

# Determining the scour pattern of uniform sediments at the downstream of the labyrinth weirs

Gholamhasan Joneidi<sup>1</sup> , Javad Mozaffari<sup>2\*</sup> 

<sup>1</sup>MSc student, Water Science & Engineering Department, Arak University, Arak, Iran

<sup>2</sup>a) Associate Professor, Water Science & Engineering Department, Arak University, Arak, Iran

b) Member of the Research Institute of Water Science & Engineering, Arak University, Arak, Iran

Corresponding Author's E-mail: [Javad\\_370@yahoo.com](mailto:Javad_370@yahoo.com)

Received: 24 Oct. 2025  
Revised: 02 Feb. 2026

Accepted: 05 Dec. 2025  
Published: 21 June 2024



Homepage: [ijwer.uoz.ac.ir](http://ijwer.uoz.ac.ir)

**Abstract:** In this research, a set of experiments were conducted to determine the downstream scouring rate of a labyrinth weir installed in a channel of 12 m long and 80 cm wide. In these experiments, discharges of 5, 10, and 15 liters overflowed triangular and arched labyrinth weirs governed, single-cycle and double-cycle, with a length of 1.26 m. The results showed that the maximum scour depth occurs at the junction of the weir with the channel wall. In single-cycle weirs, the second scour maximum point is close to the weir apex, while in double-cycle weirs, it occurs at the intersection of the two cycles and then at the weir apex. The single-cycle and two-cycle arch weirs experience a scouring of 101% and 27%, while the single-cycle and two-cycle triangular weirs experience a scouring of 53% and 39%.

**Keywords:** Arched labyrinth weir, Scour, Froude number, Triangular labyrinth weir

**Introduction:** Scouring downstream of weirs, due to high velocity and turbulence of the flow, has always been one of the major challenges in the design and operation of these hydraulic structures. Previous studies have shown that various factors, including jet velocity (Saeidi nejad, 2005), water drop height (Akhtari & Sanei, 2006), flow rate (Moosavi et al., 2006), and weir plan (Kazempoor laksari et al., 2019), affect the amount and pattern of scouring. Labyrinth weirs are used in places that have width limitations and are used to increase the crest length. If a proper foundation is not built, there is a possibility of destruction of these weirs due to downstream scouring. On the other hand, excessive increase in the depth of the weir foundation will entail high costs. Therefore, the aim of this study is to carefully investigate the amount, pattern, and trend of scour changes downstream of triangular and arched labyrinth weirs in two single-cycle and two-cycle modes in uniform sediments.

**Materials and Methods:** The experiments were conducted in a laboratory flume 12 m long and 80 cm wide (Fig. 1). The discharge was measured using an ultrasonic flowmeter with an accuracy of  $\pm 0.01$  lit/s, and the water level was measured with a point gauge. Four types of labyrinth weirs, including single-cycle triangular, double-cycle triangular, single-cycle arched and double-cycle arched with a crest length of 1.26 m and a magnification ratio of 1.58, were installed at a distance of 6 m from the beginning of the channel. The weirs were made of iron with a thickness of 4 mm and a height of 35 cm. Coarse-grained sediments were used up to a height of 20 cm upstream of the weirs, and uniform sediments with a median diameter of 3 mm were used downstream with a length of 70 cm and a height of 20 cm. 15 cm of the weir height was placed above the sediments and 20 cm of it was placed as a foundation under the sediments. The depth of the tailwater was set to 10 cm in all experiments. Experiments were conducted at three discharges of 5, 10, and 15 lit/s. The topography was measured with a 3x3 cm grid and the data were analyzed in Sigma Plot software to draw a three-dimensional scour shape.

**Results and Discussion:** The results of the experiments showed that the greatest scour depth always occurs at the junction of the weir with the channel wall. The presence of severe transverse curvature of flow and nappe interference lead to increased turbulence and, as a result, more scour on the sides. In single-cycle weirs, the second maximum scour point was observed near the weir apex (Figs. 3-5 and 11-13). In double-cycle weirs, the second

maximum scour point occurs at the intersection of the two cycles and then at the weir apex (Figs. 6-8 and 14-16). This is due to the nappe interference and the transverse curvature of the flow at the intersection of the cycles, which, similar to near the channel wall, creates more turbulence. A comparison of single-cycle and double-cycle weirs showed that with an increase in discharge and water head ratio, the discharge coefficient in single-cycle weirs decreases faster. This faster decrease in the efficiency of single-cycle weirs leads to a faster increase in the scour rate in them compared to double-cycle weirs. So that in the curved single-cycle weir, the increase in scour from a discharge of 5 to 15 lit/s was 101%, while in the curved double-cycle weir this increase was 27%. For triangular weirs, these values were 53% for single-cycle and 39% for double-cycle, respectively. This difference in the scour increase trend shows that despite the better initial hydraulic performance of single-cycle weirs at low discharges, with increasing discharge, two-cycle weirs are more stable in terms of scour. Therefore, despite the lower discharge coefficient, two-cycle weirs are structurally more resistant to scour.

**Conclusion:** The studies showed that the maximum scour always occurs at the junction of the weir with the channel wall. In single-cycle weirs, the second maximum scour is near the weir apex; but in two-cycle weirs, it occurs at the intersection of the two cycles and then near the weir apex, due to the increased turbulence caused by the transverse curvature of the flow and the nappe interference. The studies showed that increasing discharge leads to an increase in scour depth. This increase is more significant in single-cycle weirs than in double-cycle weirs due to the faster decrease in discharge coefficient. Furthermore, although a higher Froude number usually means more scour, the nappe interference and discharge coefficient play a major role in the scour rate. Finally, it was found that double-cycle weirs, are structurally more suitable due to the lower scour depth.

© 2024 University of Zabol, Zabol, Iran.



This is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0 license) (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

# تعیین الگوی آبشستگی رسوبات یکنواخت در پایین دست سرریزهای کنگره‌ای

غلامحسین جنیدی<sup>۱</sup> و جواد مظفری<sup>۲\*</sup>

<sup>۱</sup> دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه علوم و مهندسی آب، دانشگاه اراک، اراک، ایران

<sup>۲</sup> آلف) دانشیار، گروه علوم و مهندسی آب، دانشگاه اراک، اراک، ایران

ب) عضو پژوهشکده علوم و مهندسی آب، دانشگاه اراک، اراک، ایران

پست الکترونیکی نگارنده مسئول: [j-mozafari@araku.ac.ir](mailto:j-mozafari@araku.ac.ir)

وبگاه نشریه: [ijwer.uoz.ac.ir](http://ijwer.uoz.ac.ir)



تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۸/۰۲ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۹/۱۴

تاریخ ویرایش: ۱۴۰۴/۱۱/۱۴ تاریخ چاپ: ۱۴۰۳/۰۴/۰۱

**چکیده:** در این پژوهش، به بررسی میزان فرسایش پایین‌دست سرریز کنگره‌ای، پرداخته شد. آزمایش‌ها در کانال به طول ۱۲ متر و عرض ۸۰ سانتی‌متر انجام شد. در این آزمایش‌ها، از سرریزهای کنگره‌ای مثلثی و قوسی، به صورت تک‌سیکل و دوسیکل، با طول ۱/۲۶ متر استفاده شد. جریان با سه دبی ۵، ۱۰ و ۱۵ لیتر بر ثانیه از روی سرریزهای کنگره‌ای عبور داده شد. نتایج آزمایش‌ها نشان داد بیشترین عمق آبشستگی در محل اتصال سرریز به دیواره کانال رخ می‌دهد. در سرریزهای تک‌سیکل، دومین نقطه بیشینه آبشستگی نزدیک به راس سرریز است، در حالی که در سرریزهای دوسیکل، این اتفاق در محل تقاطع دو سیکل و سپس در راس سرریز می‌افتد. به نظر می‌رسد انحناى عرضی جریان در دیواره‌ها و برخورد جریان‌های ریزشی به دیواره باعث افزایش تلاطم و در نتیجه آبشستگی بیشتر در کناره‌ها و محل تقاطع سیکل‌ها می‌شود. با افزایش دبی و نسبت هد آب، ضریب دبی در سرریزهای تک‌سیکل سریع‌تر کاهش می‌یابد که منجر به افزایش سریع‌تر میزان آبشستگی در آن‌ها نسبت به سرریزهای دوسیکل می‌شود. بطوریکه با افزایش دبی از ۵ به ۱۵ لیتر بر ثانیه، در سرریز تک‌سیکل و دو سیکل قوسی ۱۰٪ و ۲۷٪ و در سرریز تک‌سیکل و دوسیکل مثلثی ۵۳٪ و ۳۹٪ افزایش آبشستگی در کناره‌ها بوجود می‌آید. بنابراین، از نظر هیدرولیکی راندمان کمتری در سرریز دو سیکل نسبت به تک سیکل وجود دارد، اما از نظر سازه‌ای استفاده از سرریز دو سیکل مناسب‌تر است.

