

## پارامترهای هندسی مؤثر بر ضریب دبی سرریز کلید پیاپویی دریچه‌دار

مسعود اکبری<sup>۱\*</sup>، فرزین سلماسی<sup>۲</sup>، هادی ارونقی<sup>۳</sup>، مسعود کرباسی<sup>۴</sup> و داود فرسادی‌زاده<sup>۵</sup>

### چکیده

سرریز کلید پیاپویی نوع، جدیدی از سرریزهای تاج طولانی است. به دلیل پیچیدگی هندسی این نوع سرریزها، در سال‌های اخیر مطالعات زیادی درباره آن‌ها انجام شده است. ایده اضافه کردن دریچه در کلید ورودی سرریز کلید پیاپویی برای بهبود عملکرد هیدرولیکی این نوع سرریز برای اولین بار در آزمایشگاه هیدرولیک گروه مهندسی آب دانشگاه تبریز بررسی شد. برای بررسی پارامترهای مؤثر روی ضریب دبی سرریز کلید پیاپویی دریچه‌دار مانند: ابعاد دریچه، عمق جای‌گذاری دریچه در کلید ورودی، نسبت عرض کلید ورودی به عرض کلید خروجی و بار آبی روی سرریز کلید پیاپویی دریچه‌دار، از ۱۵۶ داده آزمایشگاهی مربوط به سرریزهای کلید پیاپویی دریچه‌دار استفاده شد. همچنین با استفاده از مدل‌های رگرسیون خطی و غیرخطی چندمتغیره در نرم‌افزار متلب ۲۰۱۸، دو رابطه برای ضریب دبی سرریز کلید پیاپویی دریچه‌دار ارائه شد. از میان ۱۸۸ داده آزمایشگاهی برای سرریز کلید پیاپویی و سرریز کلید پیاپویی دریچه‌دار، تعداد ۱۵۶ داده مربوط به سرریز کلید پیاپویی دریچه‌دار است. از این تعداد داده ۷۰ درصد به عنوان داده‌های آموزش و ۳۰ درصد به عنوان داده‌های آزمون مدل استفاده شد. نتایج بررسی نشان داد بار آبی روی سرریز کلید پیاپویی، نسبت عرض کلید ورودی به عرض کلید خروجی، عمق جای‌گذاری دریچه در کلید ورودی، ابعاد دریچه به ترتیب بیشترین تأثیر را بر ضریب دبی سرریز کلید پیاپویی دریچه‌دار دارند. روش رگرسیون غیرخطی با  $RMSE=0/035$  و  $R^2=0/961$  و  $MARE=4/562\%$  نتایج بهتری نسبت به روش رگرسیون خطی با  $RMSE=0/061$  و  $R^2=0/865$  و  $MARE=9/491\%$  ارائه داده است.

**واژه‌های کلیدی:** سرریز کلید پیاپویی دریچه‌دار، ضریب دبی، مدل رگرسیون خطی چندمتغیره، مدل رگرسیون غیرخطی چندمتغیره، مدل آزمایشگاهی.

**ارجاع:** اکبری م. سلماسی ف. ارونقی ه. کرباسی م. و فرسادی‌زاده د. ۱۳۹۹. پارامترهای هندسی مؤثر بر ضریب دبی سرریز کلید پیاپویی دریچه‌دار. مجله پژوهش آب ایران. ۳۸: ۱۱۵-۱۲۱.

۱- دانشجوی دکتری سازه‌های آبی، گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز.  
۲- دانشیار گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز.  
۳- دانشیار گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز.  
۴- دانشیار گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه زنجان.  
۵- استاد گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز.

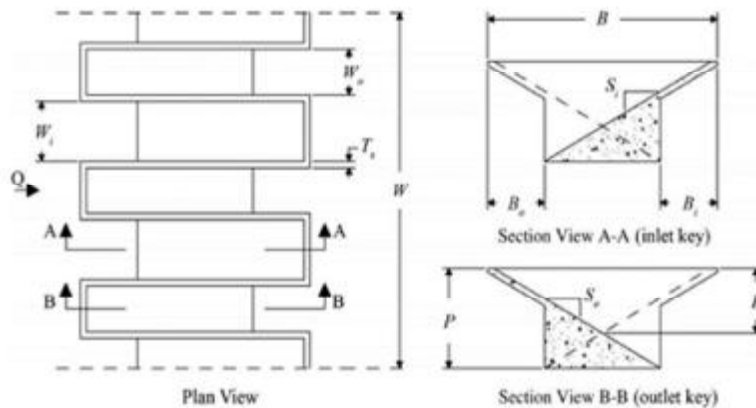
\* نویسنده مسئول: [masood.akbari@gmail.com](mailto:masood.akbari@gmail.com)

تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۰۷/۳۰ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۱۰/۱۳

## مقدمه

هیدروکوپ فرانسه و بلانک در آزمایشگاه هیدرولیک و محیط‌زیست دانشگاه بريسکا الجزایر توسعه داد (لیمپریه و اومانه، ۲۰۰۳). اولین سرریز کلید پیانویی در سال ۲۰۰۶ روی سد گلورس در کشور فرانسه اجرا شد (لاگیر، ۲۰۰۷). دومین نمونه نیز در سال ۲۰۰۸ روی سد سنت مارک فرانسه اجرا شد (لاگیر و همکاران، ۲۰۰۹).

سرریز کلید پیانویی، نوعی از سرریزهای تاج طولانی است که با افزایش طول تاج امکان عبور دبی بیشتر با بار آبی ثابت را فراهم می‌کند. سرریزهای کلید پیانویی، با توجه به ظرفیت آب‌گذری بالای خود سبب افزایش ظرفیت مخازن می‌شوند و بر پایداری سد در برابر بارش‌های سیلابی می‌افزایند. سرریز کلید پیانویی را لیمپریه در مؤسسه



شکل ۱- پارامترهای هندسی سرریز کلید پیانویی (اندرسون و تولیس، ۲۰۱۲)

به تأثیر مثبت آن به واسطه افزایش ارتفاع سرریز و نزدیک شدن به ارتفاع بهینه اشاره کردند.

در سال‌های اخیر می‌توان به مواردی از کاربرد روش‌های هوش مصنوعی در تخمین ضریب دبی سرریزها اشاره کرد. امیراوغلی و همکاران (۲۰۱۱)، ضریب دبی سرریز کنگره‌ای مثلثی جانبی در کانال مستقیم را با استفاده از مدل شبکه عصبی مصنوعی تخمین زدند. نتایج این مدل نسبت به مدل رگرسیون غیرخطی چندمتغیره موفق‌تر است.

بیلهان و همکاران (۲۰۱۱)، با استفاده از روش شبکه عصبی مصنوعی، ضریب دبی سرریز جانبی کنگره‌ای مثلثی را در کانال‌های انحنا دار برآورد کردند. مدل شبکه عصبی مصنوعی نسبت به مدل رگرسیون غیرخطی چندمتغیره مدلی توانمند در تخمین ضریب دبی است.

امیراوغلی و کی سی (۲۰۱۳)، ضریب تخلیه سرریز جانبی کنگره‌ای دوزنقه‌ای را با استفاده از رویکرد عصبی-فازی پیش‌بینی کردند. عملکرد سیستم استنتاج عصبی فازی سازگار (ANFIS) با شبکه‌های عصبی مصنوعی، رگرسیون غیرخطی و مدل رگرسیون خطی چندمتغیره مقایسه شد؛

در شکل ۱،  $W$  عرض کانال،  $P$  ارتفاع سرریز کلید پیانویی از رمپ یا کف کانال،  $P_m$  ارتفاع مشخصه سرریز کلید پیانویی،  $W_i$  عرض کلید ورودی،  $W_o$  عرض کلید خروجی،  $B_i$  طول لبه آویز پایین دست سرریز کلید پیانویی،  $B_o$  طول لبه آویز بالای دست سرریز کلید پیانویی،  $S_i$  شیب کلید ورودی،  $S_o$  شیب کلید خروجی،  $T_s$  ضخامت دیوار یا ورقه‌های تشکیل‌دهنده سرریز کلید پیانویی است.

