

# Investigation of Local Scour Downstream of the Riprap Piano Key Weir with Submerged Flow Conditions

Leyla Babakhah<sup>1</sup>, Ali Khoshfetrat<sup>2\*</sup>, Ehsan Delavari<sup>3</sup>

<sup>1</sup>PhD. student, Department of Civil Engineering, Na.C., Islamic Azad University, Najafabad, Iran.

<sup>2</sup>Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Isf.C., Islamic Azad University, Isfahan, Iran.

<sup>3</sup>Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Na.C., Islamic Azad University, Najafabad, Iran.

Corresponding Author's E-mail: [ali.khoshfetrat@iaau.ac.ir](mailto:ali.khoshfetrat@iaau.ac.ir)

Received: 26 Aug. 2025  
Revised: 16 Oct. 2025

Accepted: 11 Nov. 2025  
Published: 22a Dec. 2023



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

**Abstract:** This study employed a riprap under submerged flow conditions downstream of a Type B trapezoidal piano key weir (PKW). The utilized PKW had a height of 0.20 m and featured three cycles. Ripraps with lengths of 0.10, 0.20, and 0.30 m were placed downstream of the weir. The riprap was composed of natural materials, which can help mitigate environmental risks. The ripraps displaced the location of the maximum scour depth further away from the weir's toe. Positioning the point of maximum scour further from the structure can reduce the risk of weir overturning. As the length of the riprap increased, the maximum scour depth decreased. Conversely, the maximum scour depth increased with higher dencimetric Froude numbers and flow discharge, as well as with lower tailwater depths. Compared to existing studies conducted under free-flow conditions, the maximum scour depth observed under submerged flow conditions was significantly reduced.

**Keywords:** Experimental investigation, Tailwater depth, Scour index, Flow rates, Submerged flow condition.

**Introduction:** Piano key weirs (PKWs) are a new form of non-linear weir that has a higher flow capacity than other similar weirs. These weirs have rectangular, triangular, and trapezoidal shapes in plan. They are available in four types: A, B, C, and D. Many researchers have investigated the effects of flow, additional structures, bed material diameter, and other factors on the maximum scour depth. Researchers such as Fathi et al., (2024, 2025), Abdi Chooplou et al., (2024a & b), and Kazerooni et al., (2024) have investigated the effect of flow, material diameter, tailwater depth, and additional structures on the maximum scour depth. Given the existing studies on localized scour downstream of PKWs, there remains a need for cheaper, more efficient solutions to reduce scour at these weirs, especially type B PKWs. In the present study, a type B trapezoidal PKW with riprap downstream was used under submerged flow conditions. Also, three different flow rates, three different tailwater depths, gravel bed materials, and riprap materials with lengths of 0.10, 0.20, and 0.30 m were used downstream of the weir. Furthermore, an equation derived through dimensional analysis demonstrated a high correlation (93.73%) with the observed data for predicting the maximum scour depth.

**Methodology:** The experiments were conducted in a flume 10 m long, 0.8 m wide, and 1 m high. The flow was fed into the channel from an underground reservoir by a Programmable Logic Controller (PLC), a pump, and an 8-inch diameter pipe. The width of the weir inlet keys ( $W_i$ ) is 0.215 m, the width of the weir outlet keys ( $W_o$ ) is 0.075 m, the length of the weir side wall ( $B^*$ ) is 0.4 m, the length of the upstream overhang of the weir ( $B_i$ ) is 0.15 m, the thickness of the weir crest ( $T_s$ ) is 0.01 m, and the length of the weir crest ( $L^*$ ) is 3.27 m. The weir has three outlet keys, two inlet keys, and two inlet half keys (Fig. 2). The average diameter of the riprap material ( $d_r$ ) is 0.033 m. Three different lengths of riprap, 0.1, 0.2, and 0.3 m, were used downstream of the weir. The thickness of the ripraps was constant in all experiments and was three times the diameter of the riprap material (i.e., 0.1 m) (Lidya et al., 2022). Table 1 presents the hydraulic and sedimentary parameters that affect downstream scouring for a type B PKW with riprap under submerged flow conditions. A total of 27 experiments were conducted under

these conditions to calculate the maximum scour depth.

**Results and Discussion:** The flow from the weir inlet keys was transferred downstream as a free jet into the outlet keys and downstream as an inclined jet from the outlet keys. The flow converged at the beginning of the outlet keys and entered them. Unlike free-flow conditions, a localized immersion zone does not form at the beginning of the outlet keys under submerged flow. Consequently, a higher height is also not observed in that area. The formation of surface vortices in the outlet keys results from the interaction of two flows: the undercurrent in the outlet keys and the overriding current from the inlet keys. As mentioned, these vortices entered the bed superficially and with less force. Ripraps are heavier, and surface eddies cannot easily carry them downstream. Clearly, the data show that the maximum scour depth increases with increasing flow rate. Furthermore, the maximum scour depth decreases significantly with increasing riprap length. As the tailwater depth increases, the flow downstream of the weir has a lower velocity, and the tailwater depth reaches a point where it mixes with the flow exiting the weir. The flow slows down, and its velocity decreases. As the depth of the outfall increases, the propagation length of the jets that hit the bed materials increases. Figs. 3, 4, and 5 show the effect of flow rate, tailwater depth, and riprap length on the maximum scour depth under submerged flow conditions. On average, in a 0.10 m riprap, the maximum scour depth increases by 65.1% and 76.5%, which is associated with a 14.3% and 25% increase in flow rate, respectively. Similarly, in a weir with a 0.20 m riprap, the maximum scour depth increases by 71.9% and 81.5% with 14.3% and 25% increase in flow rate, respectively. Furthermore, in a weir with a riprap of 0.30 m, the maximum scour depth increases by approximately 76.6% and 85.4% with a 14.3% and 25% increase in flow rate, respectively. On average, in a weir with a 0.10 m riprap, the maximum scour depth decreases by approximately 1.24% and 1.51% with an 8% and 14.8% increase in the tailwater depth, respectively. Similarly, in a weir with a 0.20 m riprap, the maximum scour depth decreases by approximately 28% and 48.8%, with 8% and 14.8% increase in the tailwater depth, respectively. Furthermore, in the weir with a 0.30 m riprap, the maximum scour depth decreases by about 28.2% and 55.9%, respectively, and is accompanied by 8% and 14.8% increase in the tailwater depth.

**Conclusion:** This study investigated the reduction of local scour downstream of the PKW Type B using riprap under submerged flow conditions. The presence of riprap significantly reduced the maximum scour depth, with ripraps of 0.30 m length being more effective than ripraps of other lengths. One can conclude 1) riprap significantly reduces scour depth in submerged flow mode, 2) due to the absence of an overhang downstream of the Type B PKW, the outflow from the inlet keys flows close to the weir toe, which increases scour along the weir toe, 3) riprap lengthens the scour hole and moves the maximum scour depth away from the weir toe, 4) with taller ripraps, the scour depth is reduced, 5) the scour index shows the lowest value for the submerged flow condition with the longer riprap.

© 2023 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/>)

# بررسی آبشستگی موضعی در پایین دست سرریز کلید پیانویی دارای ریپرپ با شرایط جریان مستغرق

لیلا باباخواه<sup>۱</sup>، علی خوش فطرت<sup>۲\*</sup>، احسان دلاوری<sup>۳</sup>

<sup>۱</sup> دانشجوی دکتری، واحد نجف‌آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف‌آباد، ایران.

<sup>۲</sup> استادیار، واحد اصفهان (خوراسگان)، دانشگاه آزاد اسلامی، اصفهان، ایران.

<sup>۳</sup> استادیار، واحد نجف‌آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف‌آباد، ایران.

پست الکترونیکی نگارنده مسئول: [ali.khoshfetrat@iau.ac.ir](mailto:ali.khoshfetrat@iau.ac.ir)

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



تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۶/۰۴ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۸/۲۰

تاریخ ویرایش: ۱۴۰۴/۰۷/۲۴ تاریخ چاپ: ۱۴۰۲/۱۰/۰۱

**چکیده:** سرریزهای کلید پیانویی، شکل جدیدی از سرریزهای منقاری و به صورت غیرخطی هستند. به دلیل راندمان بالای این سرریزها در عبور جریان؛ بررسی آبشستگی موضعی و ارائه راهکار برای کاهش آن دارای اهمیت فراوانی است. در تحقیق حاضر، از ریپرپ در حالت شرایط مستغرق جریان در پایین دست سرریزهای کلید پیانویی دوزنقه‌ای نوع B استفاده شد. سرریز کلید پیانویی مورد استفاده با ارتفاع ۰/۲۰ متر و دارای سه سیکل (سه کلید خروجی، دو کلید ورودی و دو نیم کلید ورودی) است. ریپرپها با طولهای ۰/۱۰، ۰/۲۰ و ۰/۳۰ متر در پایین دست سرریز قرار داده شدند. جنس ریپرپها از مصالح طبیعی است که می‌تواند خطرات زیست‌محیطی را کاهش دهد. ریپرپها فاصله بیشینه عمق آبشستگی را از پنجه سرریز دورتر می‌کنند. فاصله دورتر بیشینه عمق آبشستگی از پنجه سرریز، می‌تواند باعث کاهش خطر واژگونی سرریز شود. با افزایش طول ریپرپها، بیشینه عمق آبشستگی کاهش می‌یابد. همچنین با افزایش عدد فرود ذرات و دبی جریان و کاهش عمق پایاب، بیشینه عمق آبشستگی افزایش می‌یابد. نسبت به مطالعات موجود در حالت جریان آزاد، بیشینه عمق آبشستگی در حالت جریان مستغرق، بسیار کمتر است. محدوده عدد فرود ذرات در تحقیق حاضر بین ۰/۸۸ تا ۱/۰۸ متغیر است. با توجه به شرایط مطالعه حاضر، از آنالیز ابعادی استفاده و در ادامه نیز یک رابطه با ضریب همبستگی ۹۳/۷۳ درصد برای محاسبه بیشینه عمق آبشستگی ارائه شد.

