

Research Article

Flow Measurement in Canals Using 90 Degree Triangular Sharp Crested Weir With the Vertex at the Same Level to the Bottom of the Canal

Ebrahim Valizadegan^{1✉} , Farzad Jalili²

1. Department of Science and engineering of water, Khoy C., Islamic Azad University, Khoy, Iran.

2. Department of Science and engineering of Soil, Khoy C., Islamic Azad University, Khoy, Iran.

(✉ Corresponding Author: ebrahim.valizadegan@iau.ac.ir)

ARTICLE INFO

Received: 3 April 2025

Revised: 2 May 2025

Accepted: 17 July 2025

Available Online:

HOW TO CITE THIS ARTICLE:

Valizadegan, E., & Jalili, F., (2025). Flow measurement in canal using 90 degree triangular sharp crested weir with the vertex at the same level to the bottom of the canal. (In Persian with English abstract). *Journal of Irrigation and Drainage Structures Engineering Research*. V.26, No.99, P: 21-36

<https://doi.org/10.22092/idser.2025.369030.1612>

Introduction

Despite the development and construction of advanced equipment for measuring discharge in canals, sharp crested weirs are always used in irrigation and water supply networks due to their simplicity in operation and low cost. Extensive research has been done to obtain the discharge calculation relationship in all types of sharp crested weirs. To increase the efficiency and accuracy of weirs, researchers have performed various researches by applying various changes in the geometry of sharp crested weirs, such as Borghai *et al.* 2003, Igathinathane *et al.* 2007, Nicosia *et al.* 2019, Vatankhah and Khamisabadi 2019, Diwedat *et al.* 2022, Zeinivand *et al.* 2024 and other researches. Flow calculation relationships using triangular sharp crested weirs have been developed for the special conditions of installing these weirs, one of these conditions is the location of the vertex of the weir at a certain height from the bottom of the canal ($P>0$). In this research, a 90 degree triangular sharp crested weir was installed in the canal so that the vertex of the weir be the same level with the bottom of the canal in the central axis ($P=0$). To find the flow calculation relationship, several experiments were carried out in free and submerged conditions in 2 canals with different floor width.

Methodology

The modified head-discharge equation for triangular sharp crested weir proposed by Kindsvater and Carter (1957) (Eq. 1) was the basis for conducting experiments and arriving at the discharge calculation relationships in free flow conditions.

$$Q = C_d Q_{theo.} \quad (1)$$

$$Q_{theo.} = \frac{8}{15} \sqrt{2g} \tan\left(\frac{\theta}{2}\right) H_e^{2.5}, (H_e = H + K_h) \quad (2)$$

In the above equations, Q = flow rate, H_e = effective height of water on vertex of the weir, g = acceleration of gravity, θ = angle of the weir vertex, C_d = discharge coefficient, which is affected by the geometry of the weir, H = water height on the vertex of weir and K_h = a quantity that depends on the characteristics of the fluid and the angle of the vertex of weir, and its value is presented in a graph for water at a temperature of 5 to 30 degrees Celsius.

In submerged flow conditions, following functional equations were based for conducting experiments and arriving at the discharge calculation equations.

$$\frac{Q_s}{Q_f} = f\left(\frac{H_2}{H_1}, \theta\right) \quad (3)$$

$$\frac{Q_s}{\sqrt{gH_1^5}} = f\left(\frac{H_1 - H_2}{H_1}, \theta\right) \quad (4)$$

Where H_1 and H_2 = flow depth in the upstream and downstream of the weir respectively, Q_s = submerged flow rate, Q_f = free flow rate per H_1 .

10 experiments in free flow and 77 experiments in submerged flow conditions conducted in a flume with a length of 3, width of 0.2 and height of 0.2 meters with an adjustable floor slope in the hydraulic laboratory. To verify the obtained results, all the experiments were repeated again in another flume with a floor width of 25 cm.

Results and Discussion

Based on equation 1 and experiments in the canal with floor width of 20 cm, the variation of the measured flow (Q) with the theoretical flow ($Q_{theo.}$) is shown in Figure 1-a. In order to check the accuracy of the obtained graph and equation, all the experiments were repeated by installing another 90° triangular sharp crested weir in another flume (with a floor width of 25 cm). Based on the these experiments (validation tests), the value of C_d coefficients were obtained as 0.6602 (Fig.1-b), same as fig. 1-a, (Fig.1-b).