بر اساس مطالعات آزمایشگاهی لمپریه و جان (۲۰۰۵) و همچنین هین و همکاران (۲۰۰۶)، مقدار بهینه برای نسبت  $\frac{W_i}{W_o}$  برابر  $\frac{1}{2}$  است. لمپریه (۲۰۱۱) رابطه دبی-اشل را برای سرریزهای کلید پیانویی ارائه کرد. کبیری سامانی و جواهری (۲۰۱۲) روابط تجربی برای ضریب آب‌گذری این نوع سرریزها در دو حالت آزاد و مستغرق ارائه کردند. اندرسون و تولیس (۲۰۱۲) عملکرد هیدرولیکی سرریزهای کنگره‌ای و کلید پیانویی مستطیلی را مقایسه کردند که سرریز کلید پیانویی به دلیل کاهش افت در کلیدهای ورودی، از عملکرد بهتری برخوردار است. ماچلس و همکاران (۲۰۱۳) تأثیر دیواره جان پناه را بر عملکرد هیدرولیکی این نوع سرریز مطالعه کردند و

$W_i$  عرض کلید ورودی،  $W_o$  عرض کلید خروجی،  $B_i$  طول لبه آویز پایین دست،  $B_o$  طول لبه آویز بالادست،  $N$  تعداد سیکل‌ها،  $S_i$  شیب کلید ورودی،  $S_o$  شیب کلید خروجی،  $T_s$  ضخامت دیوار یا ورقه‌های تشکیل‌دهنده سرریز کلید پیاپویی،  $m$  لزجت دینامیکی آب،  $g$  شتاب ثقل زمین،  $S$  کشش سطحی و  $r$  چگالی آب است.

با توجه به اینکه عمق آب بالادست و پایین دست تابعی از عمق آب روی سرریز کلید پیاپویی هستند، می‌توان آن‌ها را حذف کرد. همچنین تعداد سیکل‌ها، شیب کلید ورودی و خروجی را می‌توان به صورت نسبتی از سایر پارامترها دانست؛ لذا می‌توان آن‌ها را نیز حذف کرد.

با استفاده از آنالیز ابعادی و در نظر گرفتن اعداد بی‌بعد رینولدز، وبر و نسبت‌های بی‌بعد به جای پارامترهای معادله (۱)، معادله (۲) را خواهیم داشت:

$$\frac{Q}{g^{1/2} L H^3} = f \left( R_e, W_e, \frac{H}{P}, \frac{L}{B}, \frac{W_i}{W_o}, \frac{B_i}{L}, \frac{B_o}{L}, \frac{b}{p}, \frac{d}{p}, \frac{H_{gate}}{P} \right) \quad (2)$$

باتوجه به معادله (۲) می‌توان گفت ضریب دبی تابع پارامترهای هندسه سرریز کلید پیاپویی دریاچه‌دار و اعداد بدون بعد رینولدز و وبر است. معمولاً در کانال‌ها عدد رینولدز به اندازه کافی بزرگ است؛ بنابراین می‌توان از لزجت صرف نظر کرد (هندرسون، ۱۹۶۶). همچنین اعداد رینولدز و وبر از معادله (۲) حذف می‌شوند؛ لذا برای بررسی تأثیر پارامترهای هندسی سرریز کلید پیاپویی دریاچه‌دار روی ضریب دبی آن، می‌توان معادله (۳) را پیشنهاد داد:

$$C_d = f \left( \frac{H}{P}, \frac{L}{B}, \frac{W_i}{W_o}, \frac{B_i}{L}, \frac{B_o}{L}, \frac{b}{p}, \frac{d}{p}, \frac{H_{gate}}{P} \right) \quad (3)$$

### روش آزمایشگاهی

آزمایش‌های این مطالعه در آزمایشگاه هیدرولیک دانشگاه تبریز، گروه مهندسی آب انجام شد. آزمایش‌ها روی فلومی فلزی- شیشه‌ای افقی به طول ۱۰ متر، با عرض ۰/۹۳۳ متر انجام گرفت. سرریز کلید پیاپویی روی رمپ یک سانتی‌متری نصب شد. سیستم گردش آب شامل مخزنی

نتایج مقایسه نشان داد مدل ANFIS در برآورد ضریب تخلیه برتر از مدل‌های رگرسیون غیرخطی است.

اکبری و همکاران (۲۰۱۹) با استفاده از تکنیک‌های هوش مصنوعی ضریب دبی سرریز کلید پیاپویی دریاچه‌دار را پیش‌بینی کردند. ایشان نشان دادند روش رگرسیون فرآیند گاوسی توانسته است بهترین نتایج را ارائه دهد. بعد از مدل رگرسیون فرآیند گاوسی، مدل ماشین‌بردار پشتیبان، با کرنل Rbf در رده دوم قرار گرفته است. مدل پرسپترون چند لایه، با دو نرون در لایه پنهان نیز در رده سوم قرار گرفته است.

