

مجله علمی - پژوهشی  
مهندسی عمران مدرس  
دوره ۲۴، شماره ۴، سال ۱۴۰۳  
صفحات ۹۵ تا ۱۰۲

## بررسی آزمایشگاهی اتلاف انرژی جریان در سرریزهای کنگره‌ای دوزنقه‌ای سینوسی

سهیل نعمت‌الهی<sup>۱</sup>، الهام ایزدینیا<sup>۲\*</sup>، علی خوش‌فطرت<sup>۳</sup>، احسان دلاوری<sup>۴</sup>

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

۲. استادیار گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه شهید اشرفی اصفهانی (ره)، اصفهان، ایران.

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

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

izadinia@ashrafi.ac.ir

پذیرش: [۱۴۰۲/۱۲/۰۹]

دریافت: [۱۴۰۲/۰۹/۲۱]

### چکیده

سرریزهای کنگره‌ای، جزء سرریزهای تاج‌طولانی هستند که راندمان دبی و ظرفیت انتقال آن‌ها بیشتر از سرریزهای خطی مشابه است. بررسی میزان اتلاف انرژی در این سرریزهای با راندمان بالا، بسیار مورد اهمیت برای مهندسان در سال‌های اخیر شده است. در این پژوهش، از چهار سرریز کنگره‌ای سینوسی شکل برای بررسی میزان اتلاف انرژی استفاده شد. سرریز اول دارای طول تاج ۱/۳ متر، سرریز دوم دارای طول تاج ۱/۵ متر، سرریز سوم دارای طول تاج ۱/۵۵ متر و سرریز چهارم دارای طول تاج ۱/۶ متر است. همچنین سرریز اول و دوم دارای ارتفاع ۰/۱۵ متر و نسبت عرض دهانه‌ی ورودی به خروجی ۶/۸۶ و سرریز سوم و چهارم دارای ارتفاع ۰/۱۸ متر و نسبت عرض دهانه‌ی ورودی به خروجی ۷/۶۷ است. نتایج چنین بود که با افزایش دبی جریان و یا افزایش عمق جریان در بالادست سرریز، اتلاف انرژی کاهش یافت. همچنین با افزایش طول موثر سرریزها، مقدار اتلاف انرژی افزایش می‌یابد. با افزایش نسبت عرض دهانه ورودی به عرض دهانه خروجی سرریز، میزان اتلاف انرژی افزایش یافت. میزان اتلاف انرژی در سرریز چهارم و سرریز سوم به ترتیب، بیشترین مقدار است. به طور میانگین و با افزایش ۲۰ درصدی ارتفاع سرریز، میزان اتلاف انرژی ۲۳/۲ درصد افزایش می‌یابد.

**واژگان کلیدی:** اتلاف انرژی، دهانه‌های ورودی و خروجی، سرریز کنگره‌ای، سینوسی، ضریب آب‌گذری.

### ۱. مقدمه

مخازن سدها استفاده می‌شوند. سرریزهای کنگره‌ای جزء

سرریزهای تاج‌طولانی هستند. این نوع سرریزها در یک عرض معین و محدود، طول تاج بیشتری نسبت به سرریزهای

سرریزهای کنگره‌ای از سازه‌های هیدرولیکی هستند که برای تنظیم سطح آب و کنترل جریان در کانال‌ها، رودخانه‌ها و

مستقیم دارند. در پلان، سرریز از دیواره‌های به هم چسبیده تشکیل شده و هندسه مثلثی، دوزنقه، مستطیلی و قوسی با تناوب در عرض جریان تکرار می‌شود. سرریزهای کنگره‌ای معمولاً در شرایطی که عرض دهانه باریک یا به‌طور کلی در شرایطی که با محدودیت بعد از نظر طول آبگذری (افزایش طول به ازای جریان ثابت) مواجه است اجرا می‌شوند و یا زمانی که نیاز به باز طراحی سرریز سد به علل مختلف مثلاً، تغییر دبی عبوری جریان به سبب تغییرات اقلیمی به کار می‌آیند [1]. پژوهشگران زیادی روی ضریب آبگذری سرریز کنگره‌ای تحقیقات ارزشمندی انجام دادند که می‌توان به موارد زیر اشاره کرد. کومار و همکاران (۲۰۱۱)، با مطالعه آزمایشگاهی بر ضریب آبگذری سرریز کنگره‌ای با پلان مثلثی، نشان دادند که با کاهش زاویه رأس سرریز، طول ناحیه تداخل جریان افزایش یافته و ضریب آبگذری جریان سرریز نیز کاهش محسوسی پیدا می‌کند [2]. رضایی (۱۳۹۱)، اثر تغییرات ارتفاع سرریز و طول دماغه را روی ضریب آبگذری سرریز کنگره‌ای بررسی کرد، نتایج نشان داد که با افزایش نسبت عمق جریان در بالادست سرریز به ارتفاع سرریز، مقدار ضریب آبگذری کاهش می‌یابد [3]. کروکستون و تولیس (۲۰۱۲)، ویژگی‌های تداخل تیغه‌های ریزشی و استغراق موضعی در سرریزهای کنگره‌ای با دو و چهار سیکل مثلثی و زوایای رأس مختلف را به صورت آزمایشگاهی مورد بررسی قرار دادند. این موضوع منجر به کاهش ضریب آبگذری جریان شده و مقدار آن متمایل به ضریب آبگذری جریان در سرریزهای لبه پهن می‌شود [4]. اسمعیلی ورکی و رضوی زاده (۱۳۹۲)، ضریب دبی جریان و مقدار دبی در واحد طول عبوری از سرریزهای کنگره‌ای با پلان نیم‌دایره خطی و نیم‌دایره‌ای با شعاع‌های مختلف و تعداد سیکل‌های متفاوت را بررسی کردند [5]. کریستن (۲۰۱۳)، به بررسی میدان جریان ورودی به سرریزهای کنگره‌ای و تأثیر تعداد سیکل‌ها روی عملکرد سرریز کنگره‌ای پرداخت. نتایج نشان داد که با افزایش تعداد سیکل‌ها، ضریب آبگذری کاهش می‌یابد. [6] سئو و همکاران (۲۰۱۶)، تأثیر شکل سرریز بر دبی جریان عبوری از سرریز کنگره‌ای و تفاوت‌های آن را با سرریز خطی