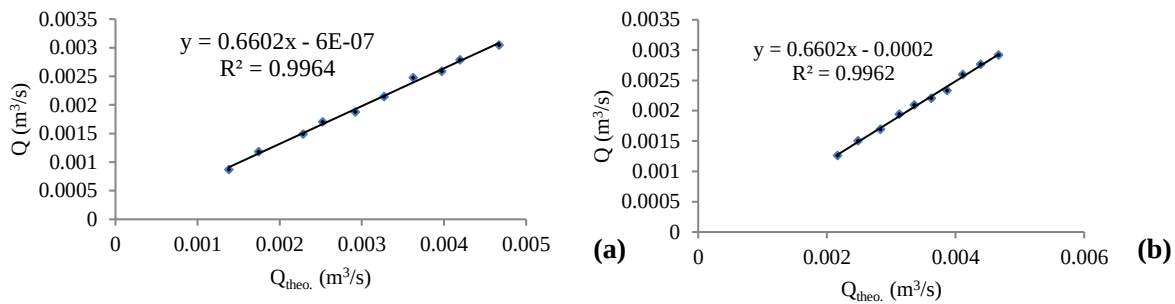


Fig. 1- variation of the measured flow (Q) with the theoretical flow ($Q_{theo.}$), a, in canal with floor width of 20 cm b, in canal with floor width of 25cm

Also based on Eq. 3 and 4, the following equations are obtained to discharge calculation under the submerged flow conditions.

$$\frac{Q_s}{Q_f} = 1.1218 \left(\frac{H_1 - H_2}{H_1} \right)^{0.1574} \quad R^2 = 0.9672 \quad (5)$$

$$\frac{Q_s}{\sqrt{gH_1^5}} = 0.67 \left(\frac{H_1 - H_2}{H_1} \right)^{0.1574} \quad R^2 = 0.9673 \quad (6)$$

Conclusions

In this research, a 90 degree triangular sharp crested weir was installed in the flume so that the vertex of the weir be the same level with the bottom of the channel in the central axis. After conducting several tests in the canal with a floor width of 20 cm, the relationships for calculating the discharge under free and submerged flow conditions were obtained based on dimensional analysis and the general relationship for calculating the discharge in triangular sharp crested weirs. In order to check the accuracy of the obtained relationships and verify them, experiments were carried out in another laboratory channel with a floor width of 25 cm (both in free flow and submerged flow conditions). The accuracy of the obtained relationships was evaluated using statistical functions of mean absolute value of relative error (MARE) and root mean square error (RMSE) for both channels. Results indicate the high accuracy of discharge calculation relationships both in free flow and submerged flow conditions. Based on the obtained

results, both in free flow and submerged flow conditions, the flow permeability of triangular sharp crested weirs with $P=0$ is higher than weirs with $P>0$.

Key Words: Discharge coefficient, Flow measurement, Free flow, Submerged flow, Triangular weir



نوع مقاله: پژوهشی

اندازه گیری دبی جریان در کانال ها با استفاده از سرریز لبه تیز مثلثی ۹۰ درجه با راس همتراز با کف کانال

ابراهیم ولیزادگان^۱، فرزاد جلیلی^۲

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۱/۱۴ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۴/۲۶

چکیده

سرریزهای لبه تیز مثلثی یکی از ابزارهای کم هزینه و دقیق برای اندازه گیری جریان در کانال ها هستند. با وجود ساخت تجهیزات پیشرفته و گرانی قیمت اندازه گیری جریان، استفاده از سرریزها بخصوص سرریز لبه تیز مثلثی برای بهره برداران از شبکه های آبیاری و آبرسانی انتخاب اول بوده است. روابط محاسبه دبی جریان با استفاده از سرریزهای لبه تیز مثلثی برای شرایط خاص نصب این سرریزها توسعه داده شده اند که یکی از این شرایط قرار گرفتن راس سرریز در ارتفاع معین نسبت به کف کانال (P) است. اما اگر نتوان این ارتفاع را تامین کرد، استفاده از این روابط دقت بالایی نخواهد داشت. در این تحقیق سرریز لبه تیز مثلثی ۹۰ درجه طوری در کانال نصب شد که راس سرریز در محور مرکزی بر کف کانال منطبق شود ($P=0$). آزمایش های متعددی در شرایط جریان آزاد و مستغرق صورت گرفت. در شرایط جریان آزاد ضریب C در رابطه $Q=CH_e^{2.5}$ دبی جریان بر حسب متر مکعب بر ثانیه و H_e ارتفاع مؤثر آب روی راس سرریز بر حسب متر، برابر ۱/۵۵۹۴ شد. برای شرایط جریان مستغرق روابط محاسبه دبی به دست آمدند. برای ارزیابی صحت روابط به دست آمده، آزمایش ها در کانال آمایشگاهی دیگر تکرار شد و متوسط قدر مطلق خطای نسبی ($MARE$) روابط به دست آمده در برآورد دبی جریان در شرایط جریان آزاد ۷/۷ و در شرایط جریان مستغرق ۴/۳ درصد تعیین شد.