**کلیدواژه‌ها:** بررسی آزمایشگاهی، عمق پایاب، شاخص آبشستگی، دبی جریان، حالت جریان مستغرق

## ۱- مقدمه

شکل‌های مستطیلی، مثلثی و دوزنقه‌ای در پلان و دارای چهار مدل A، B، C و D هستند. نوع A دارای لبه‌های آویزان در بالادست و پایین دست سرریز، نوع B دارای لبه‌های آویزان در بالادست، نوع C دارای لبه‌های آویزان در

سرریزهای کلید پیانویی شکل جدیدی از سرریزهای غیرخطی هستند که ظرفیت عبور جریان بیشتری نسبت به دیگر سرریزهای مشابه دارند. این سرریزها دارای

جریان و قدرت گردابه‌ها به مراتب کاهش می‌یابند و همین امر باعث کاهش بیشینه عمق آبستنگی می‌گردد. در تحقیق حاضر و با توجه به مطالعات بالا، از دبی جریان و عمق پایاب متفاوت و مصالح بستر شن در حالت جریان مستغرق استفاده شد.

بسیاری دیگر از محققان نیز تاثیر هندسه سرریزهای کلید پیاپویی را بر بیشینه عمق آبستنگی مورد بررسی قرار دادند (Yazdi et al., 2020 and Gohari and Ahmadi 2019, Ghodsian et al., 2021, 2022, Jamal et al., 2022). محققان ذکر شده آبستنگی موضعی پایین دست سرریزهای کلید پیاپویی مستطیلی، دوزنقه‌ای و مثلثی را مورد مطالعه قرار دادند. ایشان دریافتند که بیشینه عمق آبستنگی در سرریزهای کلید پیاپویی دوزنقه‌ای به مراتب کمتر از سرریزهای کلید پیاپویی مستطیلی و مثلثی است. همچنین ایشان دریافتند که فاصله بیشینه عمق آبستنگی در سرریزهای کلید پیاپویی دوزنقه‌ای نیز به مراتب بیشتر است و خطر واژگونی سرریز را می‌تواند کاهش دهد. همچنین ایشان تعداد سیکل‌های سرریز، ارتفاع سرریز و نسبت عرض کلیدهای ورودی به خروجی را مورد بررسی قرار دادند. دریافتند که با افزایش تعداد سیکل‌های سرریز، ارتفاع آن و افزایش نسبت عرض کلیدهای ورودی به خروجی، بیشینه عمق آبستنگی افزایش می‌یابد. دلیل آن افزایش سرعت جریان و افزایش فاصله ریزش جریان است که به آن قبلا اشاره شد. در تحقیق حاضر نیز از سرریز کلید پیاپویی دوزنقه‌ای نوع B و با ارتفاع ۰/۲۰ متر و با نسبت عرض کلیدهای ورودی به خروجی ۲/۸۷ استفاده شد.

بسیاری دیگر از محققان نیز تاثیر سازه‌های مازاد روی تاج، کلیدهای خروجی و پایین دست سرریزهای کلید پیاپویی را بر بیشینه عمق آبستنگی مورد بررسی قرار دادند (Lantz et al., 2021, Kumar and Ahmad 2022, Rdhaiwi et al., 2023, Abdi Chooplou et al., Fathi et al., 2024, al., 2023, 2024b, Mshali et al., 2025, Kazerooni et al., 2024, 2024b و Fathi et al., 2025a). محققان ذکر شده از کفبند، پله، بافل، تیغه‌های جداکننده جریان و جامپ در سرریزهای کلید پیاپویی استفاده کردند. ایشان دریافتند که کفبند باعث کاهش بیشینه عمق آبستنگی می‌گردد و دلیل آن کاهش قدرت جت‌های خروجی از کلیدهای ورودی و

پایین دست و نوع D فاقد لبه‌های آویزان است. سرریزهای کلید پیاپویی دارای فونداسیون سبکی هستند و علاوه بر سدها، در کانال‌های زهکشی، کانال‌های کشاورزی و رودخانه‌ها نیز جای می‌گیرند (Ribeiro et al., 2012). به دلیل راندمان بالای این سرریزها، بررسی آبستنگی موضعی و راهکار برای کاهش آن و همچنین افزایش اتلاف انرژی دارای اهمیت فراوانی است. در ادامه و به صورت مختصر به تعدادی از مطالعات موجود برای آبستنگی موضعی در پایین دست سرریزهای کلید پیاپویی پرداخته می‌شود.

بسیاری از محققان، تاثیر جریان و قطر مصالح بستر را بر آبستنگی موضعی در پایین دست سرریزهای کلید پیاپویی مورد بررسی قرار دادند (Ghafouri, Jüstrich et al., 2016, Abdi-Chooplou, Dehrashid et al., 2022, et al., 2020, Dehghan, Bodaghi et al., 2023 and 2024, et al., 2023, Abdi Chooplou et al., 2024a, and Karami 2024, Farbiz et al., 2025). محققان ذکر شده روی آبستنگی موضعی پایین دست سرریزهای کلید پیاپویی مستطیلی، دوزنقه‌ای و مثلثی نوع A و D تاثیر دبی جریان، عمق پایاب، فاصله ریزش جریان، دانه بندی مصالح بستر، حالت جریان آزاد و مستغرق را به صورت آزمایشگاهی و عددی مورد بررسی قرار دادند. ایشان دریافتند که با افزایش دبی جریان، سرعت جریان افزایش یافته و باعث افزایش تنش برشی روی بستر پایین دست سرریز شده و در نهایت باعث افزایش بیشینه عمق آبستنگی می‌شود. با افزایش عمق پایاب، طول انتشار جریان در پایین دست سرریز افزایش یافته و باعث کاهش سرعت جریان شده و در نهایت بیشینه عمق آبستنگی کاهش می‌یابد. با افزایش فاصله ریزش، جریان با قدرت بیشتری تحت ثقل به بستر پایین دست ریخته و قدرت گردابه‌های پایین دست سرریز را افزایش می‌دهد. با افزایش قدرت گردابه‌ها، اغتشاش جریان افزایش یافته و مصالح بستر به راحتی به پایین دست منتقل می‌شوند و در نهایت باعث افزایش بیشینه عمق آبستنگی می‌شود. با افزایش قطر متوسط مصالح بستر، سرعت جریان و تنش برشی موجود در روی بستر به راحتی نمی‌توانند مصالح را جابه‌جا کنند و همین امر باعث کاهش بیشینه عمق آبستنگی می‌شود. در حالت جریان مستغرق نیز اغتشاش

دائمی بودن جریان، حالت آزاد مستغرق و واحد بودن ضریب اصلاح سرعت در نظر گرفته شده است. همچنین در نظر نگرفتن تاثیر گل و لای و آشغال‌های موجود در جریان در مواقعی سیلابی نیز یکی دیگر از محدودیت‌های مطالعه حاضر است. در ادامه و با توجه به شرایط مطالعه حاضر، از آنالیز ابعادی استفاده شد.

## ۲- روش‌شناسی

آزمایش‌ها در یک فلوم به طول ۱۰ متر، عرض ۰/۸ متر و ارتفاع ۱ متر انجام شدند. جریان توسط دستگاه Programmable Logic Controller (PLC)، پمپ و لوله‌ای به قطر ۸ اینچ، از مخزن زیرزمینی وارد کانال می‌شد. مخزن زیرزمینی دارای حجم ۱۰۰۰۰ مترمکعب و از جنس پی‌وی‌سی بود. یک فلومتر به PLC متصل بود که توسط نمایشگر موجود روی دستگاه PLC می‌توان دبی را تنظیم کرد. خطای پمپ ۰/۱ درصد بود. سرریز در فاصله ۵/۵ متری از ابتدای کانال نصب شد. دلیل انتخاب فاصله ۵/۵ متری، توسعه‌یافتگی جریان و بر هم منطبق بودن پروفیل‌های سرعت مطابق تحقیق (Fathi et al., 2025a) است. سرریز با چسب ضدآب شد و روی یک پایه فلزی به ارتفاع ۰/۳ متر ( $P_d$ ) نصب گردید. از سه دبی ۰/۰۳۰، ۰/۰۳۵ و ۰/۰۴۰ مترمکعب بر ثانیه استفاده شد. سه سنسور آلتراسونیک، عمق جریان در بالادست، پایاب و روی تاج سرریز را برداشت کرده و روی PLC نمایش می‌دادند. سنسورها با کف کانال کالیبره و صفر می‌شدند و با موجی که به سطح جریان می‌فرستادند، عمق جریان را برداشت می‌کردند. سنسور اول در فاصله 4P نسبت به مرکز سرریز و در بالادست، سنسور دوم در فاصله 10P نسبت به مرکز سرریز عمق جریان در پایین‌دست را برداشت می‌کردند (Eslinger and Crookston, 2020). سنسور سوم نیز عمق جریان روی تاج سرریز را نشان می‌داد. از سه عمق پایاب ۰/۲۳، ۰/۲۵ و ۰/۲۷ متر استفاده شد. عمق‌های پایاب توسط دریچه انتهایی موجود در فلوم، قابل تنظیم بودند. عمق‌های پایاب به نحوی انتخاب شدند که جریان روی سرریز به صورت مستغرق باشد (Bodaghi et al., 2023 & 2024). از مصالح بستر شن در پایین‌دست سرریز استفاده شد. مصالح به طول ۲ متر، ارتفاع ۰/۳ متر و عرض ۰/۸ متر

خروجی سرریز توسط کف‌بند است. پله و بافل در کلیدهای خروجی سرریز نیز باعث کاهش سرعت جریان داخل کلیدهای خروجی می‌شود و بیشینه عمق آبشستگی را کاهش می‌دهند. وجود پله و بافل مانند مانع و زبری در کلیدهای خروجی عمل کرده و باعث کاهش قدرت گردابه‌های موجود در کلیدهای خروجی می‌شوند. وجود جامپ در کلیدهای خروجی سرریز باعث افزایش فاصله ریزش جریان موجود در کلیدهای خروجی سرریز به فاصله‌ای دورتر از پنجه سرریز می‌شود و بیشینه عمق آبشستگی را از پنجه سرریز دور می‌کند. همین امر می‌تواند باعث کاهش خطر احتمالی واژگونی سرریز شود. وجود تیغه‌های جداکننده جریان باعث کاهش طول موثر تاج سرریز و افزایش ریزش جریان به فاصله دورتری از پنجه سرریز شده و بیشینه عمق آبشستگی را کاهش داده و از پنجه سرریز دورتر می‌کند. Babakhah and Khoshfetrat (2024) آبشستگی موضعی پایین‌دست سرریزهای کلید پیانویی ذوزنقه‌ای نوع B را در حالت شرایط جریان آزاد و در حضور ریپرپ مورد بررسی قرار دادند. ایشان دریافتند که با افزایش عدد فرود ذرات، بیشینه عمق آبشستگی روی مصالح ریپرپ افزایش می‌یابد. ایشان همچنین بیان داشتند که آبشستگی پنجه سرریز در مقایسه با دیگر مدل‌های سرریزهای کلید پیانویی و به دلیل عدم وجود لبه آویزان در پایین‌دست، به مراتب بیشتر است. Panthi, (2025) نیز اثر آورد اجسام شناور را بر آبشستگی موضعی در پایین‌دست سرریز کلید پیانویی مورد بررسی قرار داد. در تحقیق حاضر نیز از ریپرپ در پایین‌دست سرریز در حالت شرایط جریان مستغرق استفاده شد.