اوجی مورد بررسی قرار دادند، نتایج نشان داد که دبی عبوری از سرریز کنگره‌ای حدود ۷۱ درصد بیشتر از دبی عبوری از سرریز اوجی است [۷]. مشکواتی بروجنی (۱۳۹۶) به بررسی آزمایشگاهی و عددی هیدرولیک سرریز کنگره‌ای دوزنقه‌ای دنداندار همراه با دریچه پرداخت. نتایج نشان داد که در یک ارتفاع ثابت، با افزایش نسبت عمق جریان به‌علاوه انرژی جنبشی در بالادست سرریز به ارتفاع سرریز، در طول‌های ۱/۶ و ۳/۷۲ متر ضریب دبی کاهش اما در طول ۲/۶ این روند افزایشی بوده است [۸]. سنگ‌سفیدی و قدسیان (۱۳۹۷) به بررسی تغییرات ضریب دبی با تغییر زاویه انحنا ( $\theta$ ) و زاویه دیواره جانبی سرریز ( $\alpha$ ) روی سرریز کنگره‌ای قوسی پرداختند. نتایج نشان داد که افزایش  $\theta$  و کاهش  $\alpha$  باعث افزایش کارایی سرریز شده و با افزایش بار هیدرولیکی، مزایای استفاده از سرریزهای کنگره‌ای قوسی کاهش می‌یابد [9]. آذریوند و همکاران (۱۳۹۷) دریافتند که با ایجاد شکل مرکب‌های نیم‌دایره‌ای و مربعی در طول سرریز کنگره‌ای، دبی جریان عبوری افزایش می‌یابد [10]. صفررضوی‌زاده و همکاران (۲۰۲۱)، به مطالعه جریان در سرریز کنگره‌ای نیم‌دایره و سینوسی‌شکل در عرض کانال پرداختند. معادلاتی برای تخمین ضریب آبگذری سرریزهای کنگره‌ای نیم‌دایره سینوسی ارائه دادند. نتایج نشان داد سرریز کنگره‌ای نیم‌دایره سینوسی قادر به عبور دبی‌های بیشتر نسبت به سرریزهای خطی هستند [11]. با توجه به مطالعات انجام گرفته روی بررسی ضریب آبگذری سرریزهای کنگره‌ای؛ مطالعات بسیار اندکی روی اتلاف انرژی در سرریزهای کنگره‌ای صورت گرفته است که به تعدادی از آن‌ها در زیر پرداخته می‌شود. مرکل و همکاران (۲۰۱۸)، بیان کردند که برای پایین‌دست سرریزهای کنگره‌ای یک کف‌بند بتنی ساده یا یک حفاظ ریپرپ مربوط به طول پرش هیدرولیکی برای بستر رودخانه‌های فرسایش‌پذیر و افزایش اتلاف انرژی کافی است. همچنین بیان داشتند که برای سطوح کمتر جریان پایین‌دست، اتلاف انرژی در یک پرش هیدرولیکی، ثابت و بسته به سرریز اتفاق می‌افتد و با بالا بردن سطح جریان در پایین‌دست، پرش هیدرولیکی به زیر آب می‌رود. به دلیل شکل هندسی آن،

دبی در واحد عرض،  $H$  عمق جریان در بالادست سرریز به علاوه ارتفاع نظیر انرژی جنبشی،  $W_i$  و  $W_o$  عرض دهانه‌های ورودی و خروجی سرریز،  $L$  طول موثر تاج سرریز و  $B$  طول مستقیم دیواره‌های سرریز هستند.