**کلیدواژگان:** آبشستگی، سرریز کنگره‌ای قوسی، سرریز کنگره‌ای مثلثی، عدد فرود

## ۱- مقدمه

از نمونه‌های مختلف سرریزهای غیرخطی می‌توان به سرریزهای کنگره‌ای مثلثی و قوسی اشاره نمود. با توجه به اینکه سرریزها معمولاً در معرض سیلاب‌های متعدد قرار دارند، آماده‌سازی سازه‌ها برای مقاومت در برابر در بسترهای نفوذپذیر پایین‌دست، از مسائل مهم در طراحی آن‌ها

برای افزایش جریان عبوری سرریزها در سدهای تنظیمی یا آبگیرهای جانبی و با محدودیت جانمایی، می‌توان از جایگزینی سرریزهای خطی با سرریزهای غیرخطی بهره‌برد.

می‌باشد. از این رو، برآورد میزان آبشستگی در پایین دست سرریزها ضروری است. پژوهش‌های پیشین نشان می‌دهد که سرعت جت عامل مهم آبشستگی در پایین دست سرریز است (Saeidi nejad, 2005)؛ افزایش ارتفاع ریزش آب، سبب افزایش عمق آبشستگی پایین دست سرریز می‌شود (Akhtari & Sanei, 2006)؛ و فاصله سرریز از محل حداکثر عمق آبشستگی با افزایش دبی افزایش می‌یابد (Moosavi et al., 2006).

یکی پژوهش آزمایشگاهی (Kazempoor laksari et al., 2019) درباره فرسایش پایین دست سرریزهای پلکانی-کنگه‌ای نشان داد که عمق حداکثر فرسایش به طور متوسط نسبت به وضعیت بدون کنگره در دو حالت پایاب حداقل و حداکثر به ترتیب ۳۰ و ۶۵ درصد کاهش می‌یابد. همچنین، با افزایش ۷ برابری هد آب روی سرریز، عمق آبشستگی ۱۲ برابر و طول حفره ۱۰ برابر افزایش می‌یابد (Babakhani and Morsali, 2020).

بررسی آبشستگی ناشی از سرریز کلید پیانویی نشان می‌دهد که جت‌های ریزی نقش اصلی در تشکیل حفره و پشته را دارند (Kumar and Ahmad, 2020). همچنین، حداکثر عمق و طول حفره آبشستگی در مدل مستطیلی بیشتر از مدل دوزنقه‌ای است (Yazdi et al., 2021). میزان آبشستگی در بخش میانی پایین دست سرریزهای کلید پیانویی کمتر از قسمت‌های کناری آن است (Abdi choplo et al. 2022). با افزایش عدد فرود، طول نسبی حفره آبشستگی بیشتر می‌شود (Bodaghi et al., 2023). مطالعه آبشستگی پایین دست یک سرریز کلید پیانویی دوزنقه‌ای در یک کانال آزمایشگاهی، بیان می‌کند که عدد فرود بر شکل حفره آبشستگی تاثیر می‌گذارد. علاوه بر این، با توجه به تاثیر آبشستگی بر هزینه‌های ساخت سرریز، تعیین پلان مناسب سرریز کنگره‌ای با کمترین میزان آبشستگی بسیار مهم است (Bodaghi et al., 2025).

بررسی آزمایشگاهی آبشستگی پایین دست سرریز کنگره‌ای مثلی بدون کف‌بند نشان می‌دهد که با افزایش هد آب، علاوه بر افزایش قابل توجه ابعاد حفره آبشستگی، محل تشکیل حفره به سمت مرکز حرکت می‌کند (Babakhani

## ۲- مواد و روش‌ها

### ۲-۱- آنالیز ابعادی

پارامترهای موثر بر آبشستگی نهایی پایین دست سرریزهای کنگره‌ای عبارت از:  $u_{cr}$  سرعت آستانه حرکت ذرات رسوبی،  $u_u$  سرعت ورودی جریان به سرریز کنگره‌ای،  $d_{se}$  حداکثر عمق آبشستگی،  $\gamma_u$  عمق جریان در بالادست سرریز،  $\gamma_d$  عمق پایاب،  $\rho_w$  جرم مخصوص آب،  $\rho_s$  جرم مخصوص ذرات رسوبی،  $g$  شتاب ثقل،  $\nu$  لزجت سینماتیکی آب،  $d_{50}$  قطر میانه ذرات رسوبی،  $W$  عرض سرریز،  $L$  طول تاج سرریز و  $P$  ارتفاع سرریز،  $\alpha$  زاویه راس سرریز و  $N$  تعداد سیکل سرریز می‌باشد. شکل ۱ تعدادی از پارامترهای موثر را نشان می‌دهد. در این شکل  $\gamma_u = P + H$ ،  $H$  ارتفاع آب روی سرریز و  $H_T$  هد آب کل و برابر با  $H + \frac{u_u^2}{2g}$  می‌باشد.

با استفاده از تئوری باکینگهام رابطه زیر به دست آمد:

$$F1\left(\frac{u_{cr}}{u_u}, \frac{d_{se}}{P}, Fr, \frac{\gamma_d}{\gamma_u}, \frac{\rho_s}{\rho_w}, Re, \frac{L}{W}, \frac{P}{W}, \frac{\gamma_u}{P}, \alpha, N\right) = (1)$$

0

با توجه به اینکه  $\gamma_u = P + H$ ، می‌توان به جای  $\frac{\gamma_u}{P}$  از  $\frac{H}{P}$  استفاده کرد که به آن نسبت هد آب می‌گویند. همچنین می‌توان از  $\Delta = \frac{\rho_s}{\rho_w} - 1$  به جای  $\frac{\rho_s}{\rho_w}$  استفاده می‌شود. به جای  $\frac{\gamma_d}{\gamma_u}$  نیز پارامتر آستانه حرکت شیلدز  $\theta_c$  را می‌توان جایگزین نمود. عدد  $Re$  با توجه به وجود جریان آشفته در کانال باز که نیروی ثقل از لزجت اهمیت بیشتری دارد، حذف گردید. بنابراین:

می‌شود. برای اندازه‌گیری تراز سطح آب از چند پوینت گیج ریلی که در طول فلوم قابل حرکت است، استفاده می‌شود.

سرریزهای کنگره‌ای مثلثی تک‌سیکل (TL1) و دو سیکل (TL2) و سرریزهای کنگره‌ای قوسی تک سیکل (CL1) و دو سیکل (CL2) با طول یکسان برابر با ۱/۲۶ متر مورد آزمایش قرار گرفتند.

این سرریزهای کنگره‌ای با نسبت بزرگنمایی (L/W) برابر با ۱/۵۸ در فاصله ۶ متری از ابتدای کانال قرار گرفتند. سرریزها از آهن با ضخامت ۴ میلیمتر و ارتفاع ۳۵ سانتیمتر ساخته شدند. در بالادست سرریز تا ارتفاع ۲۰ سانتیمتر رسوبات درشت دانه ریخته شد. در پایین‌دست سرریز به طول ۷۰ سانتی‌متر و تا ارتفاع ۲۰ سانتیمتر، ذرات رسوبات یکنواخت با قطر میانه ( $D_{50}$ ) برابر با ۳ میلیمتر برای بررسی آبشستگی در کف کانال قرار گرفت. ضریب یکنواختی رسوبات ( $Cu$ ) برابر با ۱/۵ و انحراف هندسی استاندارد ( $\sigma_g$ ) نیز برابر با ۱/۳۲ می‌باشد که نشان‌دهنده وجود رسوبات یکنواخت است (شکل ۳).

بنابراین ۱۵ سانتیمتر از ارتفاع سرریز بالای رسوبات قرار دارد و ۲۰ سانتیمتر آن به عنوان پی سرریز در زیر رسوبات قرار گرفته است. شکل ۴ نمایی از آزمایشات را برای سرریز کنگره‌ای دوقوسی دوسیکل نشان می‌دهد.

پس از قراردادن رسوبات در پایین‌دست سرریز، با استفاده از یک صفحه محافظ، از فرسایش خاک در حین تنظیم عمق پایاب جلوگیری گردید. عمق پایاب در کلیه آزمایش‌ها ۱۰ سانتیمتر تنظیم شد.