با توجه به مطالعات موجود روی آبشستگی موضعی پایین‌دست دیگر مدل‌های سرریزهای کلید پیانویی و همچنین نوع B، به راهکارهایی ارزان‌تر و بهینه‌تر برای کاهش آبشستگی در این سرریزها نیاز است. در مطالعه حاضر، از سرریز کلید پیانویی ذوزنقه‌ای نوع B همراه با ریپرپ در پایین‌دست آن و در حالت شرایط جریان مستغرق استفاده شد. همچنین از سه دبی مختلف جریان سه عمق پایاب مختلف، مصالح بستر شن و مصالح ریپرپ با طول‌های ۰/۱۰، ۰/۲۰ و ۰/۳۰ متری در پایین‌دست سرریز استفاده شد. در تحقیق حاضر محدودیت‌هایی مانند

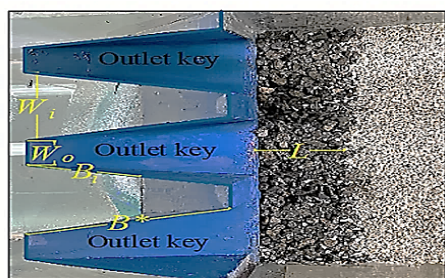


Fig. 1 Trapezoidal PKW with riprap used in the present study

شکل ۱ سرریز کلید پیانویی دوزنقه‌ای همراه با ریپرپ استفاده شده در مطالعه حاضر

آبشستگی، با یک متر لیزری و در ابعاد ۰/۰۳ در ۰/۰۳ متری، تغییرات بستر شسته شده برداشت و ثبت شده است و سپس محل بیشینه عمق آبشستگی و فاصله آن نسبت به پنجه سرریز مشخص شد. بعد از پایان هر آزمایش، مصالح بستر و مصالح ریپرپ از هم جدا و مسطح شده و آزمایش بعدی تکرار می‌شد.

**جدول ۱** پارامترهای هیدرولیکی و رسوبی تاثیرگذار بر آبشستگی پایین دست سرریز کلید پیانویی نوع B با ریپرپ و در حالت جریان مستغرق را نشان می‌دهد. در کل از ۲۷ تست جهت محاسبه بیشینه عمق آبشستگی با ریپرپ و در حالت جریان مستغرق استفاده شد.

## ۱-۲- آنالیز ابعادی

رابطه (۱)، پارامترهای موثر بر آبشستگی موضعی پایین دست سرریز کلید پیانویی دوزنقه‌ای نوع B را همراه با ریپرپ و در حالت جریان مستغرق نشان می‌دهد. در رابطه (۱)،  $Z_s$  بیشینه عمق آبشستگی،  $X_s$  فاصله بیشینه عمق آبشستگی نسبت به پنجه سرریز،  $q$  دبی در واحد عرض جریان در بالادست سرریز،  $E_1$  انرژی مخصوص جریان در بالادست سرریز،  $E_2$  انرژی مخصوص جریان در پایین دست سرریز،  $g$  نیروی گرانش،  $\sigma$  ضریب کشش سطحی،  $\mu$  لزجت دینامیکی،  $\rho$  چگالی جریان،  $\Delta\rho$  اختلاف چگالی مصالح بستر ( $\rho_s$ ) با چگالی جریان،  $d_{50}$  قطر متوسط مصالح بستر و  $L$  طول ریپرپ‌ها در پایین دست سرریز هستند. به دلیل ضخامت ثابت و قطر مصالح ریپرپ یکسان، از تاثیر آن‌ها در آنالیز ابعادی صرف نظر شد (Babakhah and Khoshfetrat, 2024). انرژی مخصوص جریان در

در بستر پایین دست سرریز ریخته شدند. مطابق شکل ۱، در انتهای مصالح از دیواری صلب استفاده شد تا مصالح ریزش نکنند. قطر متوسط مصالح شن ۰/۰۷۵ متر بود. شن استفاده شده به صورت طبیعی بوده و دارای چگالی ( $\rho_s$ ) برابر ۲۶۵۰ کیلوگرم بر مترمکعب است. تغییرات حفره آبشستگی در مصالح شن و در زمان ۹۰۰۰ ثانیه کمتر از ۰/۰۱ متر بود. طبق تحقیق Fathi et al., (2024 & 2025a) این زمان به عنوان زمان تعادل در نظر گرفته شد. دانه بندی مصالح بستر به صورت یکنواخت است و ضریب یکنواختی مصالح  $(\sigma_g = (d_{84}/d_{16})^{0.5})$  که در آن  $d_{16}$  و  $d_{84}$  قطری هستند که به ترتیب ۸۴ و ۱۶ درصد مصالح از آن‌ها ریزترند، برای مصالح شن کمتر از ۱/۶ بود (Zhou et al., 2020 & Parker, 2008). ضریب یکنواختی مصالح شن در مطالعه حاضر، به ترتیب ۱/۱۹ است. مطابق شکل ۱ از یک سرریز کلید پیانویی دوزنقه‌ای نوع B با ارتفاع ۰/۲ متر استفاده شد. عرض کلیدهای ورودی سرریز ( $W_i$ ) برابر ۰/۲۱۵ متر، عرض کلیدهای خروجی سرریز ( $W_o$ ) برابر ۰/۰۷۵ متر، طول دیواره جانبی سرریز ( $B^*$ ) برابر ۰/۴ متر، طول لبه آویزان بالادست سرریز ( $B_i$ ) برابر ۰/۱۵ متر، ضخامت تاج سرریز ( $T_s$ ) برابر ۰/۰۱ متر و طول تاج سرریز ( $L^*$ ) برابر ۳/۲۷ متر است. سرریز دارای سه کلید خروجی، دو کلید ورودی و دو نیم کلید ورودی است..

قطر متوسط مصالح ریپرپ ( $d_r$ ) برابر ۰/۰۳۳ متر است. از سه طول متفاوت ریپرپ ۰/۱، ۰/۲ و ۰/۳ متر در پایین دست سرریز استفاده شد. ضخامت ریپرپ‌ها در تمامی آزمایش‌ها ثابت و سه برابر قطر مصالح ریپرپ (یعنی ۰/۱ متر) بود (Lidya et al., 2022). با داشتن دبی و عمق جریان در بالادست سرریز توسط سنسور اول و با استفاده از معادله  $(Q = V_1WH)$ ، سرعت جریان در بالادست سرریز محاسبه شد. در این رابطه  $W$  عرض کانال و یا عرض سرریز و  $Q$  دبی جریان است. با استفاده از رابطه پیوستگی و داشتن عمق جریان در پایین دست سرریز توسط سنسور دوم، سرعت جریان در پایین دست سرریز محاسبه می‌شد. پس از تنظیم دبی و عمق پایاب تست‌ها شروع می‌شدند. بعد از گذشت زمان و به تعادل رسیدن مصالح بستر، پمپ خاموش شد. پس از زهکشی جریان موجود در حفره

جدول ۱ پارامترهای هیدرولیکی و رسوبی در سرریزهای کلید پیانویی با ریپرپ در حالت شرایط جریان مستغرق

Table 1 Hydraulic and sedimentary parameters in PKWs with riprap under submerged flow conditions

$Q$ (m <sup>3</sup> /s)	$E_1$ (m)	$E_2$ (m)	$L$ (m)	$E_2/E_1$ (-)	$d_{50}/d_r$ (-)	$L/E_2$ (-)	$Fr_d$ (-)
0.030	0.246	0.231	0.1	0.519	0.227	0.432	0.881
0.035	0.253	0.232	0.1	0.512	0.227	0.431	0.989
0.040	0.260	0.232	0.1	0.505	0.227	0.430	1.083
0.030	0.246	0.251	0.1	0.563	0.227	0.398	0.881
0.035	0.253	0.252	0.1	0.556	0.227	0.398	0.989
0.040	0.260	0.252	0.1	0.548	0.227	0.397	1.083
0.030	0.246	0.271	0.1	0.607	0.227	0.369	0.881
0.035	0.253	0.271	0.1	0.560	0.227	0.369	0.989
0.040	0.260	0.272	0.1	0.591	0.227	0.368	1.083
0.030	0.246	0.231	0.2	0.519	0.227	0.864	0.881
0.035	0.253	0.232	0.2	0.512	0.227	0.863	0.989
0.040	0.260	0.232	0.2	0.505	0.227	0.861	1.083
0.030	0.246	0.251	0.2	0.563	0.227	0.796	0.881
0.035	0.253	0.252	0.2	0.556	0.227	0.795	0.989
0.040	0.260	0.252	0.2	0.548	0.227	0.794	1.083
0.030	0.246	0.271	0.2	0.607	0.227	0.738	0.881
0.035	0.253	0.271	0.2	0.560	0.227	0.737	0.989
0.040	0.260	0.272	0.2	0.591	0.227	0.736	1.083
0.030	0.246	0.231	0.3	0.519	0.227	1.297	0.881
0.035	0.253	0.232	0.3	0.512	0.227	1.294	0.989
0.040	0.260	0.232	0.3	0.505	0.227	1.291	1.083
0.030	0.246	0.251	0.3	0.563	0.227	1.195	0.881
0.035	0.253	0.252	0.3	0.556	0.227	1.193	0.989
0.040	0.260	0.252	0.3	0.548	0.227	1.190	1.083
0.030	0.246	0.271	0.3	0.607	0.227	1.107	0.881
0.035	0.253	0.271	0.3	0.560	0.227	1.106	0.989
0.040	0.260	0.272	0.3	0.591	0.227	1.104	1.083

