

# بررسی آزمایشگاهی تأثیر جامپ بر آبشستگی پایین دست سرریز کلیدپیانویی ذوزنقه‌ای نوع C

کاظم جلوب مشالی<sup>۱</sup>، علی خوش فطرت<sup>۲\*</sup>، امیرحسین فتحی<sup>۳</sup>

۱. گروه مهندسی عمران، واحد اصفهان (خوراسگان)، دانشگاه آزاد اسلامی، اصفهان، ایران.
۲. گروه مهندسی عمران، واحد اصفهان (خوراسگان)، دانشگاه آزاد اسلامی، اصفهان، ایران.
۳. گروه مهندسی عمران، دانشکده عمران و محیط زیست، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران.

## چکیده

سرریزهای کلیدپیانویی شکل جدید و تکامل یافته‌ی سرریزهای کنگره‌ای هستند. بررسی اتلاف انرژی و آبشستگی پایین دست سرریزهای کلیدپیانویی، به دلیل راندمان بالای این سازه‌ها و کاهش خطرات مالی و جانی، اهمیت بیشتری دارد. در این تحقیق از یک سرریز کلیدپیانویی ذوزنقه‌ای نوع C و با ارتفاع ۰/۲ متر استفاده شد. همچنین از دو جامپ با شعاع ۰/۱۵ و ۰/۲۱ متر در انتهای کلیدهای خروجی سرریز نیز استفاده شد. پس از تنظیم دبی جریان و عمق پایاب، آبشستگی آغاز می‌شد و سپس با گذشت زمان تعادل، پمپ خاموش شده و بعد از زهکشی کامل، پروفیل بستر توسط متر لیزری برداشت شد. نتایج چنین بود که وجود جامپ باعث افزایش بیشینه عمق آبشستگی می‌شود؛ همچنین وجود جامپ باعث دور شدن فاصله‌ی بیشینه عمق آبشستگی از پنجه سرریز می‌شود. با افزایش شعاع جامپ‌ها، بیشینه عمق آبشستگی نیز افزایش می‌یابد. طول بیشینه عمق آبشستگی نسبت به پنجه سرریز با شعاع بیشتر حدود ۱۲ درصد بیشتر از طول بیشینه عمق آبشستگی نسبت به پنجه سرریز با شعاع کمتر است. میانگین طول بیشینه عمق آبشستگی نسبت به پنجه در سرریزهای با شعاع جامپ ۰/۲۱ متر و ۰/۱۵ متر نسبت به سرریز بدون جامپ، حدود ۲۹/۴ و ۱۹/۵ درصد بیشتر و از پنجه سرریز دورتر است. همچنین وجود جامپ باعث کاهش آبشستگی در پنجه سرریز شد. آبشستگی پنجه سرریز، در سرریز با ارتفاع جامپ بزرگتر نسبت به سرریز بدون جامپ، حدود ۴۲ درصد کمتر است. میانگین شاخص آبشستگی در سرریزهای با شعاع جامپ ۰/۲۱ و ۰/۱۵ متر نسبت به سرریز بدون جامپ، حدود ۲/۷۷ و ۰/۵۲ درصد کمتر است. همچنین با افزایش شعاع جامپ، ضریب آبگذری کاهش می‌یابد.

## کلمات کلیدی

سرریز کلیدپیانویی، آبشستگی موضعی، تأثیر جامپ، بررسی آزمایشگاهی، ضریب آبگذری.

\* نویسنده‌ی عهده‌دار مکاتبات: [khoshfetrat@khuisf.ac.ir](mailto:khoshfetrat@khuisf.ac.ir)

به دلیل فونداسیون سبک و ضریب آبگذری بالا در سرریزهای کلیدپیانویی؛ لذا بررسی آبشستگی موضعی پایین دست این سازه‌های هیدرولیکی و راهکار برای کاهش آن، دارای اهمیت بالایی است. سرریزهای کلیدپیانویی دارای شکل‌های مثلثی، مستطیلی و دوزنقه‌ای در پلان و دارای چهار تیپ A، B، C و D هستند. نوع A دارای لبه آویزان در بالادست و پایین دست سرریز، نوع B و C به ترتیب دارای لبه آویزان در بالادست و پایین دست سرریز و نوع D فاقد لبه آویزان است. مطالعات زیادی در مورد تأثیر پارامترهای هندسی و هیدرولیکی بر ضریب آبگذری این سرریزها انجام شده است؛ اما افراد کمتری به بررسی آبشستگی آن‌ها پرداخته‌اند. جاستریچ و همکاران (۲۰۱۶)، به بررسی آزمایشگاهی سرریز کلیدپیانویی مستطیلی نوع A پرداختند و دریافتند که عمق پایاب، دبی، قطر مصالح و ارتفاع ریزش جریان بر آبشستگی تأثیر می‌گذارند. با افزایش دبی، کاهش قطر مصالح بستر، کاهش عمق پایاب و افزایش ارتفاع ریزش جریان، آبشستگی افزایش می‌یابد [1]. گوهری و احمدی (۲۰۱۹)، با بررسی آزمایشگاهی سرریز کلیدپیانویی مستطیلی نوع A دریافتند که با افزایش تعداد کلیدهای سرریز، آبشستگی افزایش می‌یابد [2]. غفوری و همکاران (۲۰۲۰)، با بررسی آزمایشگاهی سرریز کلیدپیانویی دوزنقه‌ای شکل نوع A دریافتند که عمق پایاب و دبی جریان روی آبشستگی تأثیرگذارند [3]. کومار و احمد (۲۰۲۰) با بررسی آزمایشگاهی روی سرریز کلیدپیانویی مستطیلی کفبنددار نوع A دریافتند که وجود کفبند باعث کاهش آبشستگی می‌شود [4]. یزدی و همکاران (۲۰۲۰)، با بررسی آزمایشگاهی روی سرریز کلیدپیانویی دوزنقه‌ای و مستطیلی نوع A دریافتند که میزان آبشستگی سرریز کلیدپیانویی دوزنقه‌ای کمتر از میزان آبشستگی سرریز کلیدپیانویی مستطیلی است [5]. قدسیان و همکاران (۲۰۲۱)، با بررسی آزمایشگاهی سرریزهای کلیدپیانویی دوزنقه‌ای و مثلثی نوع A دریافتند که آبشستگی در سرریز دوزنقه‌ای به مراتب کمتر از سرریز مثلثی شکل است [6]. جمال و همکاران (۲۰۲۱)، با بررسی آزمایشگاهی روی سرریز کلیدپیانویی دوزنقه‌ای نوع C دریافتند که با کاهش ارتفاع سرریز و کاهش نسبت عرض کلیدهای ورودی به عرض کلیدهای خروجی، میزان آبشستگی و بیشینه عمق آبشستگی کاهش می‌یابد [7]. لنتز و همکاران (۲۰۲۱)، با ایجاد کفبند پایین دست سرریز کلیدپیانویی مستطیلی نوع A دریافتند که با وجود کفبند، میزان آبشستگی کاهش می‌یابد. ایشان همچنین طول کفبند بهینه را  $1/5$  برابر ارتفاع سرریز در نظر گرفتند [8]. عبدی چوپلو و همکاران (۲۰۲۲)، با بررسی آزمایشگاهی سرریز کلیدپیانویی دوزنقه‌ای نوع A دریافتند که با افزایش عدد فرود ذرات، آبشستگی نیز افزایش می‌یابد [9]. همچنین ایشان در تحقیقی جداگانه و با بررسی آزمایشگاهی روی سرریز کلیدپیانویی دوزنقه‌ای نوع A دریافتند که با افزایش عمق پایاب، حفره آبشستگی کاهش می‌یابد [10]. بدایعی و همکاران (۲۰۲۲)، با بررسی آزمایشگاهی روی سرریز کلیدپیانویی دوزنقه‌ای نوع A دریافتند که آبشستگی در حالت جریان مستغرق به مراتب کمتر از آبشستگی در حالت جریان آزاد است [11].