Fig. 2 Hydraulic laboratory flume

شکل ۲ فلوم آزمایشگاه هیدرولیک

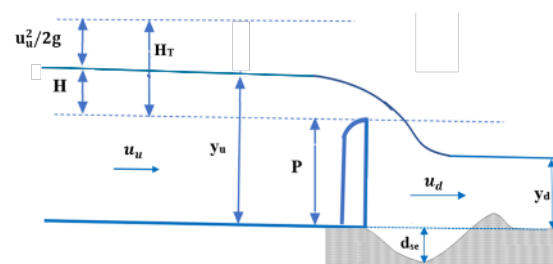


Fig. 1 Schematic of scour downstream of labyrinth weir

شکل ۱ شماتیک آبشستگی پایین‌دست سرریز کنگره‌ای

$$\frac{d_{se}}{P} = F2 \left( \frac{u_{cr}}{u_{in}}, Fr, \theta_c, \frac{y_u}{y_d}, \Delta, \frac{L}{W}, \frac{P}{W}, \frac{H}{P}, \alpha, N \right) \quad (2)$$

در این پژوهش نسبت  $\frac{L}{W}$  و  $\frac{P}{W}$  ثابت می‌باشد. با توجه به عمق پایاب ثابت، نسبت  $\frac{H}{P}$  نماینده  $\frac{y_u}{y_d}$  خواهد بود و عدد  $Fr$  نماینده  $\frac{u_{cr}}{u_u}$  می‌باشد. بنابراین اثر می‌توان آن‌ها را حذف کرد.  $\theta_c$  نیز با توجه به قطر میانه ثابت تنها بر اساس عمق تغییر می‌کند که به جای آن نسبت هد آب  $\frac{H}{P}$ ، استفاده می‌شود. زاویه راس  $\alpha$  و همچنین زاویه سرریز با دیوار کانال، در سرریز قوسی به طور مستقیم قابل استفاده نمی‌باشد. با توجه به اینکه زاویه راس و تعداد سیکل سرریز، اثرشان را بر روی تداخل تیغه‌های ریزشی و استغراق موضعی و نهایتاً بر روی ضریب دبی سرریز می‌گذارد، در رسم نسبت هد آب در برابر ضریب دبی اثرشان بررسی خواهد شد. Tullis et al. (1995) رابطه ۳ را برای سرریز کنگره‌ای ارائه کردند:

$$Q = \frac{2}{3} C_d L \sqrt{2gH_r^3} \quad (3)$$

با توجه به این رابطه و ثابت بودن طول سرریز در تمامی آزمایشات، ضریب دبی تنها در برابر نسبت هد آب کل در یک دبی ثابت تغییر خواهد کرد. نهایتاً در این آزمایشات آبشستگی سرریزها در برابر تغییرات عدد فرود و نسبت هد آب مورد بررسی قرار گرفتند.

## ۲-۲-۲-۲-۲ کانال، رسوبات و سرریزهای کنگره‌ای آزمایشگاهی

آزمایشات مدل هیدرولیکی در فلوم به طول ۱۲ متر و عرض ۸۰ سانتی‌متر انجام گرفت (شکل ۲). دبی توسط دبی سنج اولتراسونیک با دقت  $\pm 0.1\%$  لیتر در ثانیه اندازه‌گیری

قوسی تک سیکل را نشان می‌دهد. بیشینه عمق آبشستگی در نزدیکی محل اتصال سرریز به دیواره کانال رخ داده است که برابر با ۷۷ میلی‌متر می‌باشد. با حرکت به سمت راس سرریز، عمق آبشستگی بیشینه در نزدیک راس ۴۷ میلی‌متر خواهد شد که ۳۹٪ آبشستگی کمتری نسبت به کناره سرریز را نشان می‌دهد. وجود انحنای عرضی جریان در دیواره‌های کناری سرریز و برخورد جت‌های عرضی به دیواره، سبب ایجاد آشفته‌گی جریان و آبشستگی بیشتر رسوبات در کناره‌ها شده است.

**شکل ۶** پروفیل آبشستگی را برای دبی ۱۰ لیتر بر ثانیه نشان می‌دهد. میزان حداکثر آبشستگی به ۱۱۶ میلی‌متر افزایش یافته است که نسبت به دبی ۵ لیتر بر ثانیه ۵۰٪ افزایش نشان می‌دهد. با حرکت به سمت راس سرریز، میزان بیشینه آبشستگی کاهش می‌یابد و به ۶۳ میلی‌متر می‌رسد که ۴۶٪ آبشستگی کمتری را نسبت به کناره‌ها نشان می‌دهد.

**شکل ۷** پروفیل آبشستگی را برای دبی ۱۵ لیتر بر ثانیه نشان می‌دهد. بر طبق **این شکل**، میزان حداکثر آبشستگی به ۱۵۵ میلی‌متر افزایش یافته است که ۳۴٪ از دبی ۱۰ لیتر بر ثانیه و ۱۰۱٪ از دبی ۵ لیتر بر ثانیه بیشتر می‌باشد. همچنین میزان بیشینه فرسایش با حرکت به سمت راس کانال به ۹۸ میلی‌متر می‌رسد که ۳۷٪ کمتر از آبشستگی کناره‌ها می‌باشد. همانطور که بیان شد، تداخل تیغه‌های ریزشی در کناره سرریز با دیواره به همراه انحنای عرضی

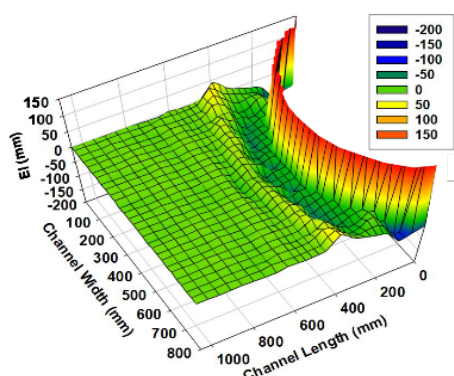


Fig. 5 Sediment scouring profile for discharge of 5 lit/s and single-cycle arch labyrinth weir

**شکل ۵** پروفیل آبشستگی در دبی ۵ لیتر بر ثانیه و سرریز کنگره‌ای قوسی تک سیکل

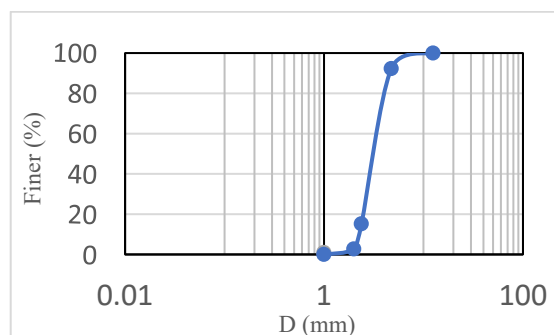


Fig. 3 Grain size distribution curve of the sediments

**شکل ۳** منحنی دانه‌بندی رسوبات



Fig. 4 Two-cycle arched labyrinth weir in experiments

**شکل ۴** سرریز کنگره‌ای قوسی دو سیکل در آزمایشات

برای از بین بردن اثر تغییرات عمق پایاب در محاسبات، عمق پایاب ثابت گرفته شد و برای ثابت نگه‌داشتن آن، ارتفاع سرریز پایین دست کانال تغییر پیدا کرد. پس از تثبیت عمق پایاب، صفحه محافظ از روی سطح خاک برداشته می‌شود تا پدیده آبشستگی رخ دهد. نتایج حاصل از آزمایش اولیه به مدت ۱۲ ساعت، نشان داد که تغییرات آبشستگی در بازه زمانی کمتر از ۴ ساعت حاصل شده است که با اعمال ضریب اطمینان، مدت زمان ۶ ساعت به عنوان زمان انجام آزمایش در نظر گرفته شد. اسمعیلی ورکی و همکاران (Emaeli Varaki et al, 2017) نیز زمان تعادل را برای آزمایش آبشستگی بر روی سرریز کنگره‌ای ۶ ساعت در نظر گرفتند. توپوگرافی پایاب با مش‌بندی ۳×۳ سانتی‌متر با پوینت گیج اندازه‌گیری گردید. داده‌های به دست آمده در نرم‌افزار سیگما پلات ترسیم شده تا شکل سه‌بعدی آبشستگی برای هر یک از آزمایشات حاصل شود.