Babakhah and Khoshfetrat, (2024) دوزنقه‌ای مطابق آنالیز ابعادی تحقیق در نظر گرفته شده است.

$$(Z_s, X_s) = f(q, E_1, E_2, g, \sigma, \mu, \rho, \Delta\rho, d_{50}, L) \quad (1)$$

با در نظر گرفتن سه پارامتر تکراری  $q$ ،  $E_1$  و  $\rho$  و با استفاده از تئوری  $\pi$  باکینگهام، پارامترهای موثر بر آبشستگی موضعی پایین‌دست سرریز کلید پیانویی دوزنقه‌ای با ریپرپ و در حالت جریان مستغرق، مطابق رابطه (۲) خواهند شد.

$$\left(\frac{Z_s}{E_1}, \frac{X_s}{E_1}\right) = f\left(\frac{E_2}{E_1}, Fr, Re, We, \frac{\Delta\rho}{\rho}, \frac{d_{50}}{E_1}, \frac{L}{E_1}\right) \quad (2)$$

در رابطه (۲)،  $Fr$  از رابطه  $(q/(gE_1^3))^{0.5}$  به دست می‌آید که عدد فرود جریان است. با توجه به عدد رینولدز  $(Re = \rho q/\mu)$  بزرگ‌تر از ۴۰۰۰ و وجود جریان کاملاً آشفته و

بالادست سرریز از رابطه  $(E_1 = P + h + (V_1^2/2g) = P + H)$  و انرژی مخصوص در پایین‌دست سرریز از رابطه  $(E_2 = y + (V_2^2/2g) = Y)$  قابل محاسبه است (Fathi et al., 2023, Rdhaiwi et al., 2024 & Fathi et al., 2025b).

همان‌طور که گفته شد، ضریب اصلاح سرعت  $(\alpha)$  در مطالعه حاضر، واحد در نظر گرفته شده است (Iqbal and Ghani, 2023). شکل ۲ نیز آبشستگی موضعی پایین‌دست سرریز کلید پیانویی دوزنقه‌ای نوع B را در حالت جریان مستغرق و با وجود ریپرپ نشان می‌دهد. در این شکل،  $V_1$  سرعت جریان در بالادست سرریز،  $V_2$  سرعت جریان در پایین‌دست سرریز،  $h$  عمق جریان در بالادست نسبت به تاج سرریز،  $y$  عمق پایین‌دست سرریز (عمق پایاب)،  $P$  ارتفاع سرریز،  $P_d$  ارتفاع مصالح بستر نسبت به کف کانال،  $H$  نظیر هد کل جریان در بالادست سرریز و  $Y$  نظیر هد کل جریان در پایین‌دست سرریز هستند. همچنین معرفی پارامترهای موثر بر آبشستگی موضعی پایین‌دست سرریز کلید پیانویی

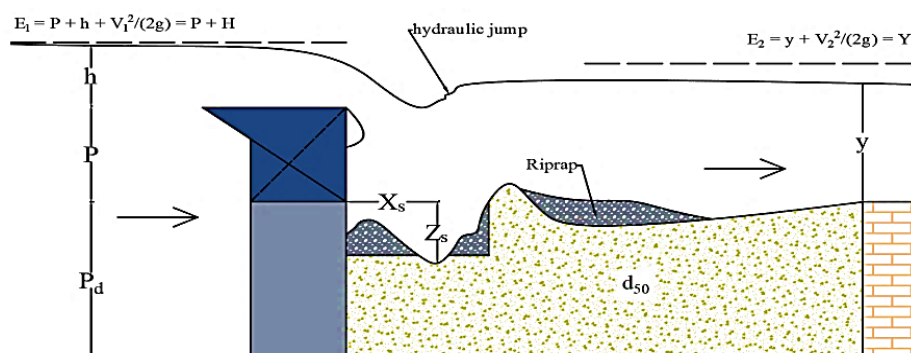


Fig. 2 Parameters affecting local scour downstream of a trapezoidal PKW type B in the presence of riprap and submerged flow

شکل ۲ پارامترهای موثر بر آبشستگی موضعی در پایین‌دست سرریز کلید پیانویی ذوزنقه‌ای نوع B در صورت وجود ریپرپ و جریان مستغرق

یک گردابه پر قدرت شده و وارد بستر پایین‌دست می‌شد. این گردابه سرعت زیادی دارد و مصالح بستر را با خود به راحتی حمل می‌کرد. دو گردابه سطحی در کنار دیواره‌های کلیدهای خروجی به صورت ساعتگرد و پادساعتگرد نیز تشکیل می‌شد. این گردابه‌ها با مختلط شدن جریان موجود در کلیدهای خروجی و جریان ریخته شده از کلیدهای ورودی به کلیدهای خروجی ایجاد می‌شدند. همان‌طور که گفته شد این گردابه‌ها به صورت سطحی و با قدرت کمتری وارد بستر می‌شدند. مصالح جابه‌جا شده توسط ناحیه اغتشاش ایجاد شده در پایین‌دست سرریز که توسط جت وسطی به وجود آمده است، با جت ایجاد شده سطحی توسط گردابه‌های کناری به پایین‌دست انتقال می‌یافتند. برخلاف سرریزهای کلید پیانویی نوع A و C در نوع B لبه‌های آویزان تنها در بالادست سرریز وجود دارند و به دلیل عدم وجود لبه آویزان در پایین‌دست سرریز، جت آزاد ریزشی از کلیدهای ورودی در نزدیکی پنجه سرریز می‌ریزد. همچنین به دلیل عدم وجود لبه آویزان در پایین‌دست سرریز مورد مطالعه، جریان خروجی از کلیدهای ورودی در نزدیکی پنجه سرریز می‌ریزند که همین امر باعث افزایش آبشستگی در کنار پنجه سرریز می‌شود. ریپرپ‌ها وزن بیشتری دارند و گرداب‌های سطحی نمی‌توانند به راحتی آن‌ها را به پایین‌دست حمل کنند. بین جت پر قدرت خروجی از کلیدهای خروجی و جت ریزشی از کلیدهای ورودی برخوردی وجود دارد که منجر به کاهش سرعت می‌شود. علاوه بر این، این برخورد گرداب‌هایی با قدرت کمتر ایجاد می‌کند که منجر به کاهش مقدار مصالح بستر

همچنین به دلیل عمق کافی جریان در روی تاج سرریز (بیشتر از ۰/۳ متر)، از عدد وبر  $(We = q^2 \rho / E_1 \sigma)$ ، عدد رینولدز و ضریب کشش سطحی صرف نظر شد (Sumer and Fredsoe, 1991 & Novák and Čabelka, 1981). با ترکیب  $Fr_d = \Delta \rho / \rho$  و  $d_{50} / E_1$ ، پارامتر  $q / (E_1 (g (\Delta \rho / \rho) d_{50})^{0.5})$  به آن عدد فرود ذرات می‌گویند. همچنین با ترکیب پارامترهای  $L / E_1$  و  $E_2 / E_1$ ، پارامتر  $L / E_2$  به دست می‌آید. باین حال، پارامترهای موثر بر آبشستگی موضعی پایین‌دست سرریز کلید پیانویی ذوزنقه‌ای نوع B همراه با ریپرپ مطابق رابطه (۳) خواهند شد. همچنین با توجه به ثابت بودن پارامتر  $\Delta \rho / \rho$  به دلیل طبیعی بودن مصالح شن و ماسه و حضور آن در پارامتر  $Fr_d$  از آن صرف نظر شد.

$$\left( \frac{Z_s}{E_1}, \frac{X_s}{E_1} \right) = f \left( \frac{L}{E_2}, Fr_d \right) \quad (3)$$

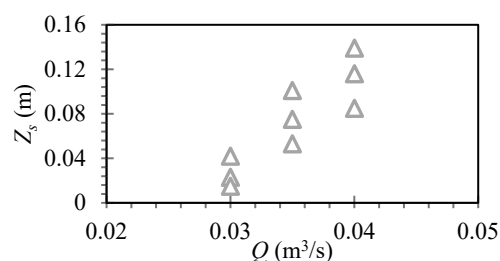
### ۳- نتایج و بحث

جریان از روی کلیدهای ورودی سرریز به صورت جت آزاد به پایین‌دست و داخل کلیدهای خروجی و به صورت جت مایل از کلیدهای خروجی به پایین‌دست منتقل می‌شد. جریان در ابتدای کلیدهای خروجی همگرا شده و وارد آن می‌شد. برخلاف مکانیزم جریان در حالت جریان آزاد، در ابتدای کلیدهای خروجی ناحیه استغراق موضعی ایجاد نمی‌شد و در این ناحیه ارتفاع جریان بیشتری وجود نداشت. جریان در کلیدهای خروجی و در ادامه مسیر باعث ایجاد