واژه های کلیدی: اندازه گیری جریان، جریان آزاد، جریان مستغرق، سرریز مثلثی، ضریب دبی

مقدمه

گرفت که ضریب دبی سرریز با تغییر در ارتفاع آب روی سرریز، تغییر می کند. استریکلند (Strickland, 1910) بر اساس داده های آزمایش های بار (Barr, 1910) رابطه محاسبه ضریب دبی سرریز را به دست آورد. در این رابطه، ضریب دبی سرریز تابعی از ارتفاع آب روی راس سرریز است (Shen, 1981). در آزمایش های کن (Cone, 1916) راس سرریزها در ارتفاع ۱۳۷/۱۶ سانتی متر نسبت به کف کانال قرار داشتند. وی با حذف داده های مربوط به سرریز ۱۲۰ درجه (به دلیل سرریز نشدن آزادانه جریان از روی آن) رابطه محاسبه دبی جریان را که تابع ارتفاع آب روی راس سرریز و زاویه راس سرریز بود به دست آورد. گریو (Greve, 1932) برای سرریزهایی با زاویه راس ۲۰ تا ۱۲۰ درجه، رابطه ای دیگر برای محاسبه ضریب دبی ارائه کرد. در آزمایش های این محقق، راس سرریز در ارتفاع ۱۳۷/۱۶ تا ۱۵۲/۴ سانتی متر نسبت به کف کانال قرار داشت

به رغم توسعه و ساخت تجهیزات پیشرفته اندازه گیری دبی جریان در کانال ها، سرریزهای لبه تیز به دلیل سادگی در بهره برداری و کم هزینه بودن، همواره در شبکه های آبیاری و آبرسانی به کار گرفته می شوند. تحقیقات زیادی برای به دست آوردن رابطه محاسبه دبی جریان در انواع سرریزهای لبه تیز صورت گرفته است. این روابط برای شرایط و محدوده های خاص سازه ای و هیدرولیکی توسعه داده شده اند. تامسون (Thomson, 1861) در شرایط بسیار محدود هیدرولیکی، ضریب دبی در رابطه عمومی محاسبه دبی عبوری از روی سرریزهای لبه تیز مثلثی را برای سرریزهای ۹۰ و ۱۲۷ درجه به ترتیب ۰/۵۹۳ و ۰/۶۱۷ بدست آورد. بار (Barr, 1910) با آزمایش روی سرریزهای لبه تیز مثلثی که راس سرریز در ارتفاع $P=۶۰/۹۶$ سانتی متری (۲ فوتی) از کف کانال قرار داشت نتیجه

^۱ گروه علوم و مهندسی آب، واحد خوی، دانشگاه آزاد اسلامی، خوی، ایران. (Email: ebrahim.valizadegan@iaui.ac.ir)^۲ گروه علوم و مهندسی خاک، واحد خوی، دانشگاه آزاد اسلامی، خوی، ایران.

کردند. وطن‌خواه (Vatankhah, 2010) پس از اجرای آزمایش‌های متعدد، معادله‌ای برای محاسبه دبی جریان با استفاده از سرریز لبه تیز دایره‌ای به‌دست آورد و مقدار خطای این معادله را حداکثر ۰/۰۸ درصد اعلام کرد. سوامی و همکاران (Swamee et al., 2011) مشخصات جریان عبوری از روی سرریزهای مایل را بررسی و رابطه محاسبه ضریب دبی جریان را استخراج کردند. تخمین دبی جریان در سرریزهای لبه تیز مرکب به روش عددی توسط ظهیری (Zahiri, 2012) بررسی شد. وی از تشابه هیدرولیک جریان در انواع سرریزهای لبه تیز مرکب با هیدرولیک جریان در کانال‌های مرکب استفاده کرد و به کمک مدل ریاضی شبه دوبعدی ابتدا توزیع عرضی سرعت روی سرریز مرکب و پس از آن دبی جریان در انواع مختلف سرریزهای مرکب را به روش عددی محاسبه و با داده‌های آزمایشگاهی مقایسه کرد و خطای نسبی در برآورد دبی جریان را یک درصد گزارش داد. دی استفانو و فرو (Di Stefano and Ferro, 2013) برای به‌دست آوردن رابطه دبی-اشل در سرریزهای لبه تیز مثلثی در پلان (در مقطع افقی) با استفاده از آنالیز ابعادی و نظریه خود تشابه ناقص تحقیق کردند و بر اساس نتایج آزمایشگاهی موجود در تحقیقات دیگر، قابلیت رابطه به‌دست آمده را بررسی کردند. آیاز و منصور (Ayaz and Mansoor, 2015) بر اساس نتایج آزمایش‌های برقی و همکاران (Borghei et al., 2003) ضریب دبی جریان را در سرریز لبه تیز مایل با استفاده از شبکه عصبی مصنوعی در شرایط جریان آزاد و مستغرق شبیه سازی کردند و خطای برآورد دبی و ضریب دبی جریان را یک درصد گزارش دادند. محمدعلی و همکاران (Mohamed Ali et al., 2015) کارایی سرریز لبه تیز مرکب مثلثی-مثلثی را برای اندازه‌گیری جریان به صورت آزمایشگاهی بررسی و دقت بالای این سرریز را در اندازه‌گیری محدوده‌ای وسیع از دبی جریان اعلام کردند. رضایی و همکاران (Rezaee et al., 2016) با مقایسه سرریزهای کنگره‌ای و مستقیم، نتیجه گرفتند که در