با توجه به راندمان بالای سرریزهای کلیدپیانویی نسبت به سرریزهای خطی؛ لذا مطالعه آبشستگی در مورد آنها دارای اهمیت بالایی است. همچنین با توجه به مطالب بالا و تحقیقات صورت گرفته روی آبشستگی سرریزهای کلیدپیانویی، در مورد وجود جامپ و عملکرد آن بر کاهش یا افزایش آبشستگی، مطالعه‌ای صورت نگرفته است. دورشدن بیشینه عمق آبشستگی از پنجه سرریز و کاهش آبشستگی در پنجه سرریز نیز دارای اهمیت بالایی هستند؛ زیرا باعث کاهش خطر واژگونی سرریز می‌شوند. در این مطالعه سعی شد از سرریز کلیدپیانویی دوزنقه‌ای با ارتفاع ۰/۲ متر و دو جامپ با ارتفاع و شعاع‌های ۰/۱۴، ۰/۰۷۵، ۰/۲۱ و ۰/۱۵ استفاده شود تا تأثیر آن بر کاهش مقدار آبشستگی در پنجه سرریز و فاصله بیشینه عمق آبشستگی نسبت به پنجه سرریز مشخص گردد. همچنین از سه عمق پایاب، سه دبی و مصالح شن در بستر پایین دست سرریز استفاده گردید.

## ۲- آنالیز ابعادی

رابطه (۱)، پارامترهای موثر بر آبشستگی پایین دست سرریز کلیدپیانویی دوزنقه‌ای نوع C را همراه با جامپ نشان می‌دهد.

$$Z_t, X_s, Z_s = f(q, H_u, H_d, g, \mu, \sigma, \rho_w, \rho_s, d_{50}, R, h) \quad (1)$$

در رابطه بالا  $Z_t$  آبشستگی پنجه سرریز،  $X_s$  فاصله بیشینه عمق آبشستگی از پنجه سرریز و  $Z_s$  ارتفاع بیشینه عمق آبشستگی هستند که در روابط آنها بصورت  $\emptyset$  نشان داده شده اند. همچنین  $q$  دبی در واحد عرض،  $H_u$  عمق جریان به علاوه ارتفاع معادل انرژی جنبشی در بالادست سرریز،  $H_d$  عمق جریان به علاوه ارتفاع معادل انرژی جنبشی در پایاب،  $g$  شتاب گرانش،  $\mu$  لزجت دینامیکی،  $\sigma$  ضریب کشش سطحی،  $\rho_w$  چگالی آب،  $\rho_s$  چگالی مصالح بستر،  $d_{50}$  قطر متوسط ذرات،  $R$  شعاع جامپ و  $h$  ارتفاع جامپ هستند. با استفاده از تئوری پی باکینگهام و در نظر گرفتن سه متغیر تکراری دبی در واحد عرض، چگالی آب و عمق جریان به علاوه ارتفاع معادل انرژی جنبشی در بالادست سرریز، روابط بدون بعد زیر حاصل می‌شوند.

$$\frac{\phi}{H_u} = f\left(\frac{H_d}{H_u}, Fr = \frac{q}{H_u(gH_u)^{0.5}}, Re = \frac{q}{\nu}, We = \frac{\rho_w q^2}{H_u \sigma}, \frac{\rho_s - \rho_w}{\rho_w} = S - 1, \frac{d_{50}}{H_u}, \frac{R}{H_u}, \frac{h}{H_u}\right) \quad (2)$$

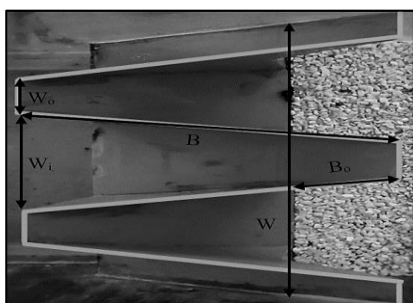
به دلیل آشفتگی زیاد جریان از عدد رینولدز صرف نظر می‌شود (سامر و فردوسو، ۱۹۹۱) و همچنین به دلیل عمق بیشتر از ۰/۰۳ متر روی تاج سرریز، از عدد وبر صرف نظر خواهد شد (نواک و همکاران، ۱۹۹۸) [12,13]. با ترکیب عدد فرود، پارامتر  $\frac{d_{50}}{H_u}$  پارامتر S-1 و پارامتر  $\frac{H_d}{H_u}$  عدد بدون بعد  $Fr_d = \frac{q}{H_d \sqrt{gd_{50}(S-1)}}$  حاصل می‌شود. همچنین با ترکیب دو پارامتر  $\frac{R}{H_u}$  و  $\frac{h}{H_u}$  پارامتر  $\frac{R}{h}$  حاصل می‌شود.