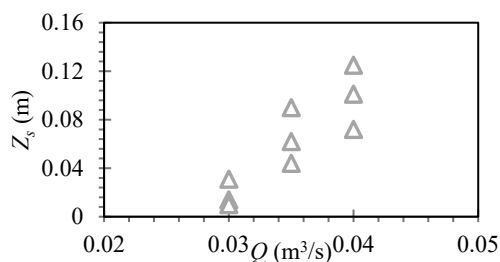
قدرت پرش هیدرولیکی ایجادشده در پایین دست نیز کاهش می‌یابد و منجر به پرش هیدرولیکی کم عمق‌تری می‌شود که می‌توان آن را مستغرق در نظر گرفت (Fathi et al., 2025a). طول و ارتفاع پرش هیدرولیکی بسیار اندک است و دلیل ایجاد آن وجود گردابه و اغتشاش جریان ایجادشده در پایین دست سرریز و بالا آمدن آن‌ها به سطح جریان در پایین دست سرریز است. **شکل ۳** تاثیر دبی جریان بر بیشینه عمق آبستگي در سرریز با ریپرپ در حالت جریان مستغرق را در عمق پایاب‌های مختلف نشان می‌دهد. **شکل‌های a۳ و b** تاثیر دبی جریان بر بیشینه عمق آبستگي را با ریپرپ ۰/۱۰ متر، **شکل‌های c۳** و **d** تاثیر دبی جریان بر بیشینه عمق آبستگي را با ریپرپ ۰/۲۰ متر و **شکل‌های e۳ و f** تاثیر دبی جریان بر بیشینه عمق آبستگي را با سنگ‌چین ۰/۳۰ متر نشان می‌دهند. به وضوح، داده‌ها نشان می‌دهند که بیشینه عمق آبستگي ایجادشده روی ریپرپ‌ها با افزایش دبی جریان افزایش می‌یابد. علاوه بر این، بیشینه عمق آبستگي با افزایش طول ریپرپ به طور قابل توجهی کاهش می‌یابد. به طور میانگین در ریپرپ ۰/۱۰ متری، بیشینه عمق آبستگي حدود ۶۵/۱ و ۷۶/۵ درصد افزایش می‌یابد که به ترتیب با افزایش ۱۴/۳ و ۲۵ درصدی دبی جریان همراه است. به طور مشابه، در سرریز با ریپرپ ۰/۲۰ متر، بیشینه عمق آبستگي با افزایش ۷۱/۹ و ۸۱/۵ درصد افزایش می‌یابد. علاوه بر این، در سرریز با ریپرپ ۰/۳۰ متر، بیشینه عمق آبستگي با افزایش ۱۴/۳ و ۲۵ درصدی دبی جریان، به ترتیب تقریباً ۷۶/۶ و ۸۵/۴ درصد افزایش می‌یابد.

**شکل ۴** تاثیر عمق پایاب بر بیشینه عمق آبستگي را در دبی‌های مختلف نشان می‌دهد. داده‌های بالایی برای بیشترین دبی و داده‌های پایینی برای کمترین دبی هستند. همان‌طور که گفته شد، افزایش عمق پایاب منجر به کاهش بیشینه عمق آبستگي روی ریپرپ‌ها می‌شود. **شکل a۴** تاثیر عمق پایاب بر بیشینه عمق آبستگي متری، **شکل b۴** تاثیر عمق پایاب بر بیشینه عمق آبستگي با ریپرپ ۰/۲۰ متری و **شکل c۴** تاثیر عمق پایاب بر بیشینه عمق آبستگي با ریپرپ ۰/۳۰ متری را نشان می‌دهد. این افت ناشی از کاهش سرعت جریان در

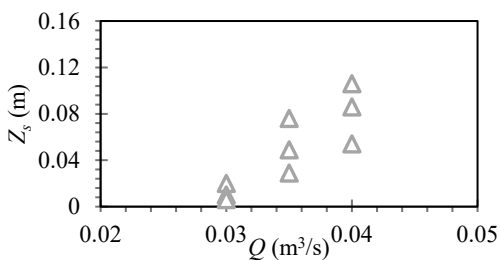
منتقل شده به پایین دست و تجمع مواد بستر با ریپرپ در نزدیکی پنجه سرریز می‌شود. در دبی‌های پایین تر، مصالح کمتری از ریپرپ به پایین دست منتقل می‌شوند و مقدار آبستگي کمتر است. بنابراین، در دبی‌های پایین تر و عمق بیشتر پایاب، عمق آبستگي در سرریز با ریپرپ ناچیز است. ریپرپ قدرت جت ورودی به بستر را کاهش می‌دهد و از آبستگي بیشتر جلوگیری می‌کند. پس از حرکت لایه‌های رویین ریپرپ، مصالح ریپرپ به آرامی روی بستر ته‌نشین می‌شوند و تجمع آن‌ها و نشان را افزایش می‌دهد، بنابراین مانع از توانایی جریان در جابجایی آن‌ها می‌شود (مشابه نظریه احتمالاتی انتقال رسوب و فرسایش که توسط انیشتین در سال ۱۹۵۰ ارائه شد) (Einstein, 1950). تنش برشی بیش از حد ایجادشده روی مصالح می‌تواند منجر به عمق آبستگي قابل توجهی شود. با گذشت زمان، یک پوشش محافظ زرهی روی بستر ریپرپ ایجاد می‌شود که از فرسایش بیشتر جلوگیری کرده و نیروی وارد بر بستر را کاهش می‌دهد. ریپرپ اثر تنش برشی جریان بر فرسایش را کاهش داده و در برابر حرکت ذرات بستر مقاومت ایجاد می‌کند. همچنین، پدیده آبستگي تا زمانی که تنش برشی اعمال شده بر بستر بحرانی شود، ادامه می‌یابد (Fathi et al., 2025a). مانند ریپرپ‌های موجود در اطراف پایه‌های پل، ریپرپ‌ها مانند کفبندهای بتنی عمل نکرده و خودشان نیز با تغییرات در جریان، دستخوش تغییرات می‌شوند. با افزایش دبی جریان، لایه‌هایی از ریپرپ‌ها نیز شسته می‌شوند که نیاز به مانیتورینگ متداول دارند. بنابراین، در دبی‌های بیشتر، جت‌ها قوی تر شده و سریع تر وارد بستر می‌شوند. با افزایش عمق پایاب، بیشینه عمق آبستگي کاهش می‌یابد و دلیل کاهش سرعت جت پس از برخورد با عمق پایاب نیز همین است. با افزایش عمق پایاب، جریان پایین دست سرریز سرعت کمتری دارد و با اختلاط آن با جریان خروجی از سرریز، جریان آرام شده و سرعت آن کاهش می‌یابد و تنش برشی به تنش برشی بحرانی نزدیک می‌شود و آبستگي را کاهش می‌دهد. با افزایش عمق پایاب، طول انتشار جت‌هایی که به مواد بستر برخورد می‌کنند افزایش می‌یابد (Fathi et al., 2025a). با افزایش طول انتشار و کاهش عمق جت‌ها و گردابه‌های موجود، بیشینه عمق آبستگي کاهش می‌یابد و باعث می‌شود آبستگي کم عمق تر و کشیده تر شود. در نتیجه،



(a)



(c)



(e)



(b)



(d)



(f)

**Fig. 3** Effect of flow rate on maximum scour depth in riprap weirs and submerged flow mode

شکل ۳ تاثیر دبی جریان بر بیشینه عمق آبشستگی در سرریزهای دارای ریپرپ و در حالت جریان مستغرق

می‌یابد. به‌طور مشابه، در سرریز با ریپرپ ۰/۲۰ متری، بیشینه عمق آبشستگی به‌ترتیب با افزایش ۸ و ۱۴/۸ درصدی عمق پایاب، تقریباً ۲۸ و ۴۸/۸ درصد کاهش می‌یابد.

علاوه‌براین، در سرریز با ریپرپ ۰/۳۰ متری، بیشینه عمق آبشستگی به‌ترتیب حدود ۲۸/۲ و ۵۵/۹ درصد کاهش می‌یابد و با افزایش ۸ و ۱۴/۸ درصدی در عمق پایاب همراه است. **شکل ۵** تاثیر طول ریپرپ را بر بیشینه عمق آبشستگی نشان می‌دهد. دلیل تفاوت داده‌ها در **این شکل**، دبی‌ها و عمق پایاب‌های مختلف است. به‌طور مثال، داده‌های بالایی برای دبی‌های بیشتر و عمق پایاب‌های کمتر و داده‌های پایینی برای دبی‌های کمتر و عمق پایاب‌های بیشتر ارائه شده است. افزایش طول ریپرپ منجر به کاهش بیشینه عمق آبشستگی و مقدار متوسط آن می‌شود. دلیل

پایین‌دست است که به‌نوبه خود بر سرعت‌های ایجادشده توسط جت‌های خروجی از کلیدهای خروجی بر حفره آبشستگی تاثیر می‌گذارد. با افزایش عمق پایاب، جریان در پایین‌دست سرریز سرعت کمتری دارد و با مخلوط شدن آن با جریان خروجی از سرریز، جریان آرام‌تر شده و سرعت آن کاهش می‌یابد. با افزایش عمق پایاب، طول انتشار جت‌هایی که به مواد بستر برخورد می‌کنند افزایش می‌یابد (Fathi et al., 2025a). همان‌طور که گفته شد، با افزایش طول انتشار و کم‌عمق‌تر شدن جت‌ها و گرداب‌های جریان، بیشینه عمق آبشستگی کاهش می‌یابد. علاوه‌براین، آبشستگی کم‌عمق‌تر و گسترده‌تر می‌شود و در نتیجه قدرت پُرش هیدرولیکی کاهش می‌یابد. به‌طور متوسط، در سرریز با ریپرپ ۰/۱۰ متری، بیشینه عمق آبشستگی به‌ترتیب با افزایش ۸ و ۱۴/۸ درصدی در عمق پایاب، تقریباً ۲۴/۱ و ۵۱/۱ درصد کاهش

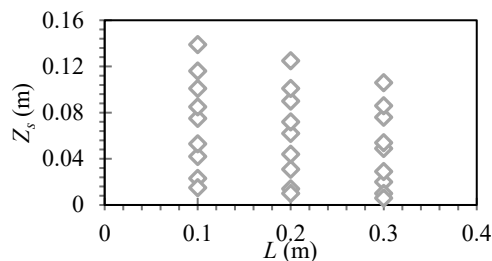


Fig. 5 Effect of riprap length on maximum scour depth in submerged flow conditions

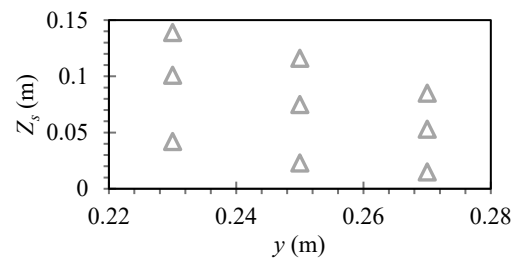
شکل ۵ تاثیر طول ریپرپ بر بیشینه عمق آبشستگی در شرایط جریان مستغرق

طول بیشتر ریپرپ منجر به کاهش بیشینه عمق آبشستگی می‌شود.