(Shen, 1981). تاثیر ویسکوزیته و کشش سطحی روی دبی عبوری از روی سرریز لبه تیز مثلثی را لنز (Lenz, 1943) بررسی کرد. در این بررسی، که راس سرریزها در ارتفاع ۹۱/۴۴ سانتی‌متری از کف کانال قرار داشتند، رابطه محاسبه ضریب دبی که تابع عدد رینولدز، عدد وبر و زاویه راس سرریز است به‌دست آمد. نومچی و همکاران (Numachi et al., 1940) نیز رابطه محاسبه ضریب دبی سرریز لبه تیز مثلثی ۹۰ درجه را به‌دست آوردند که راس آن حداقل ۱۰ سانتی‌متر بالاتر از کف کانال نصب شده بود. این محققان آزمایش‌های تکمیلی را در شرایطی اجرا کردند که راس سرریز حداقل ۳ میلی‌متر و حداکثر ۵ سانتی‌متر بالاتر از کف کانال نصب شده بود ($5\text{cm} \geq P \geq 3\text{mm}$) و رابطه‌ای را برای محاسبه ضریب دبی ارائه دادند (Shen, 1981). کینگ (King, 1916) پس از تحقیق روی سرریزهای ۲۲/۵، ۶۰ و ۹۰ درجه رابطه محاسبه ضریب دبی را برای هر سرریز به طور جداگانه به‌دست آورد. در تحقیقات وی راس سرریزها ۶۰/۹۶ سانتی‌متر بالاتر از کف کانال قرار داشت.

برای افزایش کارایی، قابلیت عبوردهی و دقت سرریزها، محققان در سالهای اخیر با اعمال تغییرات مختلف در هندسه سازه انواع سرریزهای لبه تیز، به تحقیقات متنوعی دست زده‌اند. ایگاتیناتان و همکاران (Igathinathane et al., 2007) با بررسی ویژگی‌های سرریز سهموی تنها عامل مؤثر بر ضریب دبی را زاویه رأس سرریز در نظر گرفتند و رابطه‌ای را برای به‌دست آوردن ضریب دبی پیشنهاد دادند. کاسترو-اورقاز و همکاران (Castro-Orgaz et al., 2008) نشان دادند در سرریزهای دایره‌ای ضریب دبی با افزایش نسبت انرژی مخصوص (E) به شعاع انحنای سرریز (R) افزایش می‌یابد و جریان روی تاج سرریز به ازای نسبت E/R از ۰/۵ تا ۰/۶ بحرانی و برای مقادیر بیشتر فوق بحرانی است. باقری و حیدرپور (Bagheri and Heidarpour, 2010) با اجرای آزمایش‌هایی روی مدل سرریزهای لبه تیز مستطیلی با عرض و ارتفاع متفاوت، معادلاتی برای پروفیل فوقانی و تحتانی و ضریب دبی این سرریزها پیشنهاد

استفاده از رابطه عمومی دبی-اشل را ۲/۵۱ درصد گزارش دادند. دیودار و همکاران (Diwedat et al., 2022) با آزمایش‌هایی، هیدرولیک جریان عبوری از سازه ترکیبی سرریز مثلثی لبه تیز و دریچه V شکل معکوس را بررسی کردند و روابط و نمودارهای مربوط را به‌دست آوردند. با توجه به اینکه سرریزهای لبه تیز مثلثی نسبت به سرریزهای مستطیلی توانایی عبوردهی جریان کمتری دارند زینی‌وند و همکاران (Zeinivand et al., 2024) به منظور افزایش قابلیت عبوردهی جریان در سرریزهای لبه تیز مثلثی به ایجاد روزنه‌هایی با ابعاد معین در بدنه سرریز دست زدند و بررسی‌ها را انجام دادند. آنها ضمن اعلام افزایش توانایی عبوردهی سرریز با استفاده از این روش، رابطه محاسبه ضریب دبی جریان با دقت بالا را پیشنهاد دادند. نیکوزیا و همکاران (Nicosia et al., 2024) بر اساس آنالیز ابعادی و نظریه خود تشابه ناقص معادله دبی-اشل را برای محاسبه دبی عبوری از روی سرریزهای لبه تیز مثلثی که بدنه آن با روزنه‌های مربعی سوراخ شده است به‌دست آوردند و در ۹۸/۹ درصد موارد خطای برآورد دبی با استفاده از این رابطه را برابر ۲۰ درصد اعلام کردند. برای استفاده از روابط توسعه داده شده به‌منظور محاسبه دبی جریان با استفاده از سرریزهای لبه تیز مثلثی، سرریز باید طوری در کانال نصب شود که راس آن در ارتفاع معینی از کف کانال قرار گیرد که در برخی شرایط نمی‌توان این ارتفاع را در داخل کانال تامین کرد. با توجه به اینکه در یک دبی معین، ارتفاع آب پشت سرریز لبه‌تیز مثلثی با $P>0$ ، بزرگتر از سرریز لبه تیز مثلثی با $P=0$ خواهد شد، احتمال سرریز شدن جریان از دیواره‌های کانال به بیرون در سرریزهای با $P>0$ بیشتر است. میزان تجمع تدریجی رسوبات پشت سرریزهای با $P>0$ به مراتب بیشتر است تا سرریزهای با $P=0$ و به همین دلیل با استفاده از سرریزهای بررسی شده در این تحقیق می‌توان دبی‌های بزرگتری را نسبت به سرریزهای با $P>0$ اندازه‌گیری کرد (بدون سرریز شدن آب به بیرون از کانال)

