‌ترتیب کمترین میزان اتلاف انرژی در نسبت‌های $\frac{\alpha}{\beta}$ برابر ۰/۵، ۰/۵ و ۱ مشاهده شد.

- روابطی برای محاسبه مقدار اتلاف انرژی در سرریزهای کرامپ ارائه شد که دارای ضرایب همبستگی قابل قبولی هستند.

۶. مراجع

[1]. Chanson, H., (1994). Hydraulics of nappe flow regime above stepped chutes and spillways. Australian Civil/Structural Engineering Transactions, (1), pp.69-76.

شکل ۱۲. مقایسه اتلاف انرژی در حالت‌های جریان آزاد، مستغرق

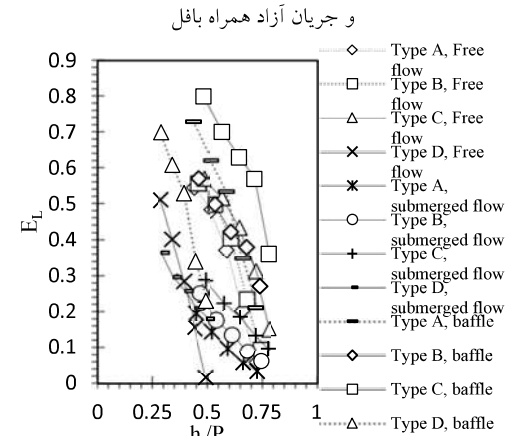


Fig. 12. Comparison of energy loss in free flow, submerged and free flow modes with baffle

شکل ۱۳. مقایسه اتلاف انرژی در سرریزهای کرامپ و کلیدپیانویی

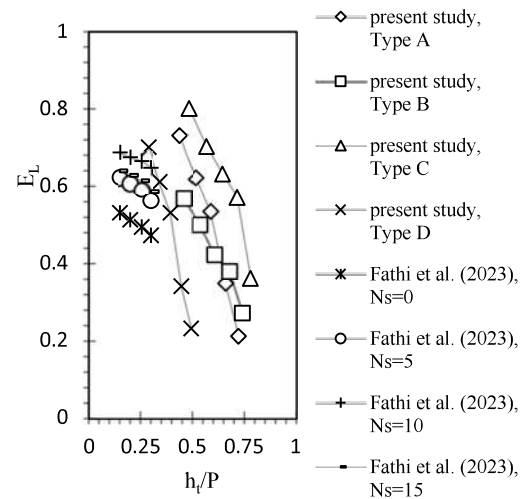


Fig. 13. Comparison of energy loss in crump and piano key weirs

در شکل (۱۳)، از داده‌های آزمایشگاهی فنجی و همکاران (۲۰۲۳)، استفاده شده است. ایشان آزمایش‌های خود را روی سرریز غیر خطی کلیدپیانویی انجام دادند. ایشان از تعداد متفاوت پله (N_s) در کلیدهای خروجی سرریز استفاده کردند و دریافتند که وجود پله باعث اتلاف انرژی بیشتر می‌شود. در مقایسه با سرریز کرامپ بافل‌دار، نتیجه این است که اتلاف انرژی در آن کمتر از اتلاف انرژی در سرریز کلیدپیانویی پله‌ای است. دلیل آن می‌تواند تعداد اغتشاش بیشتر جریان در کلیدهای خروجی و در جلوی پنجه سرریز کلیدپیانویی، ثابت نبودن دبی واحد عرض در طول کلیدهای خروجی، غیر