اضافه کردن دریاچه در کلیدهای ورودی با هدف بهبود عملکرد هیدرولیکی سرریز کلید پیاپویی برای اولین بار در آزمایشگاه هیدرولیک دانشگاه تبریز بررسی شد. در این مطالعه ابتدا با آنالیز ابعادی پارامترهای بی‌بعد مؤثر بر ضریب دبی سرریز کلید پیاپویی دریاچه‌دار به دست آمد و سپس با استفاده از تحلیل داده‌های آزمایشگاهی با مدل‌های رگرسیون خطی و غیرخطی روابط ضریب دبی سرریز کلید پیاپویی دریاچه‌دار به دست آمد. باتوجه به ارائه رابطه ضریب دبی با مدل‌های رگرسیون خطی و غیرخطی چندمتغیره، این مدل‌ها در مطالعه حاضر مورد توجه قرار گرفتند.

### مواد و روش‌ها

#### آنالیز ابعادی

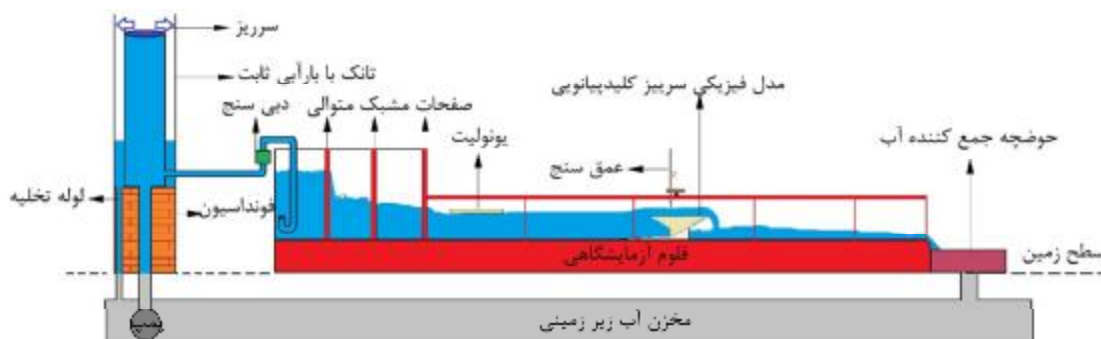
هدف از این کار شناخت پارامترهای مؤثر در پدیده مورد مطالعه و تعیین نسبت‌های بدون بعد است. به دلیل پیچیدگی هندسی سرریزهای کلید پیاپویی دبی عبوری از روی سرریز کلید پیاپویی تابع پارامترهای معادله (۱) است:

$$Q = f(H, H_{up}, H_{down}, b, d, H_{gate}, L, W, P, W_i, W_o, B_i, B_o, N, S_i, S_o, T_s, m, g, S, r) \quad (1)$$

در معادله (۱)،  $Q$  دبی سرریز کلید پیاپویی دریاچه‌دار،  $H$  بار آبی روی تاج سرریز کلید پیاپویی دریاچه‌دار،  $H_{up}$  بار آبی بالادست سرریز کلید پیاپویی دریاچه‌دار،  $H_{down}$  بار آبی پایین دست،  $b$  طول دریاچه مستطیلی،  $d$  عرض دریاچه مستطیلی،  $H_{gate}$  فاصله مرکز دریاچه مستطیلی از تاج سرریز کلید پیاپویی دریاچه دار،  $L$  طول مؤثر تاج،  $W$  عرض کانال،  $P$  ارتفاع سرریز کلید پیاپویی از رمپ یا کف کانال،

جریان آب از محیط متخلخل ایجاد شده با صفحه‌های مشبک متوالی در سه متر اول فلوم آزمایشگاهی گذرانده شد و در ادامه، طول کانال با قرار دادن یونولیت در سطح آب، نوسان‌های سطحی کاهش یافت و ارتفاع آب در بالادست سرریز کلید پیانویی دریچه‌دار تثبیت شد. ارتفاع آب با پوینت گیج که روی ارابه‌ای چرخ‌دار در طول کانال متحرک بود، با دقت ۰/۱ میلی‌متر اندازه‌گیری شد.