دبی‌های مختلف، تغییر در ارتفاع آب در بالادست سرریزهای کنگره‌ای نسبت به سرریزهای معمولی کمتر است (به دلیل داشتن طول تاج زیاد) و به ارتفاع آزاد کمتری در بالادست نیاز خواهد بود. این محققان استفاده از سرریزهای کنگره‌ای در شبکه‌های آبیاری را نسبت به سرریزهای معمولی مناسب‌تر تشخیص دادند. سعادت نژاد قره‌حسنلو و همکاران (Saadatnejadgharahassanlou et al., 2017) سرریزهای لبه تیز جدید به نام SCVW را که تاج آن دندانه‌دار مثلثی است معرفی و با آزمایش‌های متعدد تغییرات ضریب دبی جریان در برابر زاویه راس مثلث و ارتفاع راس مثلث نسبت به کف کانال را بررسی کردند. بابایی و همکاران (Babaei et al., 2018) به روش عددی، مشخصات جریان عبوری از سرریز لبه تیز با مقطع افقی مثلثی با زوایه راسهای مختلف در پایین‌دست را بررسی کردند و به طور میانگین افزایش ۶ درصد در ضریب آبگذری سرریزهای پیشنهادی را در مقایسه با سرریز با راس در بالادست گزارش کردند. مهتابی و ارونقی (Mahtabi and Arvanaghi, 2018) با آزمایش‌های متعدد روی جریان عبوری از سرریز لبه تیزمستطیلی بدون فشرده‌گی جانبی، برای یافتن بهترین فرم رابطه ضریب دبی، از تکنیک بهینه‌سازی استفاده کردند. نیکوزیا و همکاران (Nicosia et al., 2019) با استفاده از آنالیز ابعادی و نظریه خود تشابه ناقص، رابطه دبی-اشل را برای سرریزهای لبه تیز power-low به‌دست آوردند و قابلیت این رابطه را بر اساس اطلاعات موجود در مقالات مختلف بررسی کردند. وطن خواه و خمیس آبادی (Vatankhah and Khamisabadi, 2019) برای اندازه‌گیری جریان با استفاده از سرریزهای لبه تیز power-law با $1 \leq n \leq 2$ به تحقیقات آزمایشگاهی پرداختند و با استفاده از تئوری آنالیز ابعادی و جریان بحرانی، رابطه دبی-اشل عمومی را برای سرریزهای مثلثی ($n=1$) و لبه منحنی^۱ با $n>1$ به‌دست آوردند. این محققان خطای برآورد دبی جریان با

¹ Curved edge

راس سرریز، B =عرض کف کانال، g =شتاب ثقل زمین، θ =زاویه راس سرریز، ρ =جرم حجمی سیال، μ =ویسکوزیته دینامیک سیال، σ =ضریب نیروی کشش سطحی، Re =عدد رینولدز، We =عدد وبر، C_d =ضریب دبی جریان، H =ارتفاع آب روی راس سرریز و K_h =کمیتی است که به ویژگیهای سیال و زاویه راس سرریز بستگی دارد و مقدار آن برای آب معمولی در دمای ۵ تا ۳۰ درجه سانتیگراد در نموداری ارائه شده است.

رابطه محاسبه دبی جریان آزاد را می‌توان به صورت رابطه ۸ نیز در نظر گرفت (رابطه دبی-اشل).

$$Q = CH_e^{2.5} \quad (8)$$

که C ضریب دبی رابطه ۸ است.

بر اساس آنالیز ابعادی، برای جریان مستغرق رابطه تابعی و بدون بعد زیر را می‌توان در نظر گرفت.

$$\frac{Q_s}{Q_f} = f\left(\frac{H_2}{H_1}, \theta\right) \quad (9)$$

همچنین برای شرایط جریان مستغرق، رابطه ۳ به فرم زیر نیز در نظر گرفته می‌شود.

$$\frac{Q_s}{\sqrt{gH_1^5}} = f\left(\frac{H_1 - H_2}{H_1}, \theta\right) \quad (10)$$

ویلمونت (Villemonte 1947) از رابطه ۱۱ برای محاسبه دبی جریان مستغرق استفاده کرد.

$$\frac{Q_s}{Q_f} = \left(1 - \left(\frac{H_2}{H_1}\right)^n\right)^{0.385} \quad (11)$$

در رابطه‌های ۹، ۱۰ و ۱۱، H_1 و H_2 به ترتیب عمق جریان در بالادست و پایین دست سرریز، Q_s =دبی جریان مستغرق، Q_f =دبی جریان آزاد به ازای H_1 و n =توان درجه استغراق است. ویلمونت (Villemonte, 1947) برای سرریزهای لبه تیز مثلثی که به طور کامل و جزئی منقبض^۱ شده‌اند مقدار n را ۲/۵ و برای سرریزهای لبه تیز مستطیلی ۱/۵ گزارش کرده‌است.