### ۳- نتایج و بحث

**شکل ۵** پروفیل آبشستگی برای دبی ۵ لیتر بر ثانیه در پلان

می‌دهد. این در حالی است که میزان افزایش بیشینه آبشستگی در سرریز دو سیکل قوسی و در دبی ۵ لیتر بر ثانیه نسبت به سرریز تک سیکل، ۴۴٪ بوده است. بنابراین می‌توان گفت روند افزایش آبشستگی در سرریز تک سیکل با افزایش دبی بیشتر از سرریز دو سیکل بوده است.

**شکل ۱۰** پروفیل آبشستگی رسوبات را برای دبی ۱۵ لیتر بر ثانیه و در سرریز قوسی دو سیکل نشان می‌دهد. بیشینه آبشستگی ۱۴۱ میلی‌متر در کناره‌ها، ۱۴۰ میلی‌متر در محل تقاطع سیکل‌ها و ۶۲ میلی‌متر در راس سرریز می‌باشد. بنابراین آبشستگی در محل تقاطع به کناره نزدیک شده است.

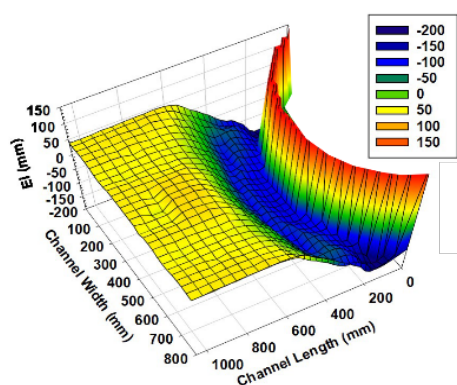


**Fig. 7** Sediment scouring profile for discharge of 10 lit/s and single-cycle arch labyrinth weir

**شکل ۷** پروفیل آبشستگی در دبی ۱۰ لیتر بر ثانیه و سرریز کنگره‌ای قوسی تک سیکل

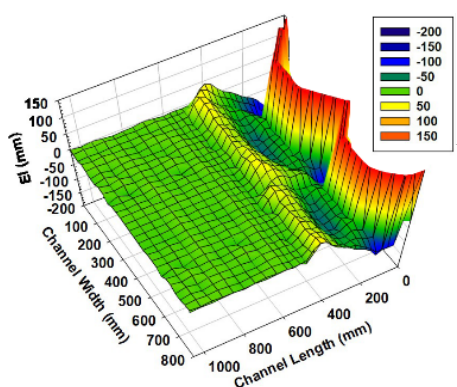


**Fig. 8** Scouring profile at discharge of 5 lit/s and two-cycle arch labyrinth weir

**شکل ۸** پروفیل آبشستگی در دبی ۵ لیتر بر ثانیه و سرریز کنگره‌ای دو سیکل قوسی

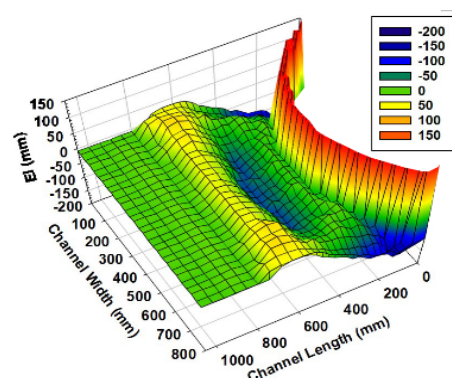


**Fig. 6** Sediment scouring profile for discharge of 10 lit/s and single-cycle arch labyrinth weir

**شکل ۶** پروفیل آبشستگی در دبی ۵ لیتر بر ثانیه و سرریز کنگره‌ای قوسی تک سیکل

شدید جریان در کناره، سبب ایجاد آشفستگی و در نتیجه آبشستگی بیشتر در کناره نسبت به راس شده است.

**شکل ۸** پروفیل آبشستگی را برای دبی ۵ لیتر بر ثانیه در سرریز کنگره‌ای قوسی دو سیکل نشان می‌دهد. بیشینه آبشستگی ۱۱۱ میلی‌متر در کناره‌ها و ۹۹ میلی‌متر در تقاطع بین دو سیکل می‌باشد. حداکثر آبشستگی در راس سرریزها ۹۹ میلی‌متر است که نشان‌دهنده بیشینه آبشستگی یکسان در رؤوس سرریز با محل تقاطع دو سرریز می‌باشد. همچنین آبشستگی در محل تقاطع دو سیکل کاهش ۱۱٪ نسبت به آبشستگی در کناره را نشان می‌دهد. بنابراین در محل تقاطع دو سیکل مانند کناره‌ها، آشفستگی به علت وجود تداخل تیغه‌های ریزشی و انحنای عرضی جریان، بیشینه است. بیشینه آبشستگی در کناره، نسبت به سرریز قوسی تک سیکل ۴۴٪ افزایش را نشان می‌دهد که تفاوت زیادی را در دبی ۵ لیتر بر ثانیه نشان می‌دهد.

**شکل ۹** پروفیل آبشستگی را برای دبی ۱۰ لیتر بر ثانیه در سرریز قوسی دو سیکل نشان می‌دهد. بیشینه آبشستگی ۱۲۰ میلی‌متر در کناره‌ها، ۸۸ میلی‌متر در محل تقاطع سیکل‌ها و ۵۷ میلی‌متر در راس سرریز می‌باشد که آبشستگی در محل تقاطع سیکل‌ها، ۲۷٪ و در رؤوس ۲۷٪ کمتر از آبشستگی در کناره‌ها بوده است. نتایج نشان می‌دهد که بیشینه آبشستگی در دبی ۱۰ لیتر بر ثانیه ۸٪ بیشتر از دبی ۵ لیتر بر ثانیه است. همچنین آبشستگی بیشینه نسبت به دبی ۱۰ لیتر بر ثانیه تک سیکل ۳٪ افزایش را نشان

افزایش و در نتیجه آبشستگی زیاد می‌شود.

**شکل ۱۲** تغییرات عدد فرود در بالادست سرریز نسبت به عمق آبشستگی برای دو سرریز کنگره‌ای تک سیکل و دو سیکل را نشان می‌دهد. بر طبق **این شکل**، با افزایش عدد فرود عمق آبشستگی افزایش یافته است، اما روند افزایشی عمق آبشستگی در سرریز تک سیکل قوسی بیشتر از سرریز دو سیکل قوسی بوده است. اعداد فرود در سرریز تک سیکل بیشتر از دو سیکل می‌باشد و سبب تشدید آبشستگی می‌گردد. البته باید در نظر گرفت که علاوه بر عدد فرود، تداخل تیغه‌های ریزشی و سرعت جت ورودی به پایین دست می‌تواند در عمق آبشستگی موثر باشند.

**شکل ۱۳** میزان آبشستگی برای دبی ۵ لیتر بر ثانیه را نشان می‌دهد. بیشینه آبشستگی ۸۷ میلی‌متر در کناره‌ها و ۵۸ میلی‌متر در نزدیکی راس سرریز می‌باشد که ۳۳٪ کاهش را در نزدیکی راس نشان می‌دهد. بیشینه آبشستگی در سرریز تک سیکل مثلثی ۱۳٪ بیشتر از سرریز تک سیکل قوسی در دبی ۵ لیتر بر ثانیه می‌باشد.

**شکل ۱۴** میزان آبشستگی در رسوبات برای دبی ۱۰ لیتر بر ثانیه را نشان می‌دهد. بیشینه آبشستگی ۹۵ میلی‌متر در کناره‌ها و ۶۶ میلی‌متر به سمت راس سرریز می‌باشد که ۳۰٪ کاهش آبشستگی در نزدیک راس را نشان می‌دهد. همچنین سرریز تک سیکل مثلثی ۱۸٪ کاهش آبشستگی را نسبت به سرریز تک سیکل قوسی در دبی ۱۰ لیتر بر ثانیه نشان می‌دهد، این در حالی است که در دبی ۵ لیتر بر ثانیه، آبشستگی سرریز تک سیکل مثلثی بیشتر بوده است. این مساله نشان‌دهنده سرعت بیشتر افزایش عمق آبشستگی در سرریز پلان مثلثی است.

**شکل ۱۵** میزان آبشستگی در رسوبات برای دبی ۱۵ لیتر بر ثانیه را نشان می‌دهد. بیشینه آبشستگی ۱۳۳ میلی‌متر در کناره‌ها و ۹۱ میلی‌متر در نزدیکی راس سرریز می‌باشد که ۳۲٪ کاهش آبشستگی در نزدیک راس را نشان می‌دهد. همچنین بیشینه آبشستگی در سرریز تک سیکل مثلثی ۱۴٪ کمتر از سرریز تک سیکل قوسی است.