(۱)

$$E_L = \frac{E_1 - E_2}{E_1} = \frac{(h + P + \frac{q^2}{2gh^2}) - (y + \frac{q^2}{2gy^2})}{(h + P + \frac{q^2}{2gh^2})} = f(\rho, \sigma, \mu, q, H, P, W_i, W_o, L, B)$$

با در نظر گرفتن سه پارامتر تکراری چگالی آب، دبی در واحد عرض و ارتفاع سرریز و با استفاده از تئوری پی باکینگهام، میزان اتلاف انرژی تابع پارامترهای بدون بعد زیر می‌شود.

$$E_L = f(We, Re, \frac{H}{P}, \frac{W_i}{P}, \frac{W_o}{P}, \frac{L}{P}, \frac{B}{P}) \quad (2)$$

به دلیل عمق کافی جریان (بیشتر از  $0.3$  متر روی تاج سرریز) از عدد وبر و به دلیل آشفتگی زیاد جریان، از عدد رینولدز صرف نظر شد [15, 16]. همچنین با ترکیب دو پارامتر  $\frac{W_i}{P}$  و  $\frac{W_o}{P}$  پارامتر  $\frac{W_i}{W_o}$  حاصل می‌شود و با ترکیب دو پارامتر دیگر  $\frac{L}{P}$  و  $\frac{B}{P}$  پارامتر  $\frac{L}{B}$  به دست می‌آید. می‌توان میزان اتلاف انرژی در سرریز کنگره‌ای سینوسی شکل را تابع پارامترهای بدون بعد رابطه (۳) دانست.

$$E_L = f(\frac{H}{P}, \frac{W_i}{W_o}, \frac{L}{B}) \quad (3)$$

شکل ۱: پارامترهای موثر بر اتلاف انرژی



Fig. 1. Parameters affecting energy loss

آزمایش‌ها در آزمایشگاه هیدرولیک دانشگاه شهید اشرفی اصفهانی و در فلومی به طول  $10$  متر، عرض  $0.6$  متر و ارتفاع  $0.8$  متر انجام شد. جریان توسط یک پمپ با خطای  $0.01$  درصد توسط سه مخزن سطحی و پس از عبور از آرام‌کننده‌های جریان وارد فلوم می‌شود. شکل (۲)، فلوم

سرریز کنگره‌ای می‌تواند به طور کلی اتلاف انرژی موثر را تضمین کند [12]. قادری و عباسی (۱۳۹۸)، با بررسی عددی اتلاف انرژی سرریزهای پلکانی-کنگه‌ای دریافتند که در شرایط جریان یکسان، سرریز پلکانی-کنگه‌ای مستطیلی، مثلثی و دوزنقه‌ای به ترتیب به میزان  $64/2$ ،  $21/12$  و  $76/23$  درصد در کاهش سرعت جریان و  $6/5$ ،  $1/13$  و  $17$  درصد در استهلاک انرژی بیشتر نسبت به سرریز پلکانی متعارف موثر بودند [13]. حقی‌آبی و همکاران (۲۰۲۲)، با بررسی سرریزهای کنگره‌ای مثلثی و دوزنقه‌ای دریافتند که وجود سرریز کنگره‌ای باعث  $70$  تا  $85$  درصد اتلاف انرژی می‌شود. همچنین ایشان کمترین راندمان اتلاف انرژی را در زمانی که نسبت عمق جریان در بالادست سرریز به ارتفاع سرریز برابر  $0.25$  است، بیان کردند [14].

با توجه به متن بالا، راهکار برای افزایش ضریب آبگذری و اتلاف انرژی در سرریزهای کنگره‌ای حائز اهمیت است؛ اما کمبود تحقیق روی سرریزهای کنگره‌ای سینوسی شکل به چشم می‌خورد. در این تحقیق از چهار مدل سرریزهای کنگره‌ای سینوسی شکل استفاده شد که این سرریزها، دارای طول تاج بیشتری هستند و می‌توانند راندمان دبی و ظرفیت انتقال آن را افزایش دهند. همچنین تأثیر طول تاج، ارتفاع سرریز و نسبت عرض دهانه‌ای ورودی به عرض دهانه خروجی بر میزان اتلاف انرژی مورد بررسی قرار خواهد گرفت.

## ۲. مواد و روش‌ها

### ۲-۱. آنالیز ابعادی

رابطه (۱) و شکل (۱)، پارامترهای موثر بر اتلاف انرژی در سرریز کنگره‌ای سینوسی را نشان می‌دهند. در این رابطه  $E_L$  میزان اتلاف انرژی،  $E_1$  انرژی مخصوص در بالادست سرریز،  $E_2$  انرژی مخصوص در پایین‌دست سرریز،  $P$  ارتفاع سرریز،  $h$  عمق جریان در بالادست نسبت به تاج سرریز،  $y$  عمق جریان در پایین‌دست سرریز،  $q$  دبی در واحد عرض،  $g$  نیروی گرانش،  $\rho$  چگالی آب،  $\sigma$  ضریب کشش سطحی،  $q$

چوب بوده و برای نفوذناپذیری آن‌ها از چسب چوب استفاده شد. جدول (۲)، مشخصات هیدرولیکی آزمایش‌ها را نشان می‌دهد که در آن  $Q$  دبی جریان است. شکل (۳)، سرریز سینوسی شکل را نشان می‌دهد. همچنین شکل سینوس‌های تمامی سرریزهای مورد بررسی در تحقیق، مشابه هستند.