و نیز از تجمع رسوبات پشت سرریز جلوگیری کرد. مرور تحقیقات محققان مختلف نشان می‌دهد تاثیر انطباق راس سرریز با کف کانال چندان مورد توجه قرار نگرفته و ضریب دبی جریان در این حالت به دست نیامده است. از این رو در این تحقیق با انطباق راس سرریز لبه تیز مثلثی بر کف کانال، آزمایش‌های متعددی برای بررسی اندازه‌گیری جریان و بدست آوردن ضریب دبی صورت گرفته است.

مواد و روش‌ها

آنالیز ابعادی

عوامل موثر در جریان آزاد از روی سرریز لبه تیز مثلثی با راس هم‌تراز با کف کانال ($P=0$) به صورت رابطه تابعی زیر است.

$$f(Q, H, B, \theta, g, \rho, \mu, \sigma) = 0 \quad (1)$$

بر اساس تئوری باکینگهام، با در نظر گرفتن متغیرهای H ، g و ρ به عنوان متغیرهای تکرار شونده، پارامترهای بی‌بعد زیر به دست می‌آیند.

$$\pi_1 = \frac{Q}{\sqrt{gH^5}}, \pi_2 = \frac{H}{B}, \pi_3 = Re, \pi_4 = We, \pi_5 = \theta \quad (2)$$

بنابراین رابطه تابعی و بدون بعد زیر برای یک سرریز با θ مشخص بدست می‌آید.

$$\frac{Q}{\sqrt{gH^5}} = f\left(\frac{H}{B}, Re, We, \theta\right) \quad (3)$$

بر اساس رابطه ۳ و رابطه انرژی، رابطه ۴ برای محاسبه دبی عبوری از سرریزهای لبه تیز مثلثی توسط کیندزواتر و کارتر (Kindsvater and Carter, 1957). به دست آمده است،

$$Q = \frac{8}{15} C_d \sqrt{2g} \tan\left(\frac{\theta}{2}\right) H_e^{2.5} \quad (4)$$

$$H_e = H + K_h \quad (5)$$

رابطه ۴ را به فرم زیر نیز می‌توان نوشت.

$$Q = C_d Q_{theo} \quad (6)$$

$$Q_{theo} = \frac{8}{15} \sqrt{2g} \tan\left(\frac{\theta}{2}\right) H_e^{2.5} \quad (7)$$

در رابطه‌های بالا Q =دبی جریان، H_e =ارتفاع مؤثر آب روی

¹ Fully or partially contracted

تجهیزات آزمایشگاهی

آزمایش‌ها در یک فلوم آزمایشگاهی به طول ۳، عرض ۰/۲ و ارتفاع ۰/۲ متر با شیب کف قابل تنظیم در آزمایشگاه هیدرولیک اجرا گردید. کف و دیواره‌های فلوم شیشه‌ای با چارچوب فلزی است و دبی جریان توسط مخزنی که در انتهای فلوم نصب شده است به روش حجمی اندازه‌گیری می‌شود. برای اندازه‌گیری عمق جریان در کانال از عمق‌سنجی با دقت ± 0.1 میلی‌متر استفاده شد. آزمایش‌ها روی سرریز لبه تیز مثلثی با زاویه راس ۹۰ درجه صورت گرفت که از ورق نازک PVC ساخته شده است. این سرریز در داخل فلوم طوری نصب شد که راس سرریز در محور مرکزی و منطبق بر کف فلوم باشد. شکل (۱) کانال آزمایشگاهی را حین آزمایش نشان می‌دهد. آزمایش‌ها در دو حالت جریان آزاد (بدون تاثیر عمق پایاب) و جریان مستغرق به اجرا درآمدند. ابتدا در یک دبی معین، آزمایش در شرایط جریان آزاد دنبال گردید و پس از اندازه‌گیری‌های لازم، بی‌آنکه دبی جریان تغییر داده شود، حداقل ۵ و حداکثر ۱۰ درجه استغراق با استفاده از دریچه نصب شده در انتهای کانال ایجاد و داده‌های مورد نیاز در شرایط جریان مستغرق اندازه‌گیری و ثبت شدند. بدین‌ترتیب ۱۰ آزمایش در شرایط جریان آزاد و ۷۷ آزمایش در شرایط جریان مستغرق اجرا شد. برای صحت‌سنجی نتایج به‌دست آمده، تمامی آزمایش‌ها بار دیگر در یک فلوم دیگر با عرض کف ۲۵ سانتی‌متر تکرار شدند (شکل ۲). حد بالا و حد پایین پارامترهای مورد نیاز