**شکل ۱۶** پروفیل آبشستگی برای دبی ۵ لیتر بر ثانیه را در

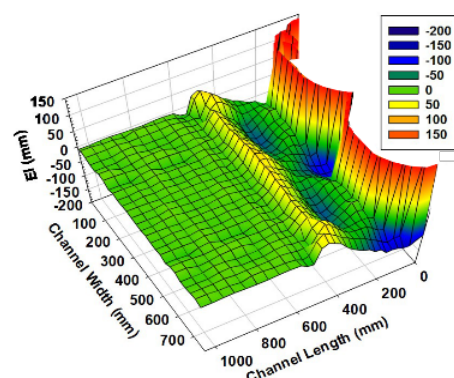


Fig. 9 Scouring profile discharge of 10 lit/s and two-cycle arched labyrinth weir

**شکل ۹** پروفیل آبشستگی در دبی ۱۰ لیتر بر ثانیه و سرریز کنگره‌ای دو سیکل قوسی

میزان آبشستگی بیشینه در کناره‌ها ۲۷٪ افزایش را نسبت به دبی ۵ لیتر بر ثانیه و ۱۸٪ افزایش را نسبت به دبی ۱۰ لیتر بر ثانیه نشان می‌دهد. همچنین بیشینه آبشستگی نسبت به دبی ۱۵ لیتر بر ثانیه در سرریز تک سیکل، ۹٪ کاهش پیدا کرده است. همانطور که مشاهده می‌شود در دبی ۵ لیتر بر ثانیه، میزان آبشستگی در سرریز کنگره‌ای قوسی دو سیکل بیشتر از تک سیکل می‌باشد، اما با افزایش دبی، آبشستگی بیشینه در سرریز دو سیکل کمتر از تک سیکل شده است. این مساله نشان می‌دهد که روند افزایش آبشستگی در سرریز تک سیکل با افزایش دبی، بیشتر از سرریز دو سیکل بوده است.

در سرریز تک سیکل، ۱۷٪ کاهش ضریب دبی از دبی ۵ تا ۱۵ لیتر بر ثانیه وجود دارد که برای سرریز دو سیکل به ۸٪ کاهش ضریب دبی رسیده است. از طرفی افزایش آبشستگی با افزایش دبی از ۵ به ۱۵ لیتر بر ثانیه در سرریز تک سیکل قوسی ۱۰٪ و در سرریز دو سیکل قوسی ۲۷٪ بوده است. (**شکل ۱۱**). بنابراین، تغییرات سریع‌تر در کاهش عملکرد سرریز تک سیکل قوسی نسبت به سرریز دو سیکل قوسی، سبب افزایش بیشتر در آبشستگی آن شده است. کاهش سریع‌تر ضریب دبی در سرریز تک سیکل، سبب افزایش سریع‌تر عمق و افزایش بیشتر تداخل تیغه‌های ریزشی می‌شود که می‌تواند برهم‌خوردگی جریان در پایین دست را افزایش داده و عمق آبشستگی را بیشتر کند. از طرفی با افزایش سریع‌تر عمق، سرعت جت ورودی به پایین دست

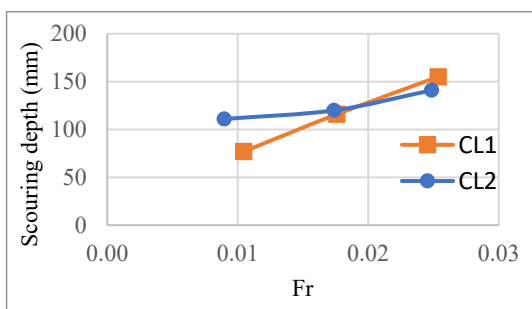


Fig. 12 Changes in Froude number versus scouring

شکل ۱۲ تغییرات عدد فرود در برابر آبستگي

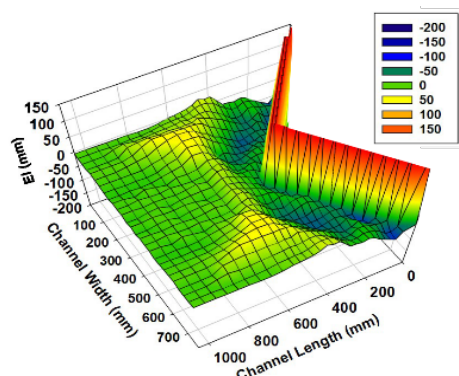


Fig. 13 Scouring profile at discharge of 5 lit/s and single-cycle triangular labyrinth weir

شکل ۱۳ پروفیل آبستگي رسوبات برای دبی ۵ لیتر بر ثانیه و سرریز کنگره‌ای مثلثی تک سیکل

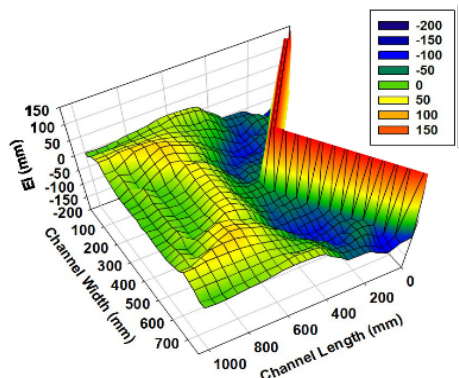


Fig. 14 Scouring profile at discharge of 10 lit/s and single-cycle triangular labyrinth weir

شکل ۱۴ پروفیل آبستگي رسوبات برای دبی ۱۰ لیتر بر ثانیه و سرریز کنگره‌ای مثلثی تک سیکل

شکل ۱۷ پروفیل آبستگي رسوبات را برای دبی ۱۰ لیتر بر ثانیه در سرریز کنگره‌ای مثلثی دو سیکل نشان می‌دهد. بیشینه آبستگي ۱۰۱ میلی‌متر در کناره‌ها، ۷۷ میلی‌متر در محل تقاطع دو سیکل و ۴۳ میلی‌متر در راس سرریز

سرریز دو سیکل مثلثی نشان می‌دهد. بیشینه آبستگي ۹۴ میلی‌متر در کناره‌ها، ۷۵ میلی‌متر در محل تقاطع دو سیکل سرریز و ۵۰ میلی‌متر می‌باشد. بنابراین میزان آبستگي بیشینه کناره، ۲۰٪ در محل تقاطع دو سیکل و ۴۷٪ در راس کاهش می‌یابد. در این سرریز نیز وجود تیغه ریزشی و انحناي عرضی جریان در کناره سرریز و تداخل تیغه‌های ریزشی و وجود انحناي عرضی جریان در محل تقاطع دو سیکل، سبب آشفته‌گي و در نتیجه آبستگي بیشتر شده است.

میزان بیشینه آبستگي در رسوبات در سرریز کنگره‌ای قوسی دو سیکل برای دبی ۵ لیتر در ثانیه برابر ۱۱۱ میلی‌متر در کناره‌ها می‌باشد. بنابراین میزان آبستگي در رسوبات در کناره‌ها ۱۵٪ در سرریز دو سیکل مثلثی نسبت به سرریز دو سیکل قوسی کاهش نشان می‌دهد.

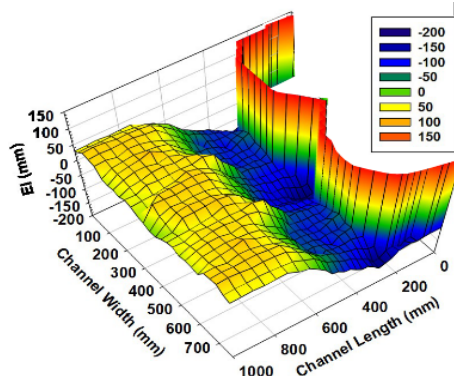


Fig. 10 Scouring profile at discharge of 15 lit/s and two-cycle arched labyrinth weir

شکل ۱۰ پروفیل آبستگي در دبی ۱۵ لیتر بر ثانیه و سرریز کنگره‌ای قوسی دو سیکل

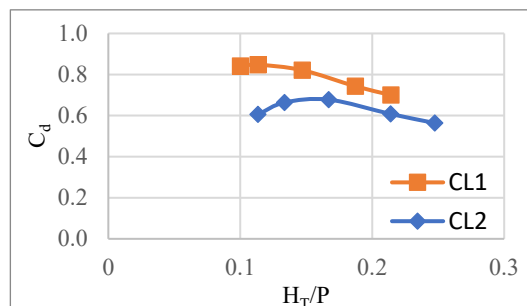


Fig. 11 Changes in discharge coefficient versus water head ratio

شکل ۱۱ تغییرات ضریب دبی در برابر نسبت هد آب

آبستگی بیشینه در محل تقاطع دو سیکل ۳۰٪ و در راس سرریز ۵۷٪ نسبت به کناره‌ها کاهش نشان می‌دهد. میزان آبستگی بیشینه در کناره‌ها، ۳۰٪ افزایش نسبت به دبی ۱۰ لیتر بر ثانیه و ۳۹٪ افزایش نسبت به دبی ۵ لیتر بر ثانیه نشان می‌دهد. میزان بیشینه آبستگی در سرریزهای کنگره‌ای قوسی دو سیکل برای دبی ۱۵ لیتر بر ثانیه برابر ۱۴۱ میلی‌متر در کناره‌ها می‌باشد. بنابراین میزان آبستگی برای سرریز دو سیکل مثلی نسبت به سرریز دو سیکل قوسی، ۷٪ کاهش نشان می‌دهد.