شکل ۳. سرریز سینوسی

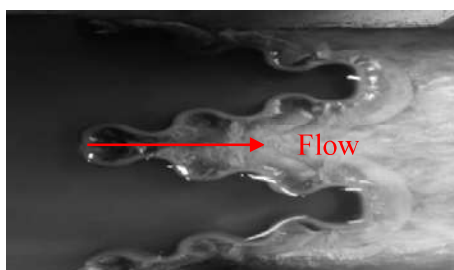


Fig. 3. Sinusoidal weir

### ۳. بحث و نتایج

مطابق شکل (۴)، جریان از روی لبه‌های سینوسی شکل سرریز مانند یک سرسره انحنادار و یا شبیه به سرریزهای اوجی به پایین‌دست منتقل می‌شود. همچنین به دلیل سینوسی بودن سرریزها، جریان در کنار دیواره‌ها سریع‌تر به پایین‌دست منتقل خواهند شد. در لبه دهانه‌ها، خلاء موضعی به وجود می‌آید. با افزایش دبی جریان، حجم هوای موجود افزایش می‌یابد. در پایین‌دست کلیدهای خروجی و ورودی گردابه و چرخش جریان به وجود می‌آید که با افزایش سرعت جریان، قدرت آن‌ها بیشتر می‌شود. دلیل ایجاد گردابه‌ها، تداخل جریان ریزشی از هر سینوس است. به دلیل سینوسی بودن جریان و تورفتگی و بیرون‌زدگی‌های موجود در سرریز، جریان با انحنا وارد پایین‌دست می‌شود و جریان خروجی از هر سینوس، با جریان خروجی از سینوس دیگر مخلوط می‌شود. همچنین در ابتدای دهانه‌های خروجی، ناحیه مستغرق کوچکی تشکیل می‌شود که با افزایش دبی جریان، طول آن افزایش یافته و به پایین‌دست منتقل می‌شود. جلوی دهانه‌های ورودی دو پرش هیدرولیکی با قدرت نسبتاً زیادی تشکیل می‌شود و پس از آن جریان با آرامش بیشتری به پایین‌دست منتقل می‌شود. مطابق شکل (۵)، جریان خروجی از دهانه‌های ورودی و ریزش آن‌ها در جلوی دهانه خروجی،

آزمایشگاهی و مخازن را نشان می‌دهد. عمق جریان در بالادست و پایین‌دست سرریز توسط عمق‌سنج سوزنی و با خطای ۱ میلی‌متر برداشت شد. عمق بالادست و پایین‌دست سرریز به ترتیب در فاصله 4h و 10P اندازه‌گیری شد [17, 18]. سرریزها در فاصله ۵/۵ متری از ابتدای کانال نصب شده‌اند.

شکل ۲. فلوم آزمایشگاهی



Fig. 2. Laboratory flume

جدول ۱. مشخصات سرریزها

| Type | N | P<br>(m) | $W_i$<br>(m) | $W_o$<br>(m) | $T_s$<br>(m) | L<br>(m) | B<br>(m) |
|------|---|----------|--------------|--------------|--------------|----------|----------|
| A    | 2 | 0.15     | ۰٫۲۴         | ۰٫۰۳۵        | 0.012        | 1.3      | ۰٫۲۶     |
| B    | 2 | 0.15     | ۰٫۲۴         | ۰٫۰۳۵        | 0.012        | 1.5      | ۰٫۲۶     |
| C    | 2 | 0.18     | ۰٫۲۳         | ۰٫۰۳۰        | 0.012        | 1.55     | ۰٫۳۰     |
| D    | 2 | 0.18     | ۰٫۲۳         | ۰٫۰۳۰        | 0.012        | 1.6      | ۰٫۳۳     |

Table 1. Characteristic of weirs

جدول ۲. مشخصات هیدرولیکی آزمایش‌ها

| Row | Type | Q<br>(m <sup>3</sup> /s) | $W_i/W_o$ | L/B  | H/P   | $E_L$ |
|-----|------|--------------------------|-----------|------|-------|-------|
| 1   | A    | 0.020                    | 6.86      | ۵٫۰۰ | 0.303 | 0.525 |
| 2   | A    | 0.025                    | 6.86      | ۵٫۰۰ | 0.348 | 0.453 |
| 3   | A    | 0.030                    | 6.86      | ۵٫۰۰ | 0.393 | 0.378 |
| 4   | A    | 0.035                    | 6.86      | ۵٫۰۰ | 0.445 | 0.335 |
| 5   | B    | 0.020                    | 6.86      | ۵٫۷۷ | 0.264 | 0.552 |
| 6   | B    | 0.025                    | 6.86      | ۵٫۷۷ | 0.316 | 0.485 |
| 7   | B    | 0.030                    | 6.86      | ۵٫۷۷ | 0.355 | 0.438 |
| 8   | B    | 0.035                    | 6.86      | ۵٫۷۷ | 0.401 | 0.413 |
| 9   | C    | 0.020                    | 7.67      | ۵٫۱۷ | 0.212 | 0.654 |
| 10  | C    | 0.025                    | 7.67      | ۵٫۱۷ | 0.254 | 0.598 |
| 11  | C    | 0.030                    | 7.67      | ۵٫۱۷ | 0.291 | 0.556 |
| 12  | C    | 0.035                    | 7.67      | ۵٫۱۷ | 0.323 | 0.506 |
| 13  | D    | 0.020                    | 7.67      | ۴٫۸۵ | 0.201 | 0.659 |
| 14  | D    | 0.025                    | 7.67      | ۴٫۸۵ | 0.243 | 0.604 |
| 15  | D    | 0.030                    | 7.67      | ۴٫۸۵ | 0.280 | 0.562 |
| 16  | D    | 0.035                    | 7.67      | ۴٫۸۵ | 0.312 | 0.520 |