در جدول (۱) ارائه شده است. در این تحقیق کلیه آزمایش‌ها و تحلیل‌ها روی پارامترهای اندازه‌گیری شده بر اساس روابط ۶، ۸، ۹ و ۱۰ صورت گرفت. به منظور بررسی دقت روابط به‌دست آمده برای محاسبه دبی جریان در شرایط جریان آزاد و مستغرق از توابع آماری متوسط قدر مطلق خطای نسبی^۱ (MARE) و خطای جذر میانگین مربعات^۲ (RMSE) استفاده شد.

$$MARE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{x_i - y_i}{x_i} \right| \quad (12)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - y_i)^2}{n}} \quad (13)$$

که در آن x_i و y_i به ترتیب مقادیر مشاهده شده (اندازه‌گیری شده) و محاسبه شده پارامترهای مورد بررسی و n تعداد آزمایش‌هاست.

نتایج و بحث

جریان آزاد (بدون تاثیر عمق پایاب)

ده آزمایش در شرایط جریان آزاد روی سرریز ۹۰ درجه در کانال آزمایشگاهی با عرض کف ۲۰ سانتی‌متر اجرا شد. پس از اندازه‌گیری و ثبت پارامترهای مورد نیاز، ضرایب دبی و نمودارهای مربوطه با توجه به رابطه‌های ۶ و ۸ به‌دست آمدند.

بر اساس رابطه ۶ تغییرات دبی اندازه‌گیری شده (Q) با دبی تئوریک (Q_{theo}) و بر اساس رابطه ۸ تغییرات $He^{2.5}$ در برابر دبی اندازه‌گیری شده در شکل (۳) نشان داده شده است.

جدول ۱- حد بالا و پایین پارامترهای مورد نیاز در آزمایش‌ها

Table 1- Upper and lower limit of required parameters in experiments

$\theta(^{\circ})$	پارامتر Parameter	جریان آزاد Free Flow		جریان مستغرق Submerged Flow		
		H/B	$Q/(gH_1^5)^{2.5}$	H/B	$Q/(gH_1^5)^{2.5}$	H_2/H_1
90	حد بالا lower limit	0.25	0.498	0.23	0.23	0.6
	حد پایین Upper limit	0.41	0.532	0.47	0.52	0.99

¹ Mean Absolute Relative Error

² Root Mean Square Error



الف

ب

شکل ۱- کانال آزمایشگاهی با عرض کف ۲۰ سانتی‌متر حین آزمایش. الف، جریان آزاد ب، جریان مستغرق

Fig. 1- flume with a floor width of 20 cm during testing. a; Free flow b; submerged flow



شکل ۲- کانال آزمایشگاهی با عرض کف ۲۵ سانتی‌متر حین آزمایش

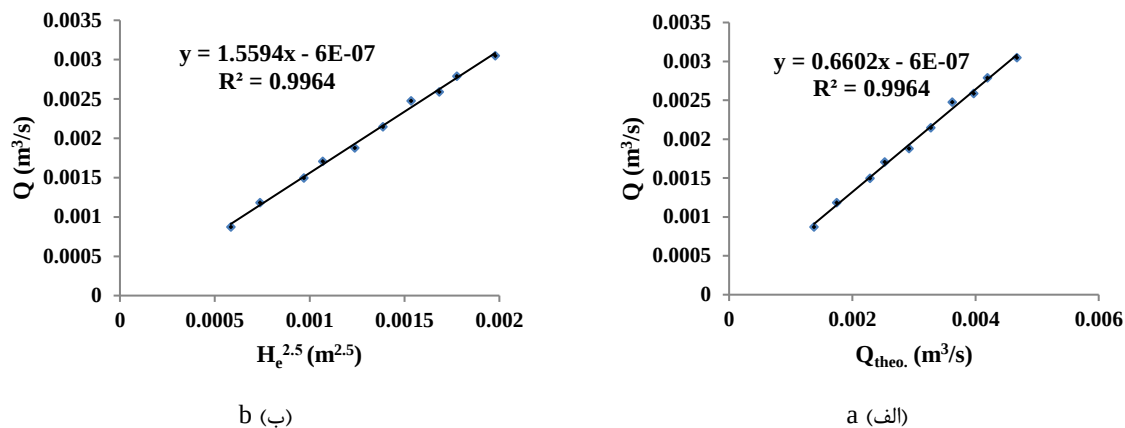
Fig. 2- flume with a floor width of 25 cm during testing

درجه که راس آن با کف کانال هم‌تراز بود ($P=0$) اجرا کرد و نتیجه گرفت که در این حالت مقدار C_d نسبت به حالت قبلی افزایش می‌یابد.