زیرزمینی که مجهز به یک دستگاه پمپ به قدرت ۱۰۰ اسب بخار است و آب را به یک مخزن هوایی پمپاژ می‌کند. مخزن هوایی از طریق سرریزی که داخل آن تعبیه، تأمین‌کننده بار آبی ثابت آب است. جریان پس از عبور از فلوم به پایین دست به سمت مخزن زیرزمینی برمی‌گردد و دوباره به سمت مخزن هوایی پمپاژ می‌شود. دبی جریان (در محدوده ۱۰ تا ۱۳۰ لیتر بر ثانیه) در آزمایش‌ها با استفاده از دبی‌سنج اولتراسونیک با دقت ۱ درصد اندازه‌گیری شد.



شکل ۲- شکل شماتیک فلوم آزمایشگاهی مورد استفاده و شیوه گردش آب

قاب دریچه از پی‌وی‌سی با ضخامت ۱ میلی‌متر ساخته شد.



شکل ۳- سرریز کلید پیانویی دریچه‌دار با ابعاد و حالت‌های مختلف جای‌گذاری دریچه روی کلیدور

### مشخصات هندسه سرریز کلید پیانویی

در این پژوهش، از سرریز کلید پیانویی با تعداد چهار سیکل و مطابق شکل ۳ استفاده شد. عملکرد وجود دریچه در کلیدهای ورودی، ابعاد مختلف دریچه، عمق‌های مختلف کارگذاری دریچه، نسبت‌های مختلف عرض کلید ورودی به کلید خروجی، در بارهای آبی مختلف بررسی شد.

در جدول ۱ و ۲ پارامترهای هندسی سرریز کلید پیانویی و سرریز کلید پیانویی دریچه‌دار در مدل‌فیزیکی نشان داده شده است. در جدول ۱،  $B$  طول سرریز در امتداد جریان،  $L$  طول مؤثر تاج،  $N$  تعداد سیکل‌ها و  $n$  نسبت طول مؤثر تاج به عرض کل سرریز.  $(n = L/W)$  است. در جدول ۲،  $d$  عرض دریچه مستطیلی،  $b$  طول دریچه مستطیلی،  $H$  بار آبی روی تاج سرریز و  $H_{gate}$  فاصله مرکز دریچه مستطیلی تا لبه تاج سرریز کلید پیانویی دریچه‌دار است. همه مدل‌ها از ورق پلی‌اتیلن به ضخامت ۱۲ میلی‌متر ساخته شدند.

جدول ۱- پارامترهای هندسی سرریز کلید پیانویی (واحدهای طول به متر می‌باشد).

$P$	$P_m$	$L$	$W$	$W_i$	$W_o$	$S_i$
۰/۱۹۷	۰/۱۲۹	۴/۷۴۴	۰/۹۳۳	۰/۰۹۳ و ۰/۱۱۶	۰/۱۱۶ و ۰/۰۹۳	۰/۰۰۶
$S_o$	$B$	$B_i$	$B_o$	$T_s$	$N$	$n$
۰/۰۰۶	۰/۴۸۹	۰/۱۲۱	۰/۱۲۱	۰/۰۱۲	۴	۵

جدول ۲- مشخصات ابعاد و حالت‌های مختلف جایگذاری دریچه در مدل‌های فیزیکی (واحدهای طول به متر می‌باشد).

$d$	$b$	$H_{gate}$	$w_i/w_o$	$d$	$b$	$H_{gate}$	$w_i/w_o$
*	.	.	۰/۸	.	.	.	۱/۲۵
۰/۰۵	۰/۰۸	۰/۰۲۷۲	۰/۸	۰/۰۵	۰/۰۸	۰/۰۲۷۲	۱/۲۵
۰/۰۵	۰/۰۸	۰/۰۳۴۸	۰/۸	۰/۰۵	۰/۰۸	۰/۰۳۴۸	۱/۲۵
۰/۰۵	۰/۰۵	۰/۰۲۰۱	۰/۸	۰/۰۵	۰/۰۵	۰/۰۲۰۱	۱/۲۵
۰/۰۵	۰/۰۵	۰/۰۴۴۲	۰/۸	۰/۰۵	۰/۰۵	۰/۰۴۴۲	۱/۲۵
۰/۰۸	۰/۰۵	۰/۰۲۰۱	۰/۸	۰/۰۸	۰/۰۵	۰/۰۲۰۱	۱/۲۵
۰/۰۸	۰/۰۵	۰/۰۴۴۲	۰/۸	۰/۰۸	۰/۰۵	۰/۰۴۴۲	۱/۲۵

\*تذکره: در حالتی که  $d$  و  $b$   $H_{gate}$  صفر هستند، سرریز کلید پیانویی بدون دریچه بررسی شده است.