Table 2. Hydraulic characteristic of the tests

عمق پایین‌دست سرریز، توسط دریچه انتهایی فلوم آزمایشگاهی به صورت مصنوعی تنظیم نشد. از سرریزهایی به صورت جدول (۱)، استفاده شد که در آن  $T_s$  ضخامت سرریزها و  $N$  تعداد سیکل آن‌ها است. سرریزها از جنس

شکل (۶)، منحنی دبی-اشل را نشان می‌دهد. همانطور که از شکل پیدا است؛ با افزایش دبی جریان، ارتفاع بالادست جریان نیز افزایش می‌یابد. همچنین هر چه عمق جریان در بالادست سرریز افزایش یابد، باعث کاهش ضریب آبگذری می‌شود. همچنین با داشتن منحنی دبی-اشل و با استفاده از رابطه پیوستگی می‌توان سرعت جریان در بالادست سرریز را محاسبه کرد.

شکل (۷)، ضریب آبگذری سرریزهای مورد بررسی را نسبت به پارامتر  $H/P$  و با استفاده از رابطه عمومی سرریزها، نشان می‌دهد. همانطور که مشخص است، میزان میانگین ضریب آبگذری در سرریزهای نوع A، B، C و D به ترتیب برابر  $1/18$ ،  $1/39$ ،  $1/44$  و  $1/54$  است. همچنین با افزایش پارامتر بدون بعد  $H/P$ ، میزان ضریب آبگذری کاهش می‌یابد. دلیل آن افزایش عمق جریان روی تاج سرریز و در نهایت کاهش عبور دبی مد نظر است.

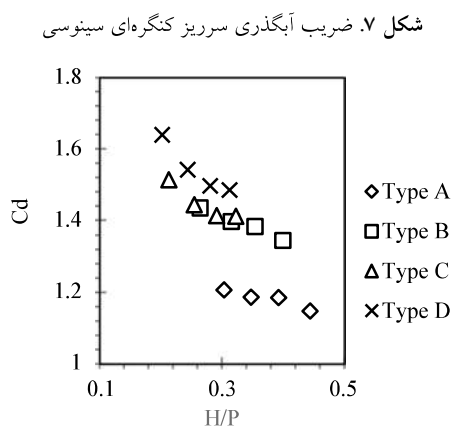


Fig. 7. The water passage coefficient of the sinusoidal labyrinth weir

شکل (۸-الف)، تأثیر پارامتر نسبت عرض دهانه‌های ورودی به عرض دهانه‌های خروجی بر میزان اتلاف انرژی نشان می‌دهد. همچنین شکل (۸-ب) و شکل (۸-ج)، به ترتیب تأثیر پارامترهای طول موثر سرریزها به طول دیواره سرریزها و نسبت عمق جریان به علاوه ارتفاع مانند انرژی جنبشی به ارتفاع سرریز را بر میزان اتلاف انرژی نشان می‌دهند.

باعث تداخل جریان شده و از سرعت آن کاسته می‌شود. همچنین این جریان خروجی با جت ناشی از ناحیه استغراق موضعی مخلوط شده و به پایین‌دست منتقل می‌شود. جریان به وجود آمده در جلوی دهانه خروجی دارای بیشترین قدرت است و همچنین این جریان با چرخش همراه است.