(۳)

$$\frac{\phi}{H_u} = f(Fr_d, \frac{R}{h})$$

### ۳- مواد و روش‌ها

آزمایش‌ها در یک فلوم آزمایشگاهی به طول ۱۰ متر، عرض ۰/۶ متر و ارتفاع ۰/۸ متر انجام شد. مطابق شکل ۱، جریان توسط دو مخزن سطحی وارد مخزن دارای آرام‌کننده‌های جریان شده و سپس وارد فلوم آزمایشگاهی می‌شود و پس از طی ۵/۵ متر به سرریز می‌رسد. مطابق شکل ۲، سرریز دارای عرض  $W=0/6$  m، ارتفاع  $P=0/2$  m، عرض کلید ورودی  $W_i=0/215$  m، عرض کلید خروجی  $W_o=0/075$  m، طول لبه آویزان در پایین دست سرریز  $B_o=0/13$  m، طول دیواره‌های جانبی  $B=0/5$  m، طول تاج  $L=2/6$  m و ضخامت تاج  $T_s=0/01$  m است. از سه دبی ۰/۰۳، ۰/۰۳۵ و ۰/۰۴ متر مکعب بر ثانیه استفاده شد. تنظیم دبی به وسیله‌ی یک شیر و یک مانیتور (برای نشان دادن مقدار آن) با خطای  $\pm 0/01$  درصد صورت گرفت (شکل ۳). همچنین توسط دریچه در انتهای کانال آزمایشگاهی، سه عمق پایاب برابر با ۰/۰۵، ۰/۱ و ۰/۱۵ متر تنظیم شد. قبل از روشن کردن پمپ، از یک ورق گالوانیزه بر روی بستر استفاده شد و پس از تنظیم دبی و عمق پایاب، این بستر فلزی از روی بستر به آرامی برداشته شد تا از آبستتگی اولیه جلوگیری شود. مصالح شن مورد استفاده دارای دانه‌بندی یکنواخت، قطر متوسط ذرات برابر ۰/۰۰۷۵ متر و با چگالی ویژه برابر ۲/۶۵ است. جامپ‌های مورد استفاده در انتهای کلیدهای خروجی سرریز دارای شعاع ۰/۲۱، ۰/۱۵ متر و به ترتیب دارای ارتفاع ۰/۱۴ و ۰/۰۷۵ متر هستند. پس از گذشت مدت زمان ۱۵۰ دقیقه، پمپ را خاموش کرده و پس از زهکشی، بستر توسط متر لیزری برداشت شد. تغییرات آبستتگی در زمان ۱۵۰ دقیقه برای شن کمتر از یک میلی‌متر است و برابر با معیار چپو (۱۹۹۲)، این زمان به عنوان زمان تعادل در نظر گرفته شد [14]. همچنین عمق بالادست سرریز توسط عمق‌سنج سوزنی با خطای  $\pm 1$  میلی‌متر اندازه‌گیری شد. جدول ۱ مشخصات داده‌های هیدرولیک جریان در آزمایش‌ها را نشان می‌دهد که در آن  $Q$  دبی جریان،  $h_u$  عمق جریان در بالادست سرریز و  $h_d$  عمق جریان در پایین دست سرریز است.



شکل ۲ سرریز کلیدپیانویی دوزنقه‌ای نوع C

Figure 2 C-type trapezoidal piano key weir



شکل ۱ مشخصات کانال آزمایشگاهی

Figure 1 Laboratory channel specifications



شکل ۳ شیر و مانیتور تنظیم کننده دبی جریان

Figure 3 Flow regulator valve and monitor

جدول ۱ مشخصات هیدرولیکی آزمایشها

Table 1 Hydraulic characteristics of the tests

Row	$Q$ (m <sup>3</sup> /s)	$h_u$ (m)	$h_d$ (m)	$H_u$ (m)	$H_d$ (m)	$Fr_d$	$R/h$
1	0.03	0.033	0.05	0.035	0.101	0.111	1.5
2	0.03	0.033	0.1	0.035	0.113	0.108	1.5
3	0.03	0.033	0.15	0.035	0.156	0.099	1.5
4	0.035	0.037	0.05	0.040	0.119	0.124	1.5
5	0.035	0.037	0.1	0.040	0.117	0.125	1.5
6	0.035	0.037	0.15	0.040	0.158	0.115	1.5
7	0.04	0.041	0.05	0.045	0.141	0.136	1.5
8	0.04	0.041	0.1	0.045	0.123	0.142	1.5
9	0.04	0.041	0.15	0.045	0.160	0.131	1.5
10	0.03	0.031	0.05	0.033	0.101	0.111	2
11	0.03	0.031	0.1	0.033	0.113	0.108	2
12	0.03	0.031	0.15	0.033	0.156	0.099	2
13	0.035	0.035	0.05	0.038	0.119	0.124	2
14	0.035	0.035	0.1	0.038	0.117	0.125	2
15	0.035	0.035	0.15	0.038	0.158	0.115	2
16	0.04	0.039	0.05	0.043	0.141	0.136	2
17	0.04	0.039	0.1	0.043	0.123	0.142	2
18	0.04	0.039	0.15	0.043	0.160	0.131	2
19	0.03	0.030	0.05	0.0334	0.101	0.111	0
20	0.03	0.030	0.1	0.0334	0.113	0.108	0
21	0.03	0.030	0.15	0.0334	0.156	0.099	0
22	0.035	0.034	0.05	0.0372	0.119	0.124	0
23	0.035	0.034	0.1	0.0372	0.117	0.125	0
24	0.035	0.034	0.15	0.0372	0.158	0.115	0
25	0.04	0.038	0.05	0.0419	0.141	0.136	0
26	0.04	0.038	0.1	0.0419	0.123	0.142	0
27	0.04	0.038	0.15	0.0419	0.160	0.131	0