- [15]. Sattari, M., Salmasi, F. and Torkaman, G., (2016). Performance Evaluation of ANFIS and M5 Tree Models in Crump Weir Discharge Coefficient Modeling. *Experimental Research in Civil Engineering*, 3(5), pp.51-61 (In Iranian).
- [16]. Sattari, M.T., Salmasi, F. and Hajimohammadi, A., (2017). Modeling Crump Weir Discharge Coefficient Using Machine Learning Methods. *Water and Soil Science*, 26(4.2), pp.1-12 (In Iranian).
- [17]. Rodriguez, J., Bayat, S., Vahidi, E., Saco, P.M. and Almeida, A. (2018) "Combining local 3-D flow information with unsteady fractional sediment transport to assess Pool-Riffle Self-Maintenance", 37th IAHR World Congress At: Kuala Lumpur, Malaysia
- [18]. Yakubu S. Kh. and Abdullahi, U. (2018) "Evaluation of Unsteady Open Channel Flow Characteristics over Crump Weir", *Journal of Science, Technology & Education (JOSTE)*; Vol. 6 (4), December, 2018.
- [19]. Ayaz, M.D., and Talib, M. (2018) "Discharge Coefficient of oblique sharp crested weir for free and submerged flow using trained ANN model", *Water Science*, Vol. 32, No.2, pp. 192-212.
- [20]. Brakeni A., Filippov, EG., Meridja M. (2019) "Flow through Crump weir ecoulement a travers le deversoir de crump, Larhyss" *Journal*, ISSN 1112-3680, n°38, Juin 2019, pp. 93-102
- [21]. Salmasi, F., Sabahi, N. and Abraham, J., (2021). Discharge coefficients for rectangular broad-crested gabion weirs: experimental study. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 147(3), p.04021001.
- [22]. Biabani, R., Salmasi, F., Nouri, M. and Abraham, J., (2022). Flow over embankment gabion weirs in free flow conditions. *Journal of Hydro-Environment Research*, 44, pp.65-76.
- [23]. Sumer, B.M. and Fredsoe, J., (1991), August. Onset of scour below a pipeline exposed to waves. In *The First International Offshore and Polar Engineering Conference*. OnePetro.
- [24]. Novák, P. and Čabelka, J., (1981). Models in hydraulic engineering: Physical principles and design applications. *Monographs & surveys in water resources engineering*.
- [25]. Fathi, A., Abdi Chooplou, Ch. and Ghodsian, M.G., (2023). An Experimental Study of Flow Energy Loss in Trapezoidal Stepped Piano Key Weirs (PKWs). *Modares Civil Engineering journal*, 23(4), pp.0-0. DOI: 10.22034/23.4.163.
- [2]. Keller, R. J. (1993). "Sloping crest crump weir, *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*", 115, 2, 1-11.
- [3]. Habibi, M. and Khosrowjerdi, A. (1387). A multiplicative investigation of the Crump spillway and its comparison with the Uji spillway using FLUENT software, the third water resources management conference, Tabriz University, Tabriz, October 23-25 (In Iranian).
- [4]. Hajipour, Q.G., Salmasi, F., Farsadzadeh, D., Abbaspour, A. (2008) Investigating the flow characteristics in overflow with physical model and cfd, Thesis, Ministry of Science, Research and Technology, Tabriz University, Faculty of Agriculture (In Iranian).
- [5]. Longo, S. (2010) "Experiments on turbulence beneath a free surface in a stationary field generated by a Crump weir: turbulence structure and correlation with the free surface", *Experiments in Fluids* volume 50, pages201–215 (2011)
- [6]. Kumara, S., Ahmada, Z., Mansoor, T. (2011) "A new approach to improve the discharging capacity of sharp-crested triangular plan form weirs", *Flow Measurement and Instrumentation* 22, 175–180.
- [7]. Azimi, A. H. Rajaratnam, N. Zhu, D. Z. (2011). "Discharge characteristics of weirs of finite crest length with upstream and downstream ramps", *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 139, 1.
- [8]. Hussien, N.J. (2014) "Experimental Study of Height and Surface Roughness Effects of Crump Weirs on Over Flow Characteristics" *Journal of Babylon University, Engineering Sciences*, No. (4), Vol. (22)
- [9]. Sadrabadi, M., Fathi Moghadam, M. and Mohammadpour, R. "Numerical modeling of free flow in gabion weirs", *biannual specialized journal of water science and engineering*, Islamic Azad University, Ahvaz branch, 6th year, 14th issue, summer and autumn (2015) (In Iranian).
- [10]. Kardan, N. and Saed, S.A. (2016) Investigating the effect of overflow height and flow depth on the discharge coefficient of the flow passing over the Crump spillway using the Flow3D software model, the 5th International Congress on Civil Engineering, Architecture and Urban Development (Iranian).
- [11]. Shaker, Z., Al-jumaily, M.A., Al-Shukur, A.H. (2017), "Experimental Investigation of Flow Characteristics over Crump Weir with Different Conditions", *Saudi Journal of Engineering and Technology*, 373-379.
- [12]. Salmasi, F., Sattari, M.T. and Pal, M., (2012). Application of data mining on evaluation of energy dissipation over low gabion-stepped weir. *Turkish Journal of Agriculture and Forestry*, 36(1), pp.95-106.
- [13]. Salmasi, F., Chamani, M.R. and FARSADI, Z.D., (2012). Experimental study of energy dissipation over stepped gabion spillways with low heights.
- [14]. Khatibi, R., Salmasi, F., Ghorbani, M.A. and Asadi, H., (2014). Modelling energy dissipation over stepped-gabion weirs by artificial intelligence. *Water resources management*, 28, pp.1807-1821.