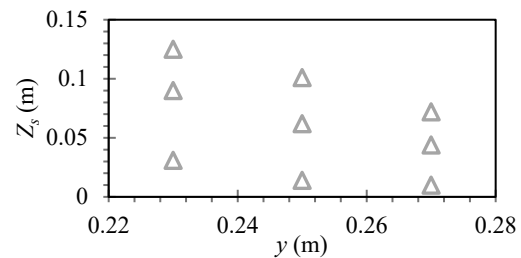
علاوه‌براین، هنگامی که ریپرپ روی مصالح بستر وجود داشته باشد، طول حفره آبشستگی افزایش می‌یابد. با افزایش طول ریپرپ‌ها، فاصله بیشینه عمق آبشستگی از پنجه سرریز دور می‌شود. به‌طور میانگین با افزایش ۵۰٪ و ۶۶/۷ درصدی طول ریپرپ‌ها نسبت به ریپرپ ۰/۱۰ متری، بیشینه عمق آبشستگی به ترتیب ۱۵/۴ و ۳۲/۸ درصد کاهش می‌یابد.

شکل ۶a تاثیر پارامتر  $Fr_d$  را در حالت عمق پایاب ثابت ۰/۲۳ متر بر بیشینه عمق آبشستگی بدون بعد شده نشان می‌دهد. همان‌طور که پیدا است، با افزایش پارامتر  $Fr_d$  بیشینه عمق آبشستگی نیز افزایش می‌یابد که دلیل آن افزایش قدرت جت‌ها و افزایش اغتشاش جریان در پایین‌دست و روی ریپرپ‌ها است. شکل ۶b نیز تاثیر پارامتر  $L/E_2$  را بر بیشینه عمق آبشستگی بدون بعد شده نشان می‌دهد. همان‌طور که از شکل پیدا است، با افزایش پارامتر  $L/E_2$  بیشینه عمق آبشستگی کاهش می‌یابد. دلیل آن افزایش طول ریپرپ‌ها است. همان‌طور که گفته شد با افزایش طوب ریپرپ‌ها، قدرت جت‌ها کاهش یافته و آبشستگی روی آن‌ها کمتر است.

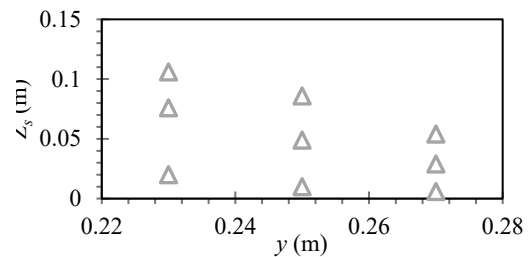
ایشان همچنین از سه عمق پایاب مختلف ۰/۰۵، ۰/۱۰ و ۰/۱۵ متر و سه دبی مختلف ۰/۰۳۰، ۰/۰۳۵ و ۰/۰۴۰ مترمکعب بر ثانیه استفاده کردند. طول ریپرپ‌های مورد استفاده در مطالعه ایشان نیز مشابه مطالعه حاضر است.



$L = 0.1$  m (a)



b)  $L = 0.2$  m



$L = 0.3$  m (c)

Fig. 4 Effect of tailwater depth on maximum scour depth in riprap weirs in submerged flow mode

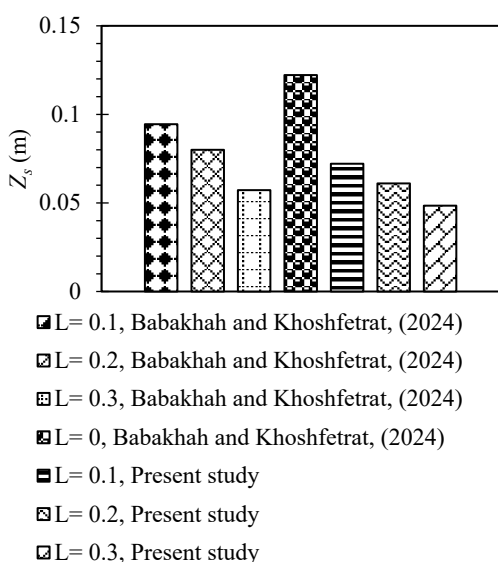
شکل ۴ تاثیر عمق پایاب بر بیشینه عمق آبشستگی در سرریزهای دارای ریپرپ در حالت جریان مستغرق

این کاهش، کاهش سرعت جت‌ها و گرداب‌های ضربه‌ای هنگام برخورد با مصالح ریپرپ است. در نتیجه، افزایش قطر و وزن ریپرپ، همراه با تجمع آن، در این مورد نقش دارند.

علاوه‌براین، در دبی‌های بیشتر، ریپرپ‌ها دستخوش تغییرات می‌شوند. برخی از مصالح ریپرپ سنگین‌تر، حفره آبشستگی ایجاد شده در خودشان را پر کرده و به عنوان یک لایه محافظ از آبشستگی بیشتر جلوگیری می‌کنند. ریپرپ‌ها در عمق پایاب‌های بیشتر به عنوان یک بستر صلب عمل کرده و عمق آبشستگی در آن‌ها کم و ناچیز است. با این حال، وجود ریپرپ، به‌ویژه با افزایش طول، از نفوذ جت‌ها و گرداب‌ها به مواد زیرین جلوگیری کرده و سرعت برشی روی آن‌ها را کاهش می‌دهد. همان‌طور که گفته شد،

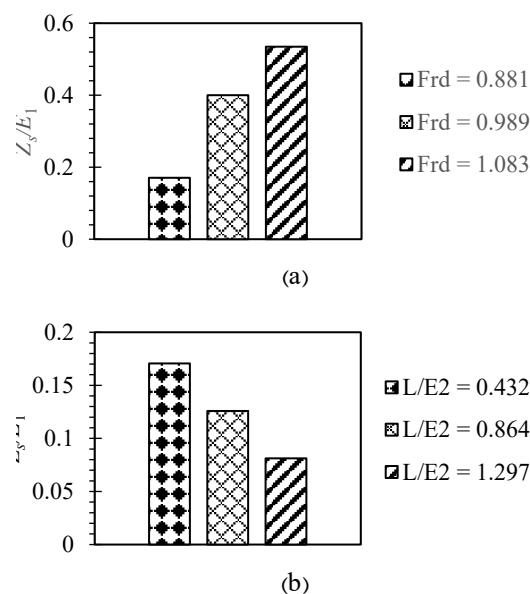
در تحقیق حاضر نیز از سرریز کلید پیانویی ذوزنقه‌ای نوع B در حضور ریپرپ و در شرایط جریان مستغرق استفاده شد. **شکل ۸**، مقایسه میانگین بیشینه عمق آبشستگی در تحقیق حاضر را با مطالعه Babakhah and Khoshfetrat (2024) نشان می‌دهد. همان‌طور که پیدا است، بیشینه عمق آبشستگی در شرایط جریان مستغرق بسیار کمتر (حدود ۲۱/۶ درصد) از بیشینه عمق آبشستگی در حالت جریان آزاد است. به‌طور مثال در ریپرپ‌هایی با طول ۰/۱، ۰/۲ و ۰/۳ متر و در شرایط جریان آزاد، بیشینه عمق آبشستگی حدود ۲۳/۶، ۲۳/۸ و ۱۵/۳ درصد بیشتر از بیشینه عمق آبشستگی در ریپرپ‌هایی با همین طول و در حالت جریان مستغرق است.

همان‌طور که گفته شد، افزایش عمق پایاب تاثیر زیادی بر قدرت جت‌ها و طول انتشار دارد. همچنین سرعت جریان و قدرت گردابه‌ها با افزایش عمق پایاب، کاهش می‌یابند. Babakhah and Khoshfetrat (2024) نیز بیشینه عمق آبشستگی در سرریزهای بدون ریپرپ را نیز مورد بررسی قرار دادند. همان‌طور که پیدا است، وجود ریپرپ نیز بیشینه عمق آبشستگی را کاهش می‌دهد و دلیل آن کاهش قدرت



**Fig. 8** Comparison of the maximum scour depth of the present study with the study of Babakhah and Khoshfetrat (2024)

**شکل ۸** مقایسه بیشینه عمق آبشستگی مطالعه حاضر با مطالعه Babakhah and Khoshfetrat, (2024)



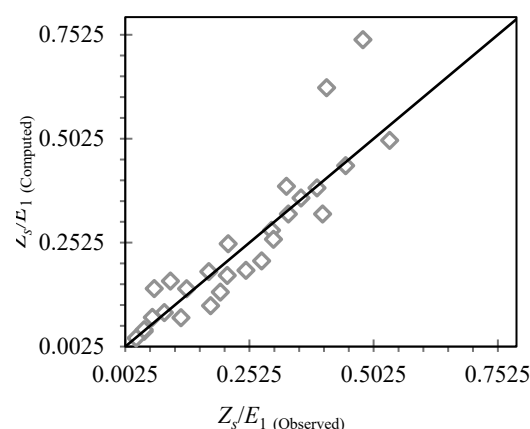
**Fig. 6** The effect of  $Fr_d$  and  $L/E_2$  parameters on the maximum dimensionless scour depth

**شکل ۶** تاثیر پارامترهای  $Fr_d$  و  $L/E_2$  بر بیشینه عمق آبشستگی بدون بعد شده

**جدول ۲** مقادیر ضرایب K جهت محاسبه بیشینه عمق آبشستگی

**Table 2** K coefficient values for calculating maximum scour depth

Row	L	K <sub>1</sub>	K <sub>2</sub>	K <sub>3</sub>
1	0.1	1.300	4.900	1.600
2	0.2	1.300	8.200	8.100
3	0.3	0.035	9.900	8.200



**Fig. 7** Calculated and observed values of maximum scour depth

**شکل ۷** مقادیر محاسبه شده و مشاهده شده بیشینه عمق آبشستگی

مستغرق را نشان می‌دهد. بر اساس **شکل ۹**، میانگین شاخص آبخستگی در سرریزهای با طول ریپرپ ۰/۱۰ متر برابر ۰/۷۹۵، در سرریزهای با طول ریپرپ ۰/۲۰ متر برابر ۰/۳۹۴ و در سرریزهای با طول ریپرپ ۰/۳۰ متر برابر ۰/۲۳۲ است.