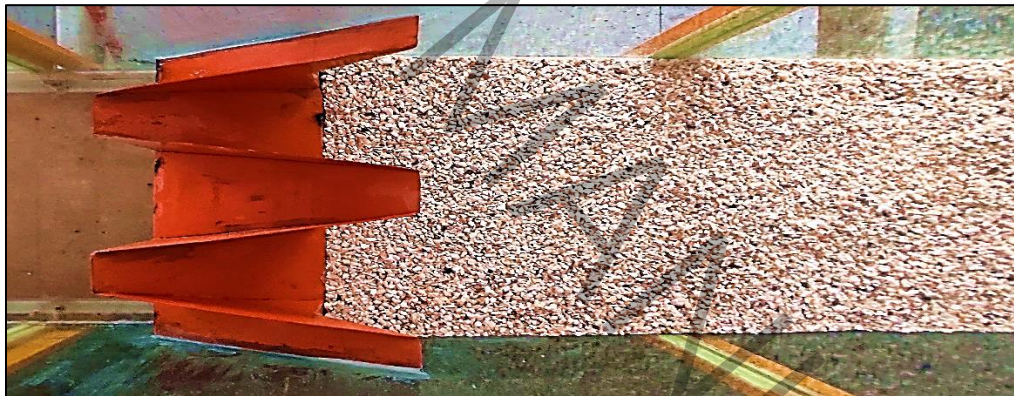
برای تعیین خطاهای مدل عددی از ریشه میانگین مربعات خطای (RMSE) و با توجه به رابطه زیر (۴) استفاده شد. در رابطه،  $O_i$  و  $P_i$  به ترتیب مقادیر مشاهده شده و محاسبه شده را نشان می‌دهند و  $n$  تعداد داده‌های مشاهده شده است.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |P_i - O_i|^2} \quad (4)$$

نرمال‌سازی انحراف جذر میانگین مربعات (normalized root-mean-square deviation) یا خطای (NRMSE) توسط بازه مقادیر مشاهده شده به شرح زیر است که در آن  $X_{max}$  بزرگ‌ترین داده و  $X_{min}$  کوچک‌ترین داده آزمایشگاهی مشاهده شده است.

$$NRMSE = \frac{RMSE}{X_{max} - X_{min}} \quad (5)$$

شکل ۴ نیز مصالح بستر را نشان می‌دهد. مقادیر  $d_{50}/P$  مورد استفاده در تحقیق (Jüstrich et al., 2016) بین ۰/۰۱ تا ۰/۰۴ است [1]. در تحقیق حاضر نیز مقدار  $d_{50}/P$  برای مصالح شن برابر ۰/۰۳۷۵ است. همچنین عمق جریان در بالادست و پایین‌دست سرریز نیز در فاصله‌های 2P و 10P از مرکز سرریز و توسط عمق‌سنج سوزنی و با خطای ۱ میلی‌متر اندازه‌گیری شد [15-17].



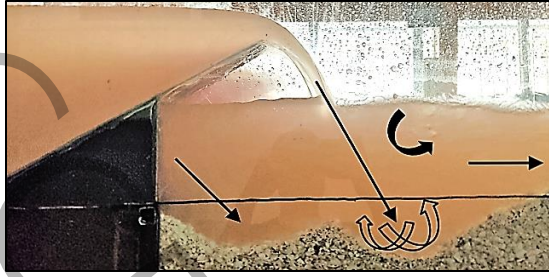
شکل ۴ مصالح بستر در پایین‌دست سرریز کلیدپیانویی

Figure 4 Bed materials downstream of the piano key weir

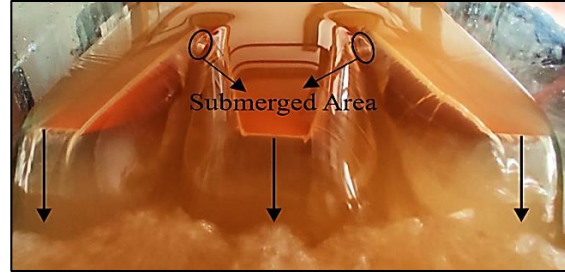
#### ۴- نتایج و بحث

شکل ۵، جریان عبوری از روی سرریز کلیدپیانویی دوزنقه‌ای نوع C را نشان می‌دهد. همانطور که از شکل پیدا است، جریان به صورت جت مایل از کلیدهای خروجی و به صورت جت ریزشی آزاد از کلیدهای ورودی به پایین‌دست می‌ریزد. در سرریز کلیدپیانویی نوع C به دلیل عدم وجود لبه آویزان در بالادست سرریز، شیب کلیدهای خروجی بیشتر بوده و طول ناحیه مستغرق و یا برآمدگی موضعی