## نتایج و بحث

### رگرسیون خطی چندمتغیره

ضریب دبی سرریز کلید پیانویی دریچه‌دار به دست آمد. تحلیل‌ها در نرم‌افزار MATLAB انجام گرفته‌است. شکل ۴ مربوط به نمودار پراکندگی داده‌های مشاهداتی و مدل‌سازی شده با معادله خطی است.

تحلیل رگرسیون خطی چندمتغیره برای داده‌های آزمایشگاهی انجام شد. معادله بدون بعد (۴) برای تخمین

$$C_d = 0.672 - 1.618 \left(\frac{H}{P}\right) + 0.23 \left(\frac{b}{P}\right) + 0.056 \left(\frac{d}{P}\right) + 0.534 \left(\frac{H_{gate}}{P}\right) + 0.125 \left(\frac{w_i}{w_o}\right) \quad (4)$$

با استفاده از نرم‌افزار MATLAB ضرایب  $\hat{a}$ ,  $\hat{b}$ ,  $\hat{c}$ ,  $\hat{d}$ ,  $\hat{e}$ ,  $\hat{f}$  تعیین شد:

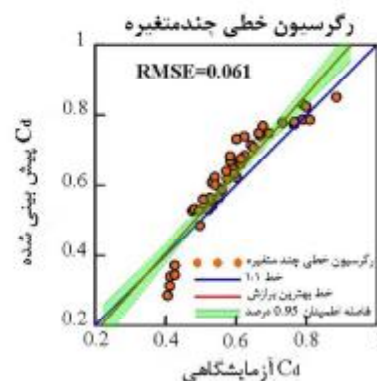
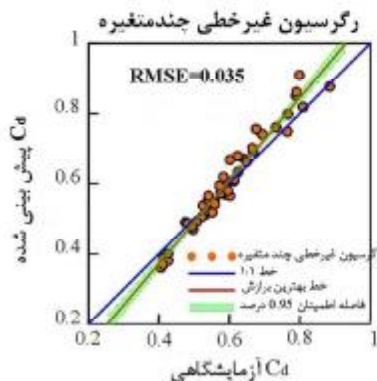
### رگرسیون غیرخطی چندمتغیره

شکل ۴ مختص به نمودار پراکندگی داده‌های مشاهداتی و مدل‌سازی شده با معادله غیرخطی است.

برای ارزیابی رگرسیون غیرخطی در برآورد ضریب دبی سرریز کلید پیانویی دریچه‌دار، معادله‌ای به فرم کلی معادله (۵) ارزیابی شد.

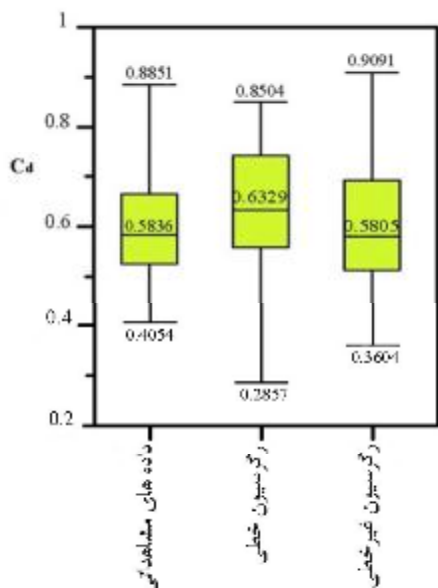
$$C_d = \hat{a} \left(\frac{H}{P}\right)^{\hat{b}} \left(\frac{b}{P}\right)^{\hat{c}} \left(\frac{d}{P}\right)^{\hat{d}} \left(\frac{H_{gate}}{P}\right)^{\hat{e}} \left(\frac{w_i}{w_o}\right)^{\hat{f}} \quad (5)$$

$$C_d = 0.375 \left(\frac{H}{P}\right)^{-0.53} \left(\frac{b}{P}\right)^{0.096} \left(\frac{d}{P}\right)^{0.012} \left(\frac{H_{gate}}{P}\right)^{0.148} \left(\frac{w_i}{w_o}\right)^{0.276} \quad (6)$$