Experimental investigation of Energy loss in Crump spillways in free flow and submerged state

Mohammadhasan hashemi fesharaki ¹, Ali khoshfetrat ^{2*}, Elham izadinia ³, Ehsan delavari ⁴

1. Ph.D. student, Department of Civil Engineering, Najafabad Branch, Islamic Azad University, Najafabad, Iran.
2. Assistant Professor, Civil Engineering Department, Isfahan (Khorasgan) Branch, Islamic Azad University, Isfahan, Iran.
3. Assistant Professor, Engineering College, Department of Civil Engineering, Shahid Ashrafi Esfahani University, Isfahan, Iran.
4. Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Najafabad Branch, Islamic Azad University, Najafabad, Iran.

* khoshfetrat@khuif.ac.ir

Abstract:

Dams and weirs are hydraulic structures used to control and manage water flow. Dams are long-term water storage solutions. In general, it is important to increase the discharge coefficient, and energy loss, and reduce scour downstream of dams, hydraulic structures, and weirs. Weirs are part of hydraulic structures that allow more flow to pass over them during floods. Crump spillways are a type of weir designed to improve and protect the body of dams and spillways by passing excess floodwater. One of the important factors to consider in the design of dams and weirs is the amount of energy dissipation. Energy dissipation is the process of reducing the energy of flowing water. Increasing energy loss prevents the flow rate and reduces scour, or prevents cracking and overturning of the crump weir. Many researchers have done valuable studies on the discharge coefficient of crump weirs, but few researchers have investigated the energy dissipation of crump weirs. Also, the energy dissipation in free flow and submerged states in Crump weirs has not been studied. One of the conditions that can lead to an increase in energy loss is the presence of obstacles on the downstream slope of crump spillways. To better understand these cases, this research used crump spillways with different heights and upstream and downstream slopes. The existence of the block (baffle) and the free and submerged states of the flow were also investigated to estimate energy losses. Experiments were carried out in a flume 10 meters long, 0.6 meters wide, and 1.2 meters high. The flow is supplied by a pool tank and a pump. The flow is calmed down by a flow conditioner and reaches the weir in 6 meters. To evaluate the effect of the slope and height of the spillway, three spillway models with a height of 0.15 meters and one spillway with a height of 0.2 meters and with different slopes upstream and downstream of the spillway were used. The flow rates are 0.03, 0.035, 0.04, 0.045, and 0.05 cubic meters per second. By setting the appropriate pump engine speed, the flow rate entered the laboratory flume through the tank, and the water depth was measured with sensors installed on the top of the flume. The results showed that energy loss decreases with increasing weir height. The amount of energy loss in the free flow state with a baffle is higher than the amount of energy loss in the free flow state without a baffle. The amount of energy loss in a submerged flow state is lower than the amount of energy loss in a free flow state. As the downstream angle of the weir decreases, energy loss increases. By reducing the upstream angle of the weir, energy loss is reduced. The amount of energy loss in the free flow state in type A, B, C, and D spillways is 33.29%, 33.83%, 39.77%, and 27.32%, respectively. A general relationship was presented to calculate the energy loss in crump weirs. This relationship includes a coefficient that is a function of free flow without a baffle, submerged flow, and free flow with a baffle.

Keywords: Baffle, Crump, Energy loss, Free flow, Submerged flow.