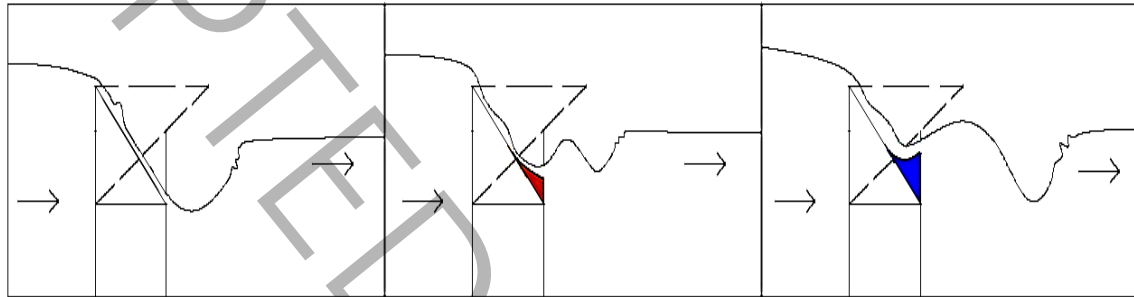
جریان در کلیدهای خروجی بسیار کوچک است. عدم وجود لبه آویزان در بالادست سرریز باعث به وجود آمدن تورفتگی جریان در ورودی کلیدهای خروجی شده است. همچنین با وجود شیب بیشتر در کلیدهای خروجی، آبشستگی در نزدیکی پنجه سرریز ایجاد شده و به دلیل لبه آویزان در پایین دست سرریز، جریان به صورت جت مایل به بستر ریخته و باعث ایجاد اغتشاش جریان در این محل می شود. این اغتشاش جریان باعث برگشت مصالح به طرف پنجه سرریز شده و شیب آبشستگی پایین دست سرریز، مایل تر می گردد و در محل ریزش جریان از لبه آویزان کلید ورودی به بستر، مصالح شن کمی برآمده تر می شوند (شکل ۶). وجود جامپ و ارتفاع آن باعث افزایش عمق جریان در کلیدهای خروجی، پس زدن آب به سمت بالادست سرریز و در نهایت باعث کاهش ضریب آبگذری می شود. شکل ۷، جریان عبوری در کلیدهای خروجی سرریز با و بدون جامپ را نشان می دهد. با این حال، وجود جامپ باعث پرتاب جریان به پایین دست می شود. پس از برخورد جریان به مصالح باعث آبشستگی موضعی در فاصله ای دورتر از پنجه سرریز می شود. همچنین پرش هیدرولیکی ضعیفی در پایین دست سرریز بدون جامپ مشاهده شد. در سرریزهای همراه با جامپ و به خصوص در سرریز همراه جامپ با شعاع بیشتر، پرش هیدرولیکی قوی تر شده و در پایین دست و در محل برخورد به عمق پایاب، باعث ایجاد گردابه هایی می شود. وجود این گردابه ها باعث شسته شدن مصالح و چرخش آن ها می شود. پس از چرخش مصالح و جدا شدن آن ها از سطح بستر، همراه جریان به پایین دست منتقل می شوند. این برخورد و اغتشاش جریان باعث ارتفاع بیشتر آبشستگی می گردد. همچنین پرش هیدرولیکی با افزایش شعاع جامپ ها، در فاصله دورتری از پنجه سرریز شکل می گیرند. برخورد جریان در جامپ ها به بستر مایل تر شده و مانند جت های مایل عمل می کند. پس از برخورد جریان به مصالح، باعث ایجاد گودال و برگشت مصالح به سمت پنجه سرریز می شود. دبی جریان و عمق پایاب بر میزان آبشستگی تأثیرگذار هستند. با افزایش دبی جریان، سرعت جریان نیز افزایش یافته و آبشستگی بیشتر می شود. افزایش سرعت باعث قدرت بیشتر گردابه ها و اغتشاش بیشتر جریان می شود. افزایش دبی، حجم و طول حفره آبشستگی را نیز افزایش می دهد. با کاهش عمق پایاب، مقدار بیشینه عمق آبشستگی نیز افزایش می یابد. وجود عمق پایاب بیشتر باعث کاهش سرعت جریان در پایین دست شده و از بیشتر شدن آبشستگی جلوگیری می کند. با افزایش دبی، عمق جریان در بالادست سرریز افزایش یافته و ضریب آبگذری کاهش می یابد. همچنین با افزایش دبی در سرریزهای جامپ دار، عمق جریان در بالادست سرریز افزایش بیشتری یافته و ضریب آبگذری سرریز کاهش می یابد. میانگین کاهش ضریب آبگذری در سرریز با شعاع جامپ بزرگ تر و در سرریز با شعاع جامپ کوچک تر، به ترتیب برابر  $10/87$  و  $3/86$  درصد نسبت به سرریز بدون جامپ است. به طور میانگین، مقدار ضریب آبگذری در سرریز بدون جامپ، سرریز دارای جامپ کوچک تر و سرریز دارای جامپ بزرگ تر به ترتیب برابر  $2/76$ ،  $2/65$  و  $2/46$  است.



شکل ۶ شیب آبستگي مصالح در پايين دست سرريز  
Figure 6 The slope of material scouring downstream of the weir



شکل ۵ جريان عبوري از روی سرريز کلیدپيانویی  
Figure 5 Current passing through piano key weir



شکل ۷ جريان عبوري در کلیدهای سرريز جامپدار و سرريز بدون جامپ  
Figure 7 Flow current in the output key of weir with jump and weir without jump

شکل ۸، تأثیر پارامتر  $P/h$  را بر حسب عدد فرود ذرات بر بیشینه عمق آبستگي نشان می‌دهد. همانطور که از شکل پیدا است، با افزایش عدد فرود ذرات، بیشینه عمق آبستگي نیز افزایش می‌یابد. همچنین با بیشتر شدن شعاع جامپ و ارتفاع آن، بیشینه عمق آبستگي افزایش یافته و با افزایش دبي در واحد عرض و یا کاهش عمق پایاب، مقدار عدد فرود ذرات بیشتر شده و بیشینه عمق آبستگي نیز افزایش می‌یابد. میانگین بیشینه عمق آبستگي در سرريز با شعاع جامپ بزرگتر و در سرريز با شعاع کوچکتر، نسبت به سرريز بدون جامپ به ترتیب ۲۷ و ۱۹ درصد بیشتر است. رابطه (۶)، برای محاسبه بیشینه عمق آبستگي ارائه شده است که ضرایب  $K_1$  و  $K_2$  به شعاع و ارتفاع لبه جامپ بستگی دارد که در جدول ۲ به آن‌ها پرداخته شده است.