**شکل ۱۹** تغییرات ضریب دبی در سرریز کنگره‌ای تک سیکل و دو سیکل مثلی را نشان می‌دهد. سرریز تک سیکل مثلی در دبی ۵ لیتر بر ثانیه، راندمان بهتری از سرریز دو سیکل دارد و با افزایش دبی، راندمان آن با سرعت بیشتری

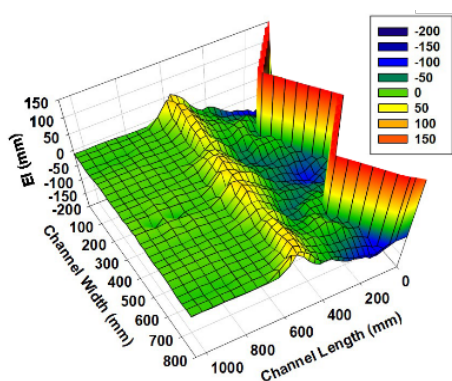


Fig. 17 Scouring profile at discharge of 10 lit/s and two-cycle triangular labyrinth weir

**شکل ۱۷** پروفیل آبستگی رسوبات برای دبی ۱۰ لیتر بر ثانیه و سرریز کنگره‌ای مثلی دو سیکل

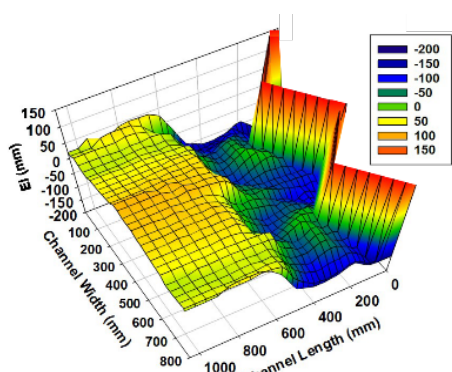


Fig. 18 Scouring profile at discharge of 15 lit/s and two-cycle triangular labyrinth weir

**شکل ۱۸** پروفیل آبستگی رسوبات برای دبی ۱۵ لیتر بر ثانیه و سرریز کنگره‌ای مثلی دو سیکل

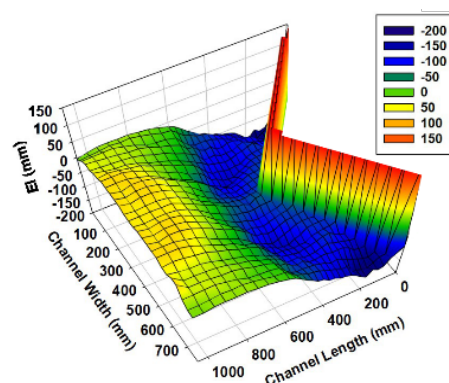


Fig. 15 Scouring profile at discharge of 15 lit/s and single-cycle triangular labyrinth weir

**شکل ۱۵** پروفیل آبستگی رسوبات برای دبی ۱۵ لیتر بر ثانیه و سرریز کنگره‌ای مثلی تک سیکل

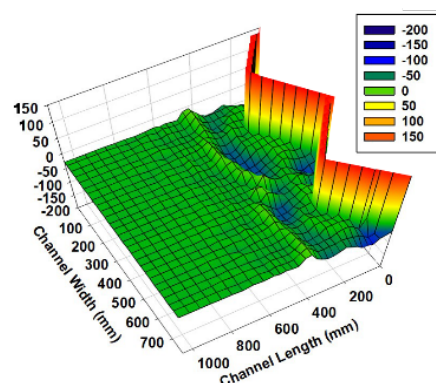


Fig. 16 Scouring profile at discharge of 5 lit/s and two-cycle triangular labyrinth weir

**شکل ۱۶** پروفیل آبستگی رسوبات برای دبی ۵ لیتر بر ثانیه و سرریز کنگره‌ای مثلی دو سیکل

می‌باشد. بنابراین بیشینه آبستگی در کناره سرریز، ۲۱٪ در محل تقاطع دو سیکل و ۵۷٪ در راس کاهش نشان می‌دهد. میزان آبستگی بیشینه در کناره‌ها، ۷٪ افزایش را نسبت به دبی ۵ لیتر بر ثانیه نشان می‌دهد. همچنین، میزان بیشینه آبستگی در سرریز دو سیکل قوسی برای دبی ۱۰ لیتر بر ثانیه ۱۲۰ میلی‌متر می‌باشد و بنابراین میزان بیشینه آبستگی، ۱۶٪ کاهش نسبت به سرریز دو سیکل قوسی نشان می‌دهد.

**شکل ۱۸** پروفیل آبستگی را برای دبی ۱۵ لیتر بر ثانیه در سرریز مثلی دو سیکل نشان می‌دهد. بیشینه آبستگی ۱۳۱ میلی‌متر در کناره‌ها، ۹۲ میلی‌متر در محل تقاطع دو سیکل و ۵۶ میلی‌متر در راس سرریز می‌باشد. بنابراین

بیشتری از سرریز رخ می‌دهد. بر طبق این شکل، نسبت آبشستگی در دبی ۵ لیتر بر ثانیه ۰/۵۱، در دبی ۱۰ لیتر بر ثانیه ۰/۷۷ و در دبی ۱۵ لیتر بر ثانیه ۱/۰۳ می‌باشد. در ۱۵ لیتر بر ثانیه، بیشینه عمق آبشستگی از ارتفاع سرریز بیشتر شده که در فاصله ۹۰ میلیمتری از سرریز رخ داده است. بنابراین، عمق زیاد آبشستگی نشان‌دهنده اهمیت ساخت پی مناسب و یا اقدامات حفاظتی برای جلوگیری از آبشستگی در سرریزهای کنگره‌ای می‌باشد.

شکل ۲۲ عمق آبشستگی در سرریز دو سیکل قوسی نشان می‌دهد. بر طبق این شکل، نسبت آبشستگی در دبی ۵ لیتر بر ثانیه ۰/۷۴، در دبی ۱۰ لیتر بر ثانیه ۰/۸ و در دبی ۱۵ لیتر بر ثانیه ۰/۹۴ می‌باشد. همچنین بیشینه عمق آبشستگی در داده است که فاصله آن نسبت به سرریز تک سیکل ۳ برابر دبی ۱۵ لیتر بر ثانیه در فاصله ۲۷۰ میلیمتر از سرریز رخ شده است. بیشینه نسبت آبشستگی بی‌بعد در سرریز دو سیکل قوسی کمتر از یک شده است، بدین معنی که حداکثر آبشستگی، از ارتفاع سرریز کمتر شده است.