#### ۴- نتیجه‌گیری

این مطالعه به بررسی کاهش آبخستگی موضعی در پایین‌دست سرریز کلید پیاپویی نوع B با استفاده از ریپرپ و در شرایط جریان مستغرق پرداخت. وجود ریپرپ به‌طور قابل توجهی بیشینه عمق آبخستگی را کاهش داد، به‌طوری که ریپرپ‌های با طول ۰/۳۰ متر، موثرتر از دیگر از طول ریپرپ‌ها بودند. این مطالعه رابطه‌ای را برای محاسبه بیشینه عمق آبخستگی با ضریب همبستگی نسبتاً بالایی ارائه داد. محدوده پارامترهای بدون بعد مورد استفاده در این تحقیق (مانند  $Fr_d$  و  $L/E_2$ ) را می‌توان در **جدول ۱** مشاهده کرد. همان‌طور که بحث شد، ریپرپ، جریان را به فاصله بیشتری از پنجه سرریز می‌فرستد که می‌تواند آبخستگی موضعی را کاهش داده و آن را از پنجه سرریز دورتر کند. همچنین، این امر به طراحی کارآمدتر و اقتصادی‌تر فونداسیون سرریز کمک می‌کند. علاوه‌براین، وجود ریپرپ در حالت جریان مستغرق در مقایسه با سایر سازه‌های کاهش‌دهنده آبخستگی، طراحی ساده‌تر، طبیعی‌تر و اقتصادی‌تری دارد. به‌طور کلی می‌توان گفت که:

- ♦ ریپرپ در حالت جریان مستغرق به‌طور قابل توجهی عمق آبخستگی را کاهش می‌دهد.
- ♦ به‌دلیل عدم وجود لبه آویزان در پایین‌دست سرریز کلید پیاپویی نوع B، جریان خروجی از کلیدهای ورودی به نزدیکی پنجه سرریز می‌ریزند که همین امر باعث افزایش آبخستگی در کنار پنجه سرریز می‌شود.
- ♦ ریپرپ، حفره آبخستگی را کشیده‌تر کرده و بیشینه عمق آبخستگی را از پنجه سرریز دور می‌کند.
- ♦ ریپرپ‌های با طول بیشتر، کمترین عمق آبخستگی و بیشترین فاصله از پنجه سرریز را ارائه می‌دهند.
- ♦ شاخص آبخستگی، برای حالت جریان مستغرق با ریپرپ دارای طول بیشتر، کمترین مقدار را نشان می‌دهد.

جت‌های خروجی از سرریز روی مصالح ریپرپ است.

بیشینه فاصله عمق آبخستگی نسبت به پنجه سرریز، پارامتر بسیار مهمی در آبخستگی است. در سرریزهای دارای ریپرپ و در حالت جریان مستغرق، با افزایش دبی جریان، بیشینه عمق آبخستگی افزایش و با افزایش عمق پایاب، کاهش می‌یابد. با افزایش فاصله بیشینه عمق آبخستگی نسبت به پنجه سرریز، خطر واژگونی سرریز کاهش است. همان‌طور که قبلاً گفته شد، حفره آبخستگی در حضور ریپرپ طولانی‌تر می‌شود. از این رو، وجود ریپرپ، بیشینه فاصله عمق آبخستگی نسبت به پنجه سرریز را افزایش می‌دهد. به‌طور میانگین، فاصله بیشینه عمق آبخستگی نسبت به پنجه سرریز در ریپرپ‌های با طول ۰/۱، ۰/۲ و ۰/۳ متر به‌ترتیب برابر ۰/۱۷، ۰/۲۹ و ۰/۴۰ متر است. همان‌طور که پیدا است با افزایش ۵۰ و ۶۶/۷ درصد طول ریپرپ‌ها به‌ترتیب این فاصله حدود ۴۱/۴ و ۵۷/۵ درصد افزایش می‌یابد.

شاخص آبخستگی یکی از پارامترهای مهم در آبخستگی است. یکی از روابط پیشنهادی برای شاخص آبخستگی، نسبت دو برابر حداکثر عمق آبخستگی به حداکثر فاصله عمق آبخستگی نسبت به پنجه سرریز است ( $Si = 2Z_s/X_s$ ) (Fathi et al., 2024). مقدار کمتر شاخص آبخستگی به معنای خطر کمتر واژگونی سرریز است. فاصله بیشتر از پنجه سرریز یا بیشینه عمق آبخستگی کمتر با مقدار کمتر شاخص آبخستگی نشان داده می‌شود. کاهش بیشینه عمق آبخستگی و افزایش فاصله از پنجه سرریز، احتمال شکست و واژگونی سازه‌های هیدرولیکی و سرریزها را کاهش می‌دهد (Fathi et al., 2024). **شکل ۹** میانگین شاخص آبخستگی در سرریزهای دارای ریپرپ در حالت جریان

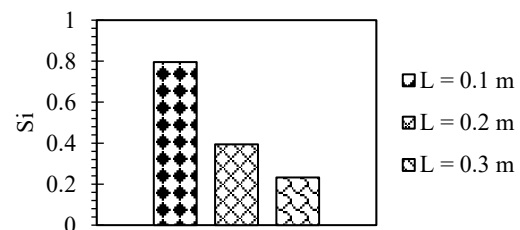


Fig. 9 Average scour index

شکل ۹ میانگین شاخص آبخستگی

## 5- List of symbols

$B^*$ (m)	Weir side wall length
$B_i$ (m)	Length of the inlet overhanging edge
$d_{50}$ (m)	Mean diameter of bed particles
$d_r$ (m)	Mean diameter of riprap particles
$d_{16}$ (m)	Diameter of 16% of particles smaller than
$d_{84}$ (m)	Diameter of 84% of particles smaller than
$E_1$ (m)	Flow energy upstream of the weir
$E_2$ (m)	Flow energy downstream of the weir
$Fr_d$ (-)	Froude number of particles
$g$ ( $ms^{-2}$ )	Gravity force
$h$ (m)	Flow depth upstream of the weir
$H$ (m)	Total flow head upstream of the weir
$L$ (m)	Riprap length
$L^*$ (m)	Length of weir crest
$P$ (m)	Weir height
$q$ ( $m^2s^{-1}$ )	Discharge per unit width
$Q$ ( $m^3s^{-1}$ )	Flow rate
$Re$ (-)	Reynolds number
$T_s$ (m)	Weir thickness
$V_1$ ( $ms^{-1}$ )	Flow velocity upstream of the Weir
$V_2$ ( $ms^{-1}$ )	Flow velocity at the downstream of the weir
$W$ (m)	Width of the weir
$W_i$ (m)	Width of the weir inlet keys
$W_o$ (m)	Width of the weir outlet keys
$We$ (-)	Weber number
$X_s$ (m)	Distance of maximum scour depth from the weir toe
$y$ (m)	Tailwater depth
$Y$ (m)	Total head tailwater depth
$Z_s$ (m)	Maximum scour depth
$\rho$ ( $kgm^{-3}$ )	Water density
$\rho_s$ ( $kgm^{-3}$ )	Density of the bed material
$\mu$ ( $kgm^{-1}s^{-1}$ )	Dynamic viscosity
$\sigma$ ( $kgs^{-2}$ )	Coefficient of surface tension

## Acknowledgments

We hereby express our deep gratitude and appreciation to the Islamic Azad University of Isfahan (Khorasgan) for providing the hydraulic laboratory.

## Credit Authorship Contribution Statement

Conceptualization, L.B., and A.Kh.; methodology, L.B., and A.Kh.; experiment, L.B., and A.Kh.; data analysis, A.Kh.; writing—original draft preparation, L.B., and A.Kh.; writing—review and editing, L.B., A.Kh., and E.D.; supervision, A.Kh. All authors

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

## Funding

No financial support was received from any organization for this research.

## Data Availability Statement

The raw data supporting the conclusions of this article will be made available by the authors upon request.

## Conflicts of Interest

The authors declare no conflict of interest.