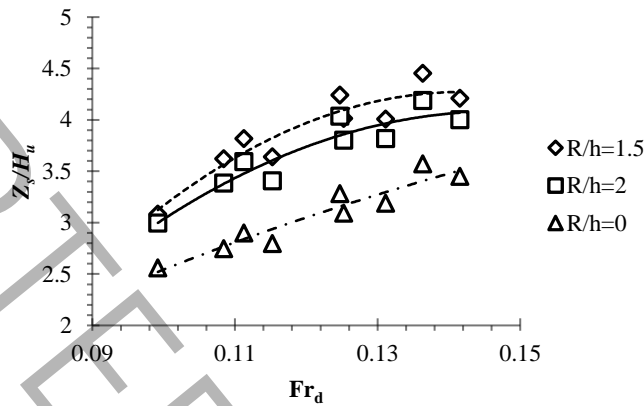
$$\frac{Z_s}{H_u} = K_1 (Fr_d)^2 + K_2 Fr_d \quad (6)$$

جدول ۲ محاسبه مقادیر  $K$  برای محاسبه بیشینه عمق آبستگي در سرريز و ضریب  $R^2$

Table 2 Calculation of  $K$  values to calculate the maximum scour depth in the weir and  $R^2$  coefficient

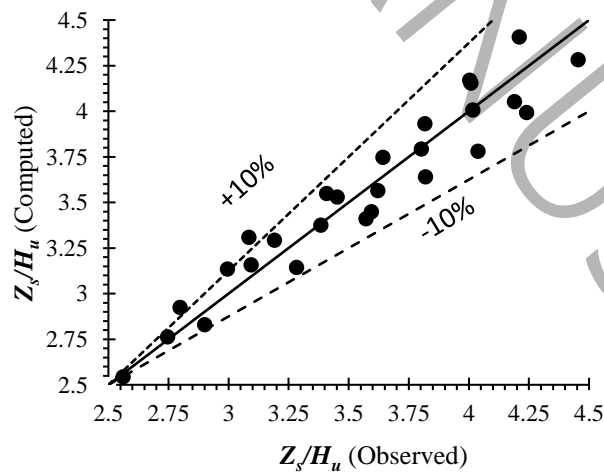


Row	$R/h$	$K_1$	$K_2$	$R^2$
1	0	-16.616	27.290	0.91
2	1.5	-52.473	38.565	0.82
3	2	-50.644	36.632	0.84



شکل ۸ تأثیر عدد فرود ذرات و نسبت  $R/h$  بر بیشینه عمق آبشستگی  
Figure 8 Effect of  $Fr_d$  and  $R/h$  ratio on maximum scour depth

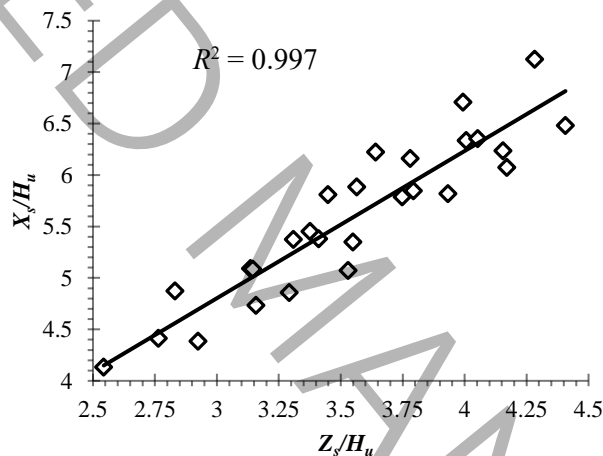
شکل ۹، مقادیر مشاهده شده و محاسبه شده توسط رابطه (۶) را نشان می‌دهد. همانطور که از شکل پیدا است، این مقادیر با خطای قابل قبولی ( $\pm 10\%$ ) مورد پذیرش هستند. با ایجاد یک خط ۴۵ درجه بین داده‌های مشاهده شده و محاسبه شده و با توجه به رابطه (۵) و با استفاده از رابطه (۴) و بزرگترین و کوچکترین داده می‌توان باند اطمینان را ترسیم کرد.



شکل ۹ مقادیر محاسبه شده و مشاهده شده بیشینه عمق آبشستگی

Figure 9 Computed and observed parameters of the maximum scour depth

پس از محاسبه‌ی بیشینه عمق آبشستگی توسط رابطه‌ی (۶)، می‌توان رابطه‌ای برای پارامترهای دیگر آبشستگی با نسبت متفاوت مقدار  $R/h$  به دست آورد. شکل ۱۰ و رابطه‌ی (۷)، فاصله‌ی بیشینه عمق آبشستگی از پنجه‌ی سرریز را نسبت به بیشینه عمق آبشستگی نشان می‌دهد. با افزایش شعاع جامپ، مقدار فاصله‌ی بیشینه عمق آبشستگی از پنجه سرریز در فاصله‌ی دورتری شکل می‌گیرد. به‌طور مثال، در دبی  $0/04$  متر مکعب بر ثانیه و عمق پایاب  $0/05$  متر، مقدار فاصله‌ی بیشینه عمق آبشستگی نسبت به پنجه سرریز در شعاع جامپ  $0/15$  و  $0/21$  متر، برابر  $0/226$ ،  $0/273$  و  $0/32$  متر است. همچنین به‌طور میانگین مقدار فاصله بیشینه عمق آبشستگی از پنجه سرریز در شعاع جامپ  $0/15$  و  $0/21$  متری، برابر  $0/178$ ،  $0/221$  و  $0/252$  متر است و مقدار میانگین فاصله بیشینه عمق آبشستگی از پنجه سرریز در شعاع جامپ  $0/15$  و  $0/21$  متر نسبت به سرریز بدون جامپ، حدود  $19/5$  و  $29/4$  درصد بیشتر است.



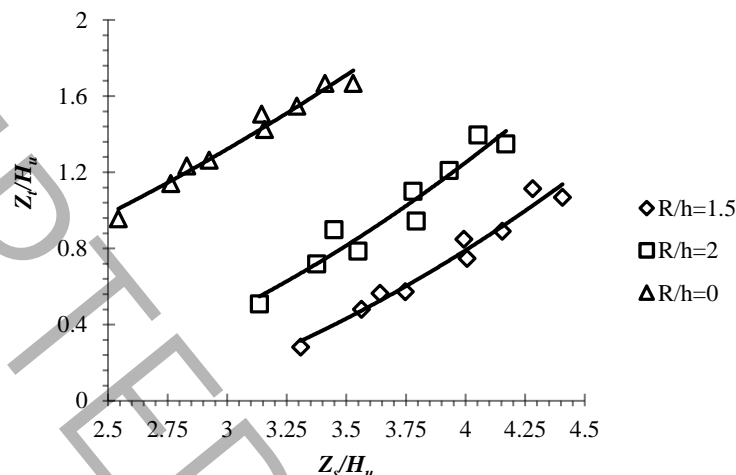
شکل ۱۰ محاسبه مقدار فاصله بیشینه عمق آبشستگی نسبت به پنجه سرریز