شکل ۴- نمودارهای پراکندگی ضریب دبی مشاهداتی در مقابل ضریب دبی مدل‌های رگرسیون خطی و غیرخطی

نشان‌دهنده حداقل و حداکثر داده‌ها در جامعه آماری داده‌های مشاهداتی و داده‌های به‌دست آمده از مدل است. باتوجه به شکل ۵، می‌توان نتیجه‌گیری کرد که مدل رگرسیون غیرخطی همان‌طور که در جدول ۳ نیز دیده شد، بیشترین شباهت را به داده‌های مشاهداتی دارد.



شکل ۵- نمودار Box-whisker برای مدل‌های رگرسیون خطی و غیرخطی و داده‌های مشاهداتی

### مقایسه روش‌های تحلیل رگرسیون خطی و غیرخطی

در جدول ۳، نتایج مدل‌های رگرسیون خطی و غیرخطی مقایسه شده است. در جدول ۳ پارامترهای آماری RMSE،  $R^2$ ، MARE، NRMSE برای مجموعه داده‌های آموزش و آزمون ارائه شده است. از تعداد ۱۸۸ داده آزمایشگاهی، تعداد ۱۵۶ داده آزمایشگاهی مرتبط با سرریز کلید پیانویی دریچه‌دار استفاده شد. ۷۰ درصد از این داده‌ها به‌عنوان داده‌های آموزش و ۳۰ درصد دیگر به‌عنوان داده‌های آزمون مدل، مورد استفاده قرار گرفتند. با توجه به جدول ۳، مقایسه بین دو مدل رگرسیونی ارائه شده نشان‌دهنده برتری مدل رگرسیون غیرخطی نسبت به مدل خطی است. رگرسیون غیرخطی با  $RMSE=0/035$  و  $R^2=0/961$  و  $MARE=4/562\%$  توانسته است نتایج قابل قبولی را برای برآورد ضریب دبی سرریز کلید پیانویی دریچه‌دار ارائه کند. در مدل رگرسیون خطی نیز مقادیر  $RMSE=0/061$  و  $R^2=0/865$  و  $MARE=9/491\%$  به‌دست آمدند.

در شکل ۵، نیز نمودار Box-whisker برای مدل‌های رگرسیون خطی و غیرخطی و داده‌های مشاهداتی نشان داده شده است. عدد داخل جعبه‌ها، میانه داده‌های مشاهداتی و مدل‌ها را نشان می‌دهد. نزدیک بودن اعداد مربوط به داده‌های مشاهداتی و مدل‌ها نشان‌دهنده دقت بالاتر آن مدل است. خطوط بالا و پایین جعبه‌ها

جدول ۳- مقایسه نتایج مدل رگرسیون خطی با مدل رگرسیون غیرخطی

مدل	داده‌های آموزش				داده‌های آزمون			
	RMSE	$R^2$	MARE%	NRMSE%	RMSE	$R^2$	MARE%	NRMSE%
رگرسیون خطی	۰/۱۰۴	۰/۷۱۷	۱۰/۲۶۷	۱۷/۵۶۶	۰/۰۶۱	۰/۸۶۵	۹/۴۹۱	۱۰/۲۸۳
رگرسیون غیرخطی	۰/۰۳۸	۰/۹۶۳	۴/۳۳۶	۶/۴۴۰	۰/۰۳۵	۰/۹۶۱	۴/۵۶۲	۵/۸۸۲

تعداد ۱۵۶ داده آزمایشگاهی مرتبط با سرریز کلید پیانویی دریچه‌دار است. ۷۰ درصد از این داده‌ها به‌عنوان داده‌های آموزش و ۳۰ درصد دیگر به‌عنوان داده‌های آزمون مدل، استفاده شد. پارامترهای مؤثر روی ضریب دبی سرریز کلید پیانویی دریچه‌دار مانند: ابعاد دریچه، عمق جای‌گذاری دریچه در کلید ورودی، نسبت عرض کلید ورودی به عرض کلید خروجی، بار آبی روی سرریز کلید پیانویی دریچه‌دار، با استفاده از روش‌های رگرسیون خطی و غیرخطی بررسی شدند. نتایج بررسی نشان داد بار آبی روی سرریز کلید