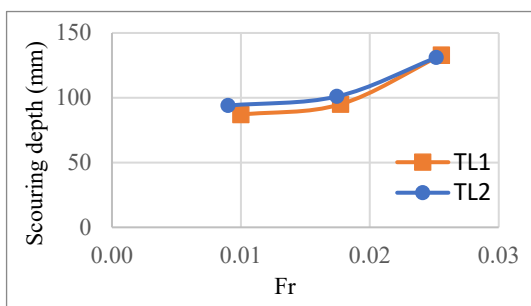


Fig. 20 Changes in Froude number versus scouring

شکل ۲۰ تغییرات عدد فرود در برابر آبشستگی

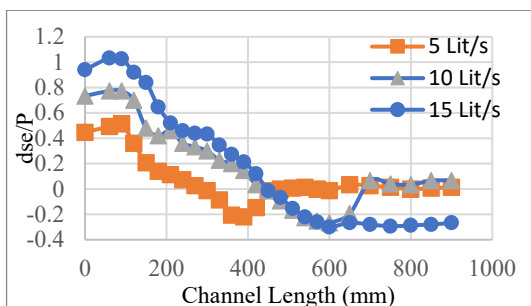


Fig. 21 Final scouring changes on a single-cycle arched labyrinth weir

شکل ۲۱ تغییرات آبشستگی نهایی در سرریز کنگره‌ای قوسی تک سیکل

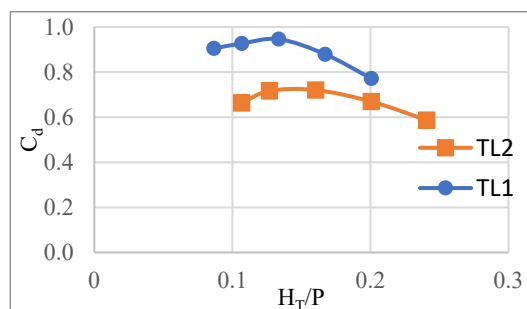


Fig. 19 Changes in discharge coefficient versus water head ratio

شکل ۱۹ تغییرات ضریب دبی در برابر نسبت هد آب

کاهش می‌یابد.

در سرریز تک سیکل، ۱۵٪ کاهش ضریب دبی از دبی ۵ تا ۱۵ لیتر بر ثانیه وجود دارد که برای سرریز دو سیکل به ۱۰٪ کاهش ضریب دبی رسیده است. از طرفی، در سرریز تک سیکل مثلی ۵۳٪ افزایش آبشستگی از دبی ۵ تا ۱۵ لیتر بر ثانیه بوجود می‌آید، در صورتی که در سرریز دو سیکل، ۳۹٪ افزایش آبشستگی با تغییر دبی از ۵ به ۱۵ لیتر بر ثانیه بوجود آمده است (شکل ۲۰). بنابراین روند کاهش ضریب دبی با افزایش آبشستگی همخوانی دارد.

شکل ۲۰ تغییرات عدد فرود در بالادست سرریز، نسبت به عمق آبشستگی برای دو سرریز کنگره‌ای مثلی تک سیکل و دو سیکل را نشان می‌دهد. عدد فرود در سرریز تک سیکل مثلی کمی بیشتر از سرریز دو سیکل بوده است، اما عمق آبشستگی آن مقداری کمتر شده است. بنابراین تداخل تیغه‌های ریزی و ایجاد آشفتگی در محل تقاطع دو سیکل و تقاطع سرریز با کناره در سرریز دو سیکل، سبب آبشستگی بیشتر نسبت به سرریز تک سیکل شده است. عدد فرود بیشتر در سرریز تک سیکل نیز سبب شده است که فاصله عمق آبشستگی آن به سرریز دو سیکل نزدیک شده باشد. این در حالی است که فاصله آبشستگی در سرریز تک سیکل و دو سیکل قوسی بیشتر بوده است.

شکل ۲۱ مقادیر آبشستگی نهایی ایجاد شده را در خط طولی کناره کانال به صورت بی‌بعد نشان می‌دهد. مقدار  $\frac{d_{se}}{p}$  نسبت عمق نهایی آبشستگی به ارتفاع سرریز (نسبت آبشستگی بی‌بعد) می‌باشد. با افزایش دبی، تیغه‌های ریزی به جلوتر پرتاب می‌شوند و بیشینه عمق آبشستگی در فاصله

استفاده کرد. همچنین همانطور که بیان شد، سرریز تک‌سیکل مثلی دارای ضریب دبی بالاتر است و آبستگی آن نسبت به سرریز دو سیکل مثلی، تفاوت زیادی ندارد. بنابراین بهترین گزینه برای طراحی هیدرولیکی و سازه‌ای خواهد بود.

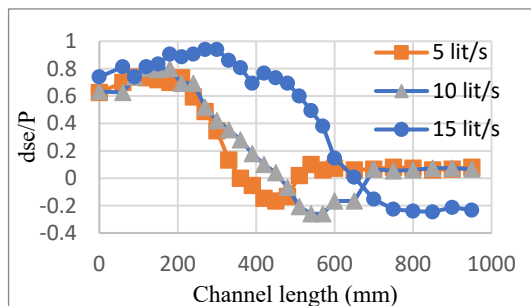


Fig. 22 Final scouring changes in a two-cycle arched labyrinth weir

شکل ۲۲ تغییرات آبستگی نهایی در سرریز کنگره‌ای قوسی دو سیکل

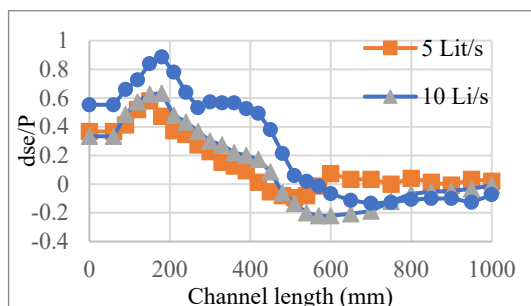


Fig. 23 Final scour changes in a single-cycle triangular labyrinth weir

شکل ۲۳ تغییرات آبستگی نهایی در سرریز کنگره‌ای مثلی تک سیکل

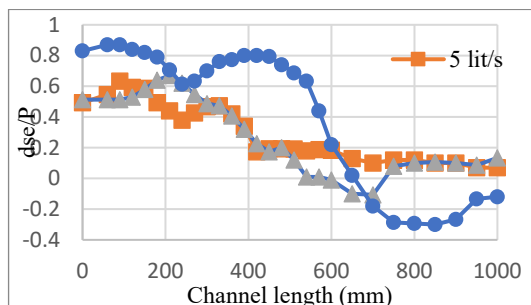


Fig. 24 Final scouring changes in a two-cycle triangular labyrinth weir

شکل ۲۴ تغییرات آبستگی نهایی در سرریز کنگره‌ای مثلی دو سیکل

بنابراین سرریز دو سیکل قوسی با اینکه ضریب دبی و عملکرد کمتری نسبت به سرریز تک سیکل قوسی دارد، اما می‌تواند گزینه مناسب‌تری از نظر سازه‌ای در مقابل آبستگی باشد.

**شکل ۲۳** عمق آبستگی در سرریز تک سیکل مثلی را نشان می‌دهد. بر طبق **این شکل**، نسبت آبستگی در دبی ۵ لیتر بر ثانیه ۰/۵۸، در دبی ۱۰ لیتر بر ثانیه ۰/۶۳ و در دبی ۱۵ لیتر بر ثانیه ۰/۸۹ می‌باشد. همچنین، بیشینه عمق آبستگی در دبی ۱۵ لیتر بر ثانیه در فاصله ۱۸۰ میلی‌متر از سرریز رخ داده است.

**شکل ۲۴** عمق آبستگی در سرریز دو سیکل مثلی را نشان می‌دهد. بر طبق **این شکل**، نسبت آبستگی در دبی ۵ لیتر بر ثانیه ۰/۶۳، در دبی ۱۰ لیتر بر ثانیه ۰/۶۷ و در دبی ۱۵ لیتر بر ثانیه ۰/۸۷ می‌باشد. همچنین، بیشینه عمق آبستگی در دبی ۱۵ لیتر بر ثانیه در فاصله ۹۰ میلی‌متر از سرریز رخ داده است که نسبت به سرریز تک سیکل در فاصله کمتری از سرریز بوجود آمده است. نسبت بیشینه آبستگی بی‌بعد در حالت دو سیکل کمتر از یک سیکل بوده است. بنابراین استفاده از سرریز دو سیکل مثلی نسبت به تک سیکل، با اینکه ضریب دبی کمتر و راندمان کمتری دارد، اما بدلیل عمق آبستگی کمتر، از نظر سازه‌ای مناسب‌تر خواهد بود.