Figure 10 Calculation of the distance of the maximum scouring depth to the weir toe

$$\frac{X_s}{H_u} = 1.5719 \frac{Z_s}{H_u} \quad (7)$$

شکل ۱۱ و رابطه‌ی (۸)، مقدار آبشستگی پنجه را نسبت به بیشینه عمق آبشستگی را با ریشه میانگین مربعات خطاهای برابر  $91/7$  درصد، نشان می‌دهند. وجود جامپ باعث کاهش مقدار آبشستگی پنجه می‌شود. همانطور که بیان شد، شعاع و ارتفاع جامپ بیشتر، باعث کاهش آبشستگی در پنجه سرریز می‌گردد. کاهش آبشستگی پنجه باعث بیشتر شدن پایداری سرریز می‌شود و خطر واژگونی

آن را کاهش می‌دهد. همچنین مقادیر ضریب همبستگی و ضرایب  $K_3$  و  $K_4$  که مرتبط با مقادیر شعاع و ارتفاع لبه جامپ برای آبستگي پنجه سرریز هستند؛ در جدول ۳ به آن پرداخته شده است.



شکل ۱۱ محاسبه آبستگي پنجه سرریز نسبت به بیشینه عمق آبستگي

Figure 11 Calculation of scouring of the weir toe in relation to the maximum scouring depth

$$\frac{Z_t}{H_u} = K_3 \left( \frac{Z_s}{H_u} \right)^2 + K_4 \frac{Z_s}{H_u} \quad (A)$$

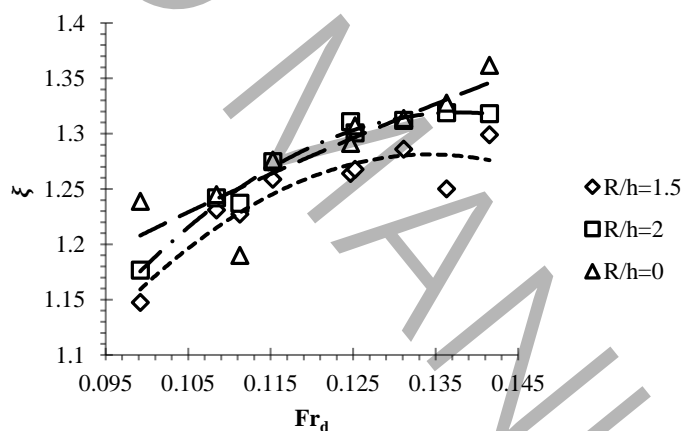
جدول ۳ محاسبه مقادیر  $K$  برای محاسبه عمق آبستگي در پنجه سرریز و ضریب  $R^2$

Table 3 Calculation of  $K$  values to calculate the scour depth in the weir toe and  $R^2$  coefficient

Row	$R/h$	$K_3$	$K_4$	$R^2$
1	0	0.0964	0.1514	0.968
2	1.5	0.1484	-0.396	0.963
3	2	0.1594	-0.325	0.927

شکل ۱۲، مقدار شاخص آبستگي ( $\xi$ ) را نسبت به عدد فرود ذرات نشان می‌دهد. با افزایش مقدار عدد فرود ذرات، مقدار شاخص آبستگي نیز افزایش می‌یابد. شاخص آبستگي برابر است با دو برابر بیشینه عمق آبستگي به فاصله بیشینه عمق آبستگي نسبت به پنجه سرریز که میانگین آن در سرریز با جامپ بزرگتر برابر ۱/۲۵، در سرریز با جامپ کوچکتر برابر ۱/۲۷ و در سرریز بدون جامپ

برابر ۱/۲۸ است. همانطور که پیدا است، مقدار شاخص آبهستگی در سرریز با شعاع جامپ بیشتر و در سرریز با شعاع جامپ کمتر، حدود ۲/۷۷ و ۰/۵۳ درصد از سرریز بدون جامپ کمتر است. هرچه شاخص آبهستگی کمتر باشد، خطر واژگونی سرریز نیز کمتر است. همانطور که بیان شد، دور شدن فاصله بیشینه عمق آبهستگی و کم بودن مقدار آبهستگی پنجه سرریز بسیار حائز اهمیت است. با وجود جامپ، فاصله بیشینه عمق آبهستگی افزایش یافته و مقدار آبهستگی پنجه سرریز کاهش می‌یابد و به‌همین دلیل سرریزهای جامپ‌دار توصیه می‌گردند. مقدار شاخص آبهستگی در تحقیق قدسیان و همکاران (۲۰۲۱)، تقریباً برابر ۲ است. ایشان آزمایش‌های خود را روی سرریز کلیدپیانویی دوزنقه‌ای نوع A و مواد بستر ماسه مورد بررسی قرار دادند. در تحقیق حاضر و در سرریز بدون جامپ مقدار شاخص آبهستگی حدود ۳۶ درصد کمتر از تحقیق قدسیان و همکاران (۲۰۲۱) است که دلیل آن می‌تواند افزایش قطر مصالح بستر و دورتر شدن مقدار بیشینه عمق آبهستگی نسبت به پنجه سرریز باشد [6]. همچنین مقدار شاخص آبهستگی در تحقیق یزدی و همکاران (۲۰۲۰) برابر ۱/۶۵ است. ایشان نیز آزمایش‌های خود را روی سرریز کلیدپیانویی انجام دادند؛ با این حال مقدار شاخص آبهستگی در تحقیق حاضر حدود ۲۲/۴ درصد کمتر از تحقیق ایشان است [5].