شکل ۴. جریان عبوری از سرریز کنگره‌ای سینوسی

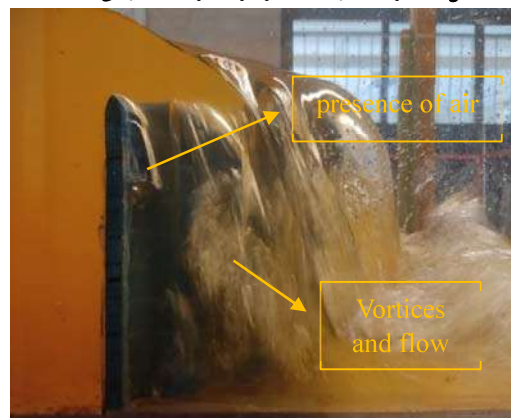


Fig. 4. Flow in the sinusoidal labyrinth weir

شکل ۵. پرش هیدرولیکی و تداخل جریان در سرریز کنگره‌ای سینوسی

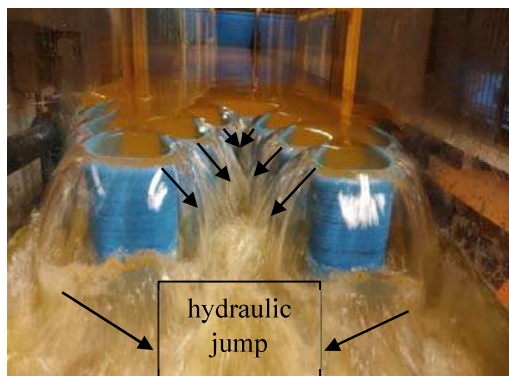


Fig. 5. Hydraulic jump and flow interference in the sinusoidal labyrinth weir

شکل ۶. منحنی دبی-ارتفاع جریان

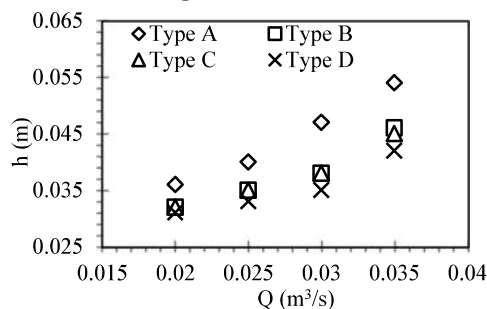


Fig. 6. Discharge-height curve

۸). مرکل و همکاران (۲۰۱۸)، آزمایش‌های خود را روی سرریز کنگره‌ای ساده همراه با کف‌بند و ریپرپ انجام دادند.

شکل ۸. تأثیر پارامترهای  $H/P$  و  $L/B$  و  $W_i/W_o$  بر میزان اتلاف انرژی

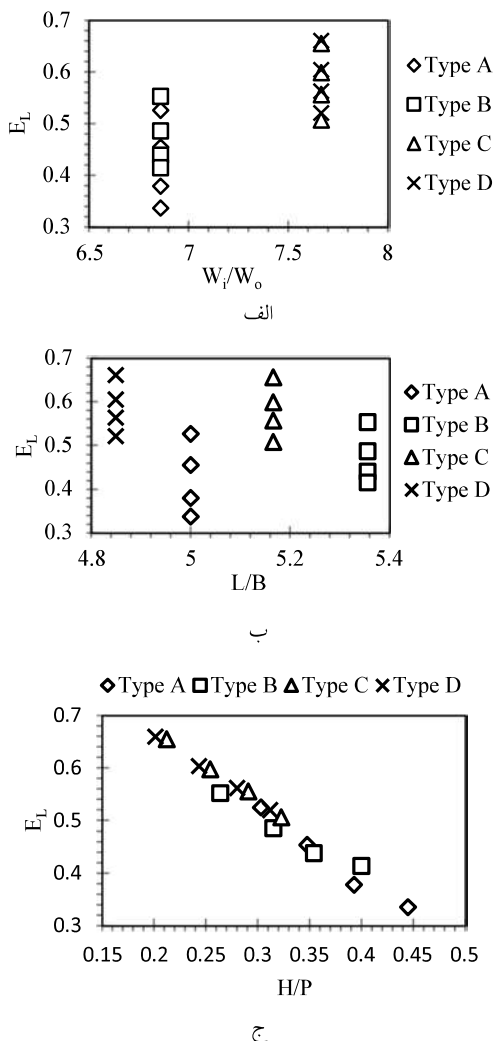


Fig. 8. The effect of  $H/P$ ,  $L/B$  and  $W_i/W_o$  parameters on the amount of energy loss

شکل ۹. مقایسه میزان اتلاف انرژی

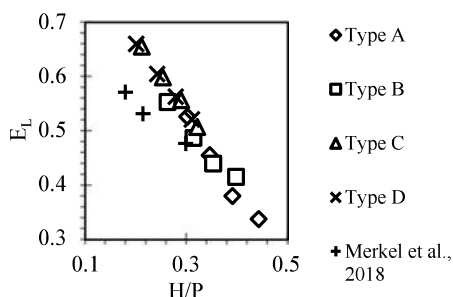


Fig. 9. Comparison of energy loss

همانطور که از شکل (۸-الف)، مشخص است؛ با افزایش نسبت عرض دهانه‌های ورودی به عرض دهانه‌های خروجی، میزان اتلاف انرژی افزایش می‌یابد. دلیل آن عبور بیشتر جریان از دهانه‌های ورودی و تداخل بیشتر آن با جریان خروجی از دیگر دهانه‌های ورودی است. با این حال، با افزایش این نسبت و در یک نسبت ثابت ( $W_i/W_o=7.67$ ) میزان اتلاف انرژی تغییرات زیادی را تجربه نمی‌کند. برای نمونه، در سرریز نوع C و D که هر دو دارای نسبت عرض دهانه‌های ورودی به عرض دهانه‌های خروجی برابر  $7/67$  هستند؛ افزایش اتلاف انرژی در سرریز نوع D حدود  $1/32$  درصد بیشتر از سرریز نوع C است. شکل (۸-ب)، تأثیر پارامتر طول موثر سرریزها به طول مستقیم دیواره سرریزها را نشان می‌دهد. همانطور که پیدا است و با افزایش این نسبت، ابتدا اتلاف انرژی کاهش یافته و سپس افزایش و دومرتبه کاهش می‌یابد. با این حال، بهترین مقدار اتلاف انرژی در سرریزهای نوع D و سپس نوع C مشاهده می‌شوند. نسبت طول موثر سرریزها به طول مستقیم دیواره سرریزها در این دو سرریز و به ترتیب برابر  $5/17$  و  $4/85$  است. همانطور که گفته شد، شکل (۸-ج)، تأثیر پارامتر عمق بالادست سرریز به علاوه ارتفاع نظیر انرژی جنبشی به ارتفاع سرریز را نشان می‌دهد. با افزایش این نسبت، مقدار اتلاف انرژی کاهش می‌یابد که دلیل آن می‌تواند افزایش عمق و سرعت جریان در بالادست سرریز باشد. میزان میانگین اتلاف انرژی در سرریزهای نوع A، B، C و D به ترتیب برابر  $42/3$ ،  $47/2$ ،  $57/9$  و  $58/6$  هستند. بیشترین مقدار اتلاف انرژی در سرریز نوع آخر مشاهده شد. دلیل آن بیشتر بودن نسبت عرض دهانه‌های ورودی به عرض دهانه‌های خروجی و یا کمتر بودن نسبت طول موثر سرریز به طول مستقیم دیواره‌ی آن و یا بیشتر بودن نسبت عمق بالادست سرریز به علاوه ارتفاع مانند انرژی جنبشی به ارتفاع سرریز باشد. همچنین در این سرریز ارتفاع و طول موثر آن بیشتر از مابقی سرریزها است و همین امر نیز می‌تواند بر بیشتر شدن مقدار اتلاف انرژی در آن موثر باشد. از داده‌های مرکل و همکاران (۲۰۱۸) نیز برای مقایسه استفاده شد (شکل