### نتیجه‌گیری

طراحی سرریزهایی با ظرفیت تخلیه بالا برای عبور دادن جریان‌های سیلابی ورودی به رودخانه‌ها و مخازن سدها با حفظ تراز ایمن، حائز اهمیت است. سرریز کلید پیانویی دریچه‌دار به‌عنوان یک ایده جدید جهت افزایش ظرفیت تخلیه سرریز کلید پیانویی و بهبود عملکرد آن در آزمایشگاه هیدرولیک گروه مهندسی آب دانشگاه تبریز مورد سنجش قرار گرفت. از تعداد ۱۸۸ داده آزمایشگاهی برای سرریز کلید پیانویی و سرریز کلید پیانویی دریچه‌دار،

11. Lempérière F. 2011. New labyrinth weirs triple the spillways discharge. *Water and Energy International*. 68(11): 77-78.
12. Lempérière F. and Jun G. 2005. Low Cost Increase of Dams Storage and Flood Mitigation: The Piano Keys Weir, Q. 53 R. 2.06 International Commission on Irrigation and Drainage. Paper presented at the Nineteenth Congress Beijing. 1-19.
13. Lempérière F. and Ouamane A. 2003. The Piano Keys weir: a new cost-effective solution for spillways. *International Journal on Hydropower & Dams*. 10(5): 144-149.
14. Machiels O. Erpicum S. Archambeau P. Dewals B. and Pirotton M. 2013. Parapet Wall Effect on Piano Key Weir Efficiency. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*. 139(6): 506-511.

پیانویی دریچه‌دار، نسبت عرض کلید ورودی به عرض کلید خروجی، عمق جایگذاری دریچه در کلید ورودی، ابعاد دریچه به ترتیب بیشترین تأثیر را روی ضریب دبی سرریز کلید پیانویی دریچه‌دار دارند. مقایسه بین دو مدل رگرسیونی ارائه شده، نشان‌دهنده برتری مدل رگرسیون غیرخطی نسبت به مدل خطی است.

#### منابع

1. Akbari M. Salmasi F. Arvanaghi H. Karbasi M. and Farsadzadeh D. 2019. Application of Gaussian Process Regression Model to Predict Discharge Coefficient of Gated Piano Key Weir, *Water Resources Management*. 33(11): 3929-3947.
2. Anderson R. M. and Tullis B. P. 2012. Comparison of Piano Key and Rectangular Labyrinth Weir Hydraulics. *Journal of Hydraulic Engineering*. 138(4): 358-361.
3. Bilhan O. Emiroglu M. E. and Kisi O. 2011. Use of artificial neural networks for prediction of discharge coefficient of triangular labyrinth side weir in curved channels. *Advances in Engineering Software*. 42(4): 208-214.
4. Emiroglu M. E. and Kisi O. 2013. Prediction of Discharge Coefficient for Trapezoidal Labyrinth Side Weir Using a Neuro-Fuzzy Approach. *Water Resources Management*. 27(5): 1473-1488.
5. Emiroglu M. E. Bilhan O. and Kisi O. 2011. Neural networks for estimation of discharge capacity of triangular labyrinth side-weir located on a straight channel. *Expert Systems with Applications*. 38(1): 867-874.
6. Henderson F. M. 1966. Open channel flow. 1-522.
7. Hien T. C. Son H. T. and Khanh M. 2006. Results of some piano keys weir hydraulic model tests in Vietnam. Paper presented at the Proc. 22nd ICOLD Congress, Barcelona. Q87(R39): 581-596.
8. Kabiri-Samani A. and Javaheri A. 2012. Discharge coefficients for free and submerged flow over Piano Key weirs. *Journal of hydraulic research*. 50(1): 114-120.
9. Laugier F. 2007. Design and construction of the first Piano Key Weir spillway at Goulours dam. *International journal on hydropower and dams*. 14(5): 94.
10. Laugier F. Lochu A. Gille C. Leite Ribeiro M. and Boillat J. L. 2009. Design and construction of a labyrinth PKW spillway at Saint-Marc dam, France. *Hydropower & Dams*. 16(LCH-ARTICLE-2009-023): 100-107.