شکل ۱۲ مقدار شاخص آبهستگی نسبت به عدد فرود ذرات

Figure 12 Scour index value in relation to Fr<sub>d</sub>

## ۵- نتیجه‌گیری

وجود جامپ در کلیدهای خروجی سرریز کلیدپیانویی دوزنقه‌ای نوع C، مقدار بیشینه عمق آبهستگی را افزایش داده؛ اما باعث دور شدن مقدار بیشینه عمق آبهستگی از پنجه سرریز و باعث کاهش آبهستگی پنجه سرریز می‌شود. در سرریز جامپ‌دار با شعاع جامپ بزرگتر، به‌مراتب فاصله بیشینه عمق آبهستگی از پنجه سرریز دورتر و مقدار آبهستگی پنجه سرریز کمتر است. مقدار میانگین بیشینه عمق آبهستگی در سرریزهای با شعاع جامپ ۰/۲۱ و ۰/۱۵ متر نسبت به سرریز بدون جامپ، برابر ۲۷ و ۱۹ درصد بیشتر

است. همچنین مقدار میانگین فاصله بیشینه عمق آبشستگی نسبت به پنجه سرریز در سرریزهای دارای جامپ با شعاع جامپ ۰/۲۱ و ۰/۱۵ متر نسبت به سرریز بدون جامپ، به ترتیب برابر ۲۹/۴ و ۱۹/۵ درصد کمتر است و میانگین مقدار آبشستگی پنجه سرریز در آن‌ها، به ترتیب ذکر شده، حدود ۴۲ و ۲۵/۶ درصد کمتر است. جامپ باعث افزایش شاخص آبشستگی می‌شود. همچنین وجود جامپ با ارتفاع لبه و شعاع بیشتر، باعث کاهش ضریب آبگذری می‌گردد.

## ۶- فهرست علائم

علائم انگلیسی		
$B$	طول دیواره‌ی جانبی سرریز	m
$B_o$	طول لبه آویزان خروجی	m
$d_{50}$	قطر متوسط ذرات بستر	m
$Fr_d$	عدد فرود ذرات	-
$g$	نیروی گرانشی	$m/s^2$
$h$	ارتفاع لبه جامپ	m
$h_u$	عمق جریان در بالادست سرریز	m
$h_d$	عمق پایاب	m
$H_u$	عمق جریان به‌علاوه ارتفاع نظیر انرژی جنبشی در بالادست سرریز	m
$H_d$	عمق جریان به‌علاوه ارتفاع نظیر انرژی جنبشی در پایین‌دست سرریز	m
$K$	مقادیر ثابت محاسبه شده در رابطه‌ها	-
$L$	طول سرریز	m
$P$	ارتفاع سرریز	m
$q$	دبی در واحد عرض	$m^2/s$
$Q$	دبی جریان	$m^3/s$
$R$	شعاع جامپ	m
$T_s$	ضخامت سرریز	m
$W$	عرض سرریز	m
$W_i$	عرض کلید ورودی	m
$W_o$	عرض کلید خروجی	m
$X_s$	فاصله بیشینه عمق آبشستگی نسبت به پنجه سرریز	m
$Z_s$	ارتفاع بیشینه عمق آبشستگی	m
$Z_t$	آبشستگی پنجه سرریز	m

علائم یونانی

Kg/ (m.s)	لزجت دینامیکی	$\mu$
Kg/m <sup>3</sup>	چگالی رسوب	$\rho_s$
Kg/m <sup>3</sup>	چگالی آب	$\rho_w$
Kg/s <sup>2</sup>	ضریب کشش سطحی	$\sigma$

مراجع

- [1]. 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. <https://doi.org/10.1061/ASCE HY.1943-7900.0001189>.
- [2]. 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. <https://doi.org/10.22069/JWSC.2019.14680.2961>.
- [3]. Ghafouri, A., Ghodsian, M. & Abdi, 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. <https://doi.org/10.30482/JHYD.2020.236770.1465>.
- [4]. 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. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)IR.1943-4774.0001647](https://doi.org/10.1061/(ASCE)IR.1943-4774.0001647).
- [5]. Mosalman 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. <https://doi.org/10.30482/JHYD.2020.227522.1453>.
- [6]. Ghodsian, M., Abdi, Ch. & Ghafouri, A., 2021. Scouring of triangular and trapezoidal pianos key weir. *Journal of Hydraulics*, 16(2), pp.43-58. <https://doi.org/10.30482/JHYD.2021.261439.1497>.
- [7]. Jamal, A.A.R., Tahaa, K.Y. & 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. <https://doi.org/10.33899/rengj.2021.130402.1101>.
- [8]. Lantz, W., Crookston, B.M. & Palermo, M., 2021. Apron and cutoff wall scour protection for piano key weirs. *Water*, 13(17), p.2332. <https://doi.org/10.3390/w13172332>.

- [9]. Abdi Chooplou, C., Bodaghi, E. Ghodsian, M., & Vaghefi, M. 2022. Temporal evolution of scouring downstream of a trapezoidal PKW. *International Journal of River Basin Management*, 1-14. <https://doi.org/10.1080/15715124.2022.2143513>.
- [10]. Abdi Chooplou, C., Kazerooni, S., Ghodsian, M., & Vaghefi, M. 2022. Experimental study of scouring downstream of type-A piano key weirs. *Arabian Journal of Geosciences*, 15(23), 1702. <https://doi.org/10.1007/s12517-022-11001-9>.
- [11]. 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.18-1. <https://doi.org/10.30482/JHYD.2022.330389.1590>.
- [12]. 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*. <https://doi.org/10.1115/OMAE2010-20719>.
- [13]. Novák, P. & Čabelka, J., 1981. *Models in hydraulic engineering: Physical principles and design applications*. Monographs & surveys in water resources engineering.
- [14]. Chiew, Y.M., 1992. Scour protection at bridge piers. *Journal of Hydraulic Engineering*, 118(9), pp.1260-1269. <https://doi.org/10.1061/ASCE0733-94291992118:91260>.
- [15]. 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. <https://doi.org/10.31272/jeasd.27.6.2>.
- [16]. 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. <https://doi.org/10.31272/jeasd.28.1.4>
- [17]. Fathi, A., Abdi Chooplou, C. and Ghodsian, M.G., 2023. An Experimental Study of Flow Energy Loss in Trapezoidal Stepped Piano Key Weirs (PKWs). *Modares Civil Engineering journal*, 23(4), pp.163-174. <https://doi.org/10.22034/23.4.163>.