5. Esmaili Varak, M. and Safarrazavi Zadeh, M., (2013). Study of Hydraulic Features of Flow Over Labyrinth Weir with Semi-circular Plan form. *Water and Soil*, 27(1), pp.224-234.

6. Christensen, N. (2013), "Flow Characteristics of Arced Labyrinth Weirs", Utah State University, Logan, Utah.

7. Seo, I. W., Do Kim, Y., Park, Y. S. and Song, C. G., (2016), "Spillway discharges by modification of weir shapes and overflow surroundings". *Environmental Earth Sciences*, 75(6): 1-13.

8. Meshkvati Troyjani, S. J., (2013) "Experimental and numerical hydraulic investigation of toothed trapezoidal labyrinth weir with valve", Ph.D. thesis, water engineering field, water structures, Sari University of Agricultural Sciences and Natural Resources (In Persian).

9. Sangsefidi Y, Ghodsian M. Investigation of Effects of Entrance Channel Walls on the Hydraulic Performance of Arced Labyrinth Weirs. *MCEJ* (2019); 19 (1): 195-206.

10. Azarpeyvand H, Emadi A R, Sedghi Asl M. An Experimental Study of the Discharge of the Length Increase Effect on the Composite Trapezoidal Labyrinth Spillway. *jwss* (2019); 23 (1): 405-418.

11. Safarrazavi Zadeha, M., Esmaili Varaki, M. and Biabani, R. (2021) "Experimental study on flow over sinusoidal and semicircular labyrinth weirs", *ISH Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 27, NO. S1, 304-313.

12. Merkel, J., Belzner, F., Gebhardt, M. and Thorenz, C., (2018). Energy dissipation downstream of labyrinth weirs.

13. Ghaderi, A. and Abbasi, S., (2019). Numerical investigation of labyrinth stepped spillways' performance on energy dissipation of skimming flow. *Journal of Hydraulics*, 14(3), pp.1-16.

14. Haghiabi, A.H., Nou, M.R.G. and Parsaie, A., (2022). The energy dissipation of flow over the labyrinth weirs. *Alexandria Engineering Journal*, 61(5), pp.3729-3733.

15. Novák, P. and Čabelka, J., (1981). Models in hydraulic engineering: Physical principles and design applications. *Monographs & surveys in water resources engineering*.

16. 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.

17. Fathi A, Abdi Chooiplou Ch, Ghodsian M (2023) "An experimental study of flow energy loss in trapezoidal stepped piano key weirs (PKWs)." *Modares Civil Engineering journal.*, 23(4).

18. Rdhaiwi, A.Q., Khoshfetrat, A. and Fathi, A., 2024. EXPERIMENTAL COMPARISON OF FLOW ENERGY LOSS IN TYPE-B AND-C TRAPEZOIDAL PIANO

میانگین اتلاف انرژی در کار ایشان به ترتیب حدود ۹/۳ و ۱۰/۹ درصد کمتر از سرریزهای نوع C و D در تحقیق حاضر است. اما نسبت به سرریزهای نوع A و B به ترتیب حدود ۱۹/۴ و ۱۰ درصد بیشتر است.