اختلاف نسبت آبستگی بی‌بعد برای سرریز تک سیکل و دو سیکل قوسی ۰/۱۶ و برای سرریز تک سیکل و دو سیکل مثلی ۰/۰۲ است. بنابراین در صورت نیاز به طراحی سرریز کنگره‌ای با پلان مثلی که دارای ضریب دبی بهتری از سرریز کنگره‌ای قوسی است، طراحی به صورت تک سیکل و دو سیکل تفاوت زیادی را از نظر آبستگی ایجاد نمی‌کند. اما در سرریز دارای پلان قوسی، افزایش انتخاب تعداد سیکل می‌تواند اثر قابل توجهی بر آبستگی بگذارد و بهتر است از تعداد سیکل بیشتری برای کاهش عمق آبستگی استفاده کرد، گرچه ضریب دبی و عملکرد آن کاهش خواهد داشت. به طور کلی، سرریز کنگره‌ای مثلی علاوه بر ضریب دبی بالاتر و عملکرد مناسب‌تر، آبستگی کمتری را نشان می‌دهد. بنابراین بهتر است که از سرریز کنگره‌ای مثلی

## ۴- نتیجه‌گیری

این پژوهش با هدف بررسی الگوی آبشستگی پایین‌دست سرریزهای کنگره‌ای انجام شد. یافته‌ها بیان می‌کند که بیشینه عمق آبشستگی در مجاورت نقطه اتصال سرریز به دیواره‌های جانبی کانال رخ می‌دهد. در سرریزهای تک‌سیکل، دومین بیشینه در ناحیه راس سرریز تشکیل می‌شود، در حالی که در سرریزهای دوسیکل، دومین و سومین بیشینه به ترتیب در محل تقاطع دو سیکل (میان کانال) و راس سرریز مشاهده شدند. این الگو عمدتاً ناشی از ایجاد آشفتگی شدید جریان در نواحی دارای انحنای عرضی و تداخل تیغه‌های ریزشی است. در کناره‌ها و نیز محل تقاطع سیکل‌ها، برخورد و تداخل این تیغه‌ها، انرژی جنبشی متمرکزی ایجاد می‌کند که منجر به آبشستگی قابل توجه‌تر نسبت به نواحی راس می‌شود.

همچنین، اگرچه عدد فرود پارامتر موثری است، اما نتایج (J. M.).

All authors have read and agreed to the published version of the manuscript.

## Funding

No funding has been made.

## Data Availability Statement

All data is provided in the article.

## Conflicts of Interest

The authors declare no conflict of interest.

## References

- Abdi Chooiplou, C., Ghodsian, M., Vaghefi, M. V., Kazerooni, S. and Bodaghi, E. (2022). Experimental Study of Effect of Flow Drop Height on Downstream Bed Topography of Type-A Trapezoidal Piano Key Weir. *Journal of New Approaches in Water Engineering and Environment*, 1(1), pp.113-124, <https://doi.org/10.22034/nawee.2023.345240.1009>. (in Persian)
- Akhtari, R., and Sanei, M. (2006). Estimating the rate of scour downstream of waterfall weirs, National Conference on Irrigation and Drainage Network Management, Faculty of Water Sciences. Shahid Chamran University of Ahvaz. (in Persian)
- Babakhani, A. and Morsali, M. (2020). Investigation on the effect of different parameters on

نشان می‌دهد که در شرایط با عدد فرود مشابه، الگوی خطوط جریان و میزان آشفتگی ناشی از هندسه سرریز، عامل تعیین‌کننده‌تری در توزیع مکانی و عمق آبشستگی است. کاهش سریع‌تر ضریب دبی در سرریزهای تک‌سیکل نسبت به دوسیکل با افزایش هد نسبی، سبب افزایش سریع‌تر عمق و ایجاد تداخل بیشتر تیغه‌های ریزشی شده و منجر به افزایش برهم‌خوردگی جریان و نهایتاً افزایش سریع‌تر نرخ آبشستگی در آن‌ها می‌شود.

نسبت بی‌بعد عمق آبشستگی به ارتفاع سرریز، نشان‌دهنده عملکرد سازه‌ای بهتر در سرریزهای دوسیکل، علیرغم کارایی هیدرولیکی (ضریب دبی) پایین‌تر آن‌ها است. در سرریز کنگره‌ای قوسی، انتخاب سرریز دوسیکل، سبب آبشستگی کمتری می‌شود اما در سرریز کنگره‌ای مثلی با توجه به تفاوت ناچیز آبشستگی در نسبت‌های هد کم، بهتر است از سرریز تک سیکل با عملکرد هیدرولیکی بالاتر استفاده شود.

## 5- List of symbols

|                  |                                          |
|------------------|------------------------------------------|
| $u_{cr}(m/s)$    | Threshold velocity of sediment particles |
| $u_u(m/s)$       | upstream flow velocity                   |
| $d_{se}(m)$      | maximum scour depth                      |
| $y_u(m)$         | upstream flow depth                      |
| $y_d(m)$         | tailwater depth                          |
| $\rho_w(kg/m^3)$ | water specific gravity                   |
| $\rho_s(kg/m^3)$ | specific gravity of sediment particles   |
| $G(m/s^2)$       | gravity acceleration                     |
| $\nu(m^2/s)$     | kinematic viscosity of water             |
| $d_{50}(m)$      | median diameter of sediment particles    |
| $W(m)$           | weir width                               |
| $L(m)$           | weir crest length                        |
| $P(m)$           | weir height                              |
| $Re(-)$          | Reynolds number                          |
| $\theta_c(-)$    | Shields threshold                        |
| TL1              | One-cycle triangular labyrinth weirs     |
| TL2              | Two-cycle triangular labyrinth weirs     |
| CL1              | One-cycle arced labyrinth weirs          |
| CL2              | Two-cycle arced labyrinth weirs          |

## Acknowledgments

We would like to thank the Department of Water Science and Engineering, Arak University, for providing laboratory facilities for the research.

## Credit Authorship Contribution Statement

Conceptualization, (J. M.); Methodology, (G. J. and J. M.); data collection and analysis, (G. J. and J. M.); Writing-Original Draft Preparation, (G. J. and J. M.); Writing-Review and Editing, (J. M.); Supervision,

- maximum scour depth at triangular labyrinth weir without apron. MCEJ, 20 (1), pp.25-34. <https://doi.org/20.1001.1.24766763.1399.20.1.14.0> (in Persian)
- Bodaghi, E, Abdi Chooplou, C. and Ghodsian, M. (2024). Experimental investigation of scour downstream of a type A trapezoidal piano key weir under free and submerged flow conditions. Journal of Hydrology and Hydromechanics, 72(1), pp.34-48, <https://doi.org/10.2478/johh-2023-0041>.
- Bodaghi, E., Ghodsian, M. and abdi, C. (2023). The experimental study of downstream scouring of trapezoidal Piano key weir type A under free and submerged flow. Journal of Hydraulics, 18(1), pp. 1-18, <https://doi.org/10.30482/jhyd.2022.330389.1590> (in Persian)
- Emaeeli Varaki, M. Rajayee, A. and Shafiei sabet, B. )2017(. Laboratory Study on Local Scour at the Downstream of Grade Control Structures with Labyrinth Planform. Irrigation and Drainage Structures Engineering Research, 18(68), pp.129-142, <https://doi.org/10.22092/aridse.2017.106469.1091>. (In Persian).
- Homayooni, M. and Mozaffari, J. (2024). Investigating the impact of clay percentage on scouring downstream of labyrinth weirs. Journal of Hydroinformatics, 26 (9), pp.2187–2196, <https://doi.org/10.2166/hydro.2024.049>
- kazempour larsari, Z., Esmaceli Varaki, M. and Malekpour, A. (2019). Laboratory Study of Scour Downstream of Stepped-labyrinth Weirs. Iranian Journal of Soil and Water Research, 49(6), 1227-1241, <https://doi.org/10.22059/ijswr.2018.246313.667796>. (in Persian)
- Kumar, B., & Ahmad, Z. (2020). Experimental study on scour downstream of a piano key weir with nose. 8th IAHR ISHS. Santiago, Chile.
- Mousavi, S.M., Shafaei-Bajestan M. and Bina M., (2006). Investigation and determination of the maximum scour depth downstream of a stepped weir under drop flow conditions, 7th International Seminar on River Engineering. Shahid Chamran University, Ahvaz. (in Persian)
- Saeidi Nejad, M.R. (2005). Scouring Analysis Downstream of Rectangular Drop Jets, Master's Thesis, Tarbiat Modares University. (in Persian)
- Tullis B.P, Amanian N. and Waldron D. (1995). Design of labyrinth weir spillways. American Society of Civil Engineering. Journal of Hydraulic Engineering. 121(3), pp 247-255, [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9429\(1995\)121:3\(247\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(1995)121:3(247)).
- Yazdi, A. M., Hoseini, S. A., Nazari, S., and Amanian, N. (2021). Effects of weir geometry on scour development in the downstream of Piano Key Weirs. Water Supply, 21(1), pp. 289-298, <https://doi.org/10.2166/ws.2020.272>.