## References

- Abdi Chooplou, Ch., Ghodsian, M., Abediakbar, D., & Ghafouri, A. 2023. "An experimental and numerical study on the flow field and scour downstream of rectangular piano key weirs with crest indentations". *Innovative Infrastructure Solutions*, 8(5), 140. DOI: [10.1007/s41062-023-01108-7](https://doi.org/10.1007/s41062-023-01108-7)
- Abdi Chooplou, C., Ghodsian, M. and Ghafouri, A., 2024a. "Local scour downstream of various shapes of piano key weirs". *Innovative Infrastructure Solutions*, 9(4), p.117. DOI: [10.1007/s41062-024-01411-x](https://doi.org/10.1007/s41062-024-01411-x)
- Abdi Chooplou, C., Kahrizi, E., Fathi, A., Ghodsian, M. and Latifi, M., 2024b. "Baffle-Enhanced Scour Mitigation in Rectangular and Trapezoidal Piano Key Weirs: An Experimental and Machine Learning Investigation". *Water*, 16(15), p.2133. DOI: [10.3390/w16152133](https://doi.org/10.3390/w16152133)
- Babakhah, L. and Khoshfetrat, A., 2024. "Investigating local scour downstream of Piano key weir with Riprap". *Innovative Infrastructure Solutions*, 9(11), pp.1-15. DOI: [10.1007/s41062-024-01759-0](https://doi.org/10.1007/s41062-024-01759-0)
- Bodaghi E, Abdi Chooplou Ch, 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.*, 71. DOI: [10.2478/johh-2023-0041](https://doi.org/10.2478/johh-2023-0041)
- Bodaghi, E., Ghodsian, M. and Abdi Chooplou, Ch., 2023. "The experimental study of downstream scouring of trapezoidal Piano key weir type A under free and submerged flow". *Journal of Hydraulics*, Vol. 18, Issue 1. DOI: [10.30482/JHYD.2022.330389.1590](https://doi.org/10.30482/JHYD.2022.330389.1590)
- Dehghan, M. and Karami, H., 2024. "Numerical investigation of scour downstream of piano key Weirs using Flow-3D software". *Amirkabir Journal of Civil Engineering*, 56(2), pp.203-228. DOI: [10.22060/CEEJ.2024.22659.8019](https://doi.org/10.22060/CEEJ.2024.22659.8019)

- Dehrashid, F.A., Gohari, S., Asim, T., Mishra, R., Khoshkonesh, A., Bahamanpouri, F. & Nsom, B., 2022. "Experimental and numerical study of local scouring downstream of D-type piano key weir". *International Journal of COMADEM*, 25(1), pp.51-62.
- Einstein, H.A., (1950). "The bed-load function for sediment transportation in open channel flows (No. 1026)". *US Department of Agriculture*.
- Eslinger, K. R. and Crookston, B.M., 2020. "Energy dissipation of type a piano key weirs". *Water*, 12(5), p.1253. DOI: [10.3390/w12051253](https://doi.org/10.3390/w12051253)
- Fathi, A., Khoshfetrat, A. and Alavi, S.H., 2025a. "Downstream Local Scour of PKW with Different Shapes and Numbers of Flow Splitters". *Journal of Hydraulic Engineering*, 151(4), p.04025015. DOI: [10.1061/JHEND8.HYENG-1414](https://doi.org/10.1061/JHEND8.HYENG-1414)
- Fathi, A., Khoshfetrat, A., Talebipour, F. and Saadat, M., 2025b. "Influence of rigid vegetation on flow energy dissipation downstream of type B trapezoidal piano key weirs". *Innovative Infrastructure Solutions*, 10(8), pp.1-15. DOI: [10.1007/s41062-025-02172-x](https://doi.org/10.1007/s41062-025-02172-x)
- Fathi, A., Abdi Chooplou, C. and Ghodsian, M., 2024. "Local scour downstream of type-A trapezoidal stepped piano key weir in sand and gravel sediments". *ISH Journal of Hydraulic Engineering*, pp. 1–13. DOI: [10.1080/09715010.2024.2353612](https://doi.org/10.1080/09715010.2024.2353612)
- Fathi, A., Abdi Chooplou, Ch. and Ghodsian, M., 2023. "An Experimental Study of Flow Energy Loss in Trapezoidal Stepped Piano Key Weirs (PKWs)". *Modares Civil Engineering journal*, 23(4), pp.163-174. DOI: [10.22034/23.4.163](https://doi.org/10.22034/23.4.163)
- Farbiz, P., Chooplou, C.A. and Ghodsian, M., 2025. "The influence of submergence on scour at triangular piano key weirs". *Journal of Hydrology and Hydromechanics*, 73(1), pp.34-50. DOI: [10.2478/johh-2025-0002](https://doi.org/10.2478/johh-2025-0002)
- Ghafouri, A., Ghodsian, M. & Abdi Chooplou, Ch., 2020. "Experimental study on the effect of discharge and tailwater depth on bed topography downstream of a piano key weir". *Journal of Hydraulics*, 15(3), pp.107-122. DOI: [10.30482/JHYD.2020.236770.1465](https://doi.org/10.30482/JHYD.2020.236770.1465)
- Ghodsian, M., Abdi Chooplou, Ch. & Ghafouri, A., 2021. "Scouring of triangular and trapezoidal pianos key weir". *Journal of Hydraulics*, 16(2), pp.43-58. DOI: [10.30482/JHYD.2021.261439.1497](https://doi.org/10.30482/JHYD.2021.261439.1497)
- Iqbal, M. and Ghani, U., 2024. "Effect of variation in key slope ratios and key width ratios on energy dissipation over a piano key weir". *Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Civil Engineering*, pp.1-15. DOI: [10.1007/s40996-023-01312-6](https://doi.org/10.1007/s40996-023-01312-6)
- Gohari, S. & Ahmadi, F., 2019. "Experimental study of downstream scour of piano keys weirs". *Journal of Water and Soil Conservation*, 26(1), pp.91-109. DOI: [10.22069/JWSC.2019.14680.2961](https://doi.org/10.22069/JWSC.2019.14680.2961)
- Jamal, A.A.R., Tahaa, K.Y. and Hayawi, G.A.A.M., 2022. "Experimental Study of Scour Downstream Piano Key Weir Type C with Changing Height of Weir Width of Keys and Apron Solid". *Al-Rafidain Engineering Journal (AREJ)*, 27(1), pp.193-204. DOI: [10.33899/rengj.2021.130402.1101](https://doi.org/10.33899/rengj.2021.130402.1101)
- Jüstrich, S., Pfister, M. & Schleiss, A.J., 2016. "Mobile riverbed scouring downstream of a piano key weir". *Journal of Hydraulic Engineering*, 142(11), p.04016043. DOI: [10.1061/ASCE HY.1943-7900.0001189](https://doi.org/10.1061/ASCE HY.1943-7900.0001189)
- Kazerooni, S., Abdi Chooplou, C. and Ghodsian, M., 2024. "Effects of flow splitters on local scour downstream of type-A trapezoidal piano key weir". *Applied Water Science*, 14(12), p.247. DOI: [10.1007/s13201-024-02309-w](https://doi.org/10.1007/s13201-024-02309-w)
- Kumar, B. & Ahmad, Z., 2022. "Scour downstream of a piano key weir with and without a solid apron". *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 148(1), p.04021066. DOI: [10.1061/\(ASCE\)IR.1943-4774.0001647](https://doi.org/10.1061/(ASCE)IR.1943-4774.0001647)
- Lantz, W., Crookston, B.M. & Palermo, M., 2021. "Apron and cutoff wall scour protection for piano key weirs". *Water*, 13(17), p.2332. DOI: [10.3390/w13172332](https://doi.org/10.3390/w13172332)
- Lidya, D., Tallar, R.Y. and Suwono, A.Y., 2022. "The Experimental Study of Optimum Thickness on Riprap Layer Design". *Pan*, 45, pp.4-52.
- Mshali, K.C., Khoshfetrat, A. and Fathi, A., 2024. "Experimental study of the effect of jump on the Downstream Scouring of type-C trapezoidal piano key weir". *Amirkabir Journal of Civil Engineering*, 56(11), pp.1353-1368. DOI: [10.22060/ceej.2024.22565.7996](https://doi.org/10.22060/ceej.2024.22565.7996)
- Novák, P. & Čabelka, J., 1981. "Models in hydraulic engineering: Physical principles and design applications". *Monographs & surveys in water resources engineering*.
- Panthi, M., 2025. "A Laboratory Study of Local Scour and Driftwood Effects at a Type a Piano Key Weir". DOI: [10.26076/e209-99f7](https://doi.org/10.26076/e209-99f7)
- Parker, G. 2008. "Transport of gravel and sediment mixtures." *In Sedimentation engineering: Processes, measurements, modelling and practice*, edited by M. Garcia, 165–251. Reston, VA: ASCE.
- Rdhaiwi, A.Q., Khoshfetrat, A. and Fathi, A., 2024. "Experimental comparison of flow energy loss in type-B and-C trapezoidal piano key weirs". *Journal of Engineering and Sustainable Development*, 28(1), pp.55-64. DOI: [10.3390/eng28010055](https://doi.org/10.3390/eng28010055)

- [10.31272/jeasd.28.1.4](https://doi.org/10.31272/jeasd.28.1.4)  
Rdhaiwi, A.Q., Khoshfetrat, A. and Fathi, A., 2023. "Experimental investigation of scour downstream of a C-Type trapezoidal piano key weir with stilling basin". *Journal of Engineering and Sustainable Development*, 27(6), pp.688-697. DOI: [10.31272/jeasd.27.6.2](https://doi.org/10.31272/jeasd.27.6.2)
- Ribeiro, M.L., Pfister, M., Schleiss, A.J. and Boillat, J.L., 2012. "Hydraulic design of A-type piano key weirs". *Journal of Hydraulic Research*, 50(4), pp.400-408. DOI: [10.1080/00221686.2012.695041](https://doi.org/10.1080/00221686.2012.695041)
- Sumer, B.M. & Fredsoe, J., 1991, August. "Onset of scour below a pipeline exposed to waves". In *The First International Offshore and Polar Engineering Conference*. OnePetro DOI: [10.1115/OMAE2010-20719](https://doi.org/10.1115/OMAE2010-20719)
- Yazdi, A., Hosseini, S.A., Nazari, S. & Amanian, N., 2020. "Comparison of downstream scour of the rectangular and trapezoidal piano key weirs". *Journal of Hydraulics*, 15(2), pp.95-112. DOI: [10.30482/JHYD.2020.227522.1453](https://doi.org/10.30482/JHYD.2020.227522.1453)
- Yazdi, A.M., Hoseini, S., Nazari, S. and Fazeli, M., 2022. "Numerical and experimental analysis of scour downstream of piano key weirs". *Sādhanā*, 47(4), p.189. DOI: [10.1007/s12046-022-01960-w](https://doi.org/10.1007/s12046-022-01960-w)
- Zhou, K., Duan, J.G. and Bombardelli, F.A., 2020. "Experimental and theoretical study of local scour around three pier group". *Journal of Hydraulic Engineering*, 146(10), p.04020069. DOI: [10.1061/\(ASCE\)HY.1943-7900.00017](https://doi.org/10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.00017)