#### ۴- نتیجه گیری

در سرریزهای کنگره‌ای سینوسی، با افزایش نسبت H/P میزان اتلاف انرژی کاهش می‌یابد. همچنین در این سرریزها و با افزایش نسبت عرض دهانه‌های خروجی سرریز با عرض دهانه‌های ورودی آن، میزان اتلاف انرژی افزایش می‌یابد. همچنین طول موثر سرریز یکی از پارامترهای تأثیرگذار روی میزان اتلاف انرژی است. با افزایش طول موثر سرریز در سرریزهای کنگره‌ای سینوسی، مقدار اتلاف انرژی افزایش می‌یابد. ارتفاع سرریز روی اتلاف انرژی تأثیر زیادی می‌گذارد. به طور میانگین و با افزایش ۲۰ درصدی ارتفاع سرریز، میزان اتلاف انرژی ۲۳/۲ درصد افزایش می‌یابد. سرریز کنگره‌ای نوع D دارای بیشترین مقدار اتلاف انرژی و بیشترین ضریب آبگذری است. دلیل بیشتر بودن اتلاف انرژی در سرریز ذکر شده، احتمالاً به دلیل بیشتر بودن طول موثر سرریز نسبت به دیگر سرریزها است. همچنین میانگین اتلاف انرژی در سرریزهای نوع A، B، C و D به ترتیب برابر ۴/۲، ۴/۷، ۵/۹ و ۵/۸ است.

#### ۵. مراجع

1. Kurdestani, F., Azhdari Moghadam, M., Qohani Arab, H. and Rashki, M. (2019) "Labyrinth weir optimization using pso algorithm" 19th Iranian Hydraulics Conference, Ferdowsi University of Mashhad, 28 and 27 of Bahman (In Persian).

2. Kumar, S., Ahmad, Z. and Mansoor, T., (2011), "A new approach to improve the discharging capacity of sharp-crested triangular plan form weirs", *Flow Measurement and Instrumentation* 22, no. 3: 175-180.

3. Rezaei, M. (2012) "Discharge-height relationship in rectangular labyrinth weirs" master's thesis on hydraulic structures, Faculty of Agricultural Sciences and Natural Resources, University of Sari (In Persian).

4. Crookston, B. M., and Tullis, B. P., (2012), "Labyrinth weirs: Nappe interference and local submergence." *Journal of Irrigation and Drainage Engineering* 138, no. 8: 757-765.

## Experimental investigation of flow energy dissipation in sinusoidal trapezoidal labyrinth weirs

Sohail Nematollahi<sup>1</sup>, Elham Izadinia<sup>2\*</sup>, Ali Khoshfetrat<sup>3</sup>, Ehsan Delavari<sup>4</sup>

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

Email: [izadinia@ashrafi.ac.ir](mailto:izadinia@ashrafi.ac.ir)**Abstract:**

Labyrinth weirs are of the non-linear weirs whose discharge coefficient is higher than similar linear weirs. These weirs have a simple structure. They are mainly made in rectangular, trapezoidal, triangular and semicircular shapes. Investigating the amount of energy loss in these high-efficiency weirs has become very important for engineers in recent years. The experiments were carried out in a flume with a length of 10 meters, a width of 0.6 meters and a height of 0.8 meters. The flow is fed by a pump with an error of 0.01% by three surface tanks and after passing through the flow relaxers into the flume. In this research, four sinusoidal labyrinth weirs were used to check the amount of energy loss. The first spillway has a crown length of 1.3 meters, the second spillway has a crown length of 1.5 meters, the third spillway has a crown length of 1.55 meters, and the fourth spillway has a crown length of 1.6 meters. Also, the first and second weirs have a height of 0.15 meters and the width ratio of the inlet to the outlet is 6.86, and the third and fourth weirs have a height of 0.18 meters and the width ratio of the inlet to the outlet is 7.67. The flow depth in the upstream and downstream of the weir was taken by a point gauge with an error of 1 mm. Weirs are installed at a distance of 5.5 meters from the beginning of the channel. The downstream depth of the spillway was not artificially adjusted by the end valve of the laboratory flume. The weirs are made of wood and wood glue was used for their impermeability. The flow is transferred downstream over the sinusoidal edges of the weir like a curved slide or similar to peak weirs. Also, due to the sinusoidal nature of the weirs, the flow will be transferred downstream faster next to the walls. At the edge of the keys, a local vacuum is created. As the flow rate increases, the available air volume increases. At the downstream of the inlet and outlet keys, a vortex and rotation of the flow is formed, which increases in strength as the flow speed increases. The reason for the formation of vortices is the interference of the falling flow from each sinus. Due to the sinusoidal nature of the flow and the indentations and protrusions in the weir, the flow enters the downstream with a curve and the outflow from each sinus is mixed with the outflow from the other sinus. Also, at the beginning of the outlet keys, a small submerged area is formed, which increases in length and moves downstream as the flow rate increases. In front of the inlet keys, two relatively strong hydraulic jumps are formed, and after that the flow is transferred downstream more calmly. The results were that by increasing the flow rate or increasing the depth of the flow upstream of the weir, the energy loss decreased. Also, the amount of energy loss increases with the effective length of weirs. By increasing the ratio of the width of the input keys to the width of the weir output keys, the amount of energy loss increases. Also, by increasing the ratio of flow depth plus height, such as kinetic energy upstream of the weir to the height of the weir, the amount of energy loss decreases. The amount of energy loss is the highest in the fourth weir and the third weir, respectively. On average, with a 20% increase in the height of the weir, the amount of energy loss increases by 23.2%. Also, the average energy loss in type A, B, C, and D weirs is 42.3, 47.2, 57.9, and 58.6, respectively.

**Keywords:** Energy loss, Inlet and outlet openings, Labyrinth weir, Sinusoidal, Discharge coefficient.