برای تایید ضریب‌های بدست آمده، کلیه آزمایش‌ها با نصب سرریز لبه تیز مثلثی دیگر در کانال آزمایشگاهی دیگر (با عرض کف ۲۵ سانتی‌متر) تکرار شدند. بر اساس نتایج این آزمایش‌ها، ضریب‌های C و C_d (طبق شکل ۴) نیز به ترتیب $۱/۵۵۹۳$ و $۰/۶۶۰۲$ به‌دست آمده‌اند که مؤید نتایج آزمایش‌ها در کانال آزمایشگاهی با عرض کف ۲۰ سانتی‌متر است.

با توجه به نمودارهای شکل (۳) برای سرریز پرکاربرد ۹۰ درجه، مقدار C و C_d در این تحقیق (رابطه ۶ و ۸) به ترتیب $۱/۵۵۹۴$ و $۰/۶۶۰۲$ به‌دست آمده در صورتیکه مقدار این ضرایب برای سرریز مثلثی ۹۰ درجه کاملاً یا تقریباً متراکم که راس آن در ارتفاع معینی نسبت به کف کانال نصب شده به ترتیب $۱/۳۸$ و $۰/۵۸۵$ است (Henderson, 1966). بنابراین، ضریب‌های C و C_d در این تحقیق بیشتر از مقادیر متناظرشان در سرریزهای مثلثی کاملاً و یا تقریباً متراکم شده است. کن (Cone, 1916) نیز در شرایط جریان آزاد آزمایش‌هایی را روی سرریز ۹۰

اندازه‌گیری دبی جریان در کانال‌ها با استفاده از سرریز تیز مثلی ۹۰ درجه با راس همتراز با کف کانال



شکل ۳- نتایج آزمایش‌ها در کانال با عرض کف ۲۰ سانتی‌متر الف، تغییرات دبی اندازه‌گیری شده (Q) در برابر دبی تئوریک (Q_{theo.}) ب، تغییرات H_e^{2.5} در برابر دبی اندازه‌گیری شده (Q)

Fig. 3- The results of the experiments in the canal with a floor width of 20 cm. a; variations of the measured discharge (Q) vs. the theoretical discharge (Q_{theo.}) b; variations of the H_e^{2.5} vs. the measured discharge (Q)

پارامترهای بی بعد موجود در رابطه ۱۴ نسبت به هم در شکل ۵ (الف) و تغییرات پارامترهای بی‌بعد موجود در رابطه ۱۵ نسبت به هم در شکل ۵ (ب) نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که با افزایش پارامتر بی‌بعد می‌یابد. بنابراین، با افزایش اختلاف ارتفاع سطح آب در بالادست و پایین‌دست سرریز، دبی جریان مستغرق افزایش می‌یابد. به عبارت دیگر، در هر دو نمودار با افزایش درجه استغراق (H₂/H₁) دبی عبوری از روی سرریز کاهش می‌یابد.

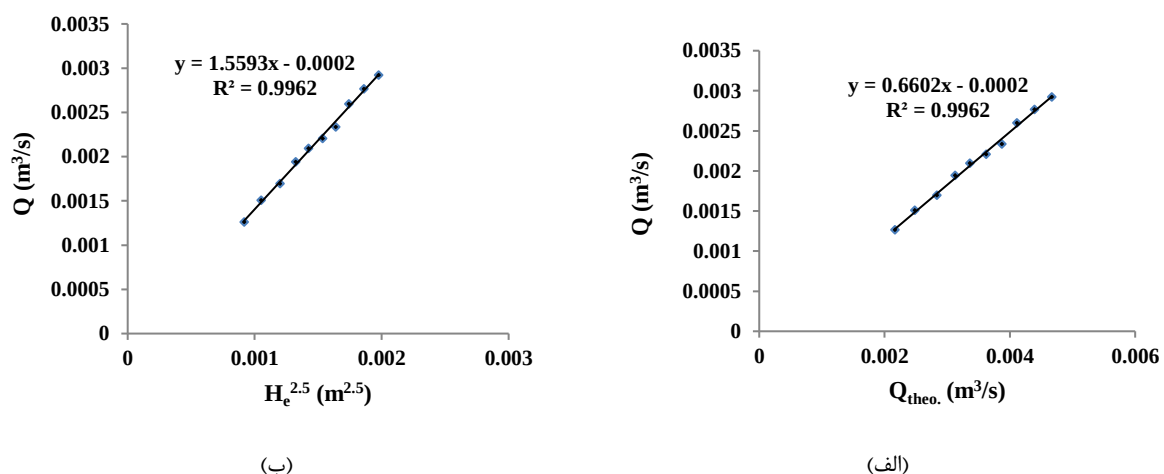
جریان مستغرق

در این تحقیق در شرایط جریان مستغرق و در سرریزی با زاویه راس مشخص رابطه ۹ و ۱۰ به ترتیب به صورت رابطه ۱۴ و ۱۵ در نظر گرفته شدند.

$$\frac{Q_s}{Q_f} = f\left(\frac{H_1 - H_2}{H_1}\right) \quad (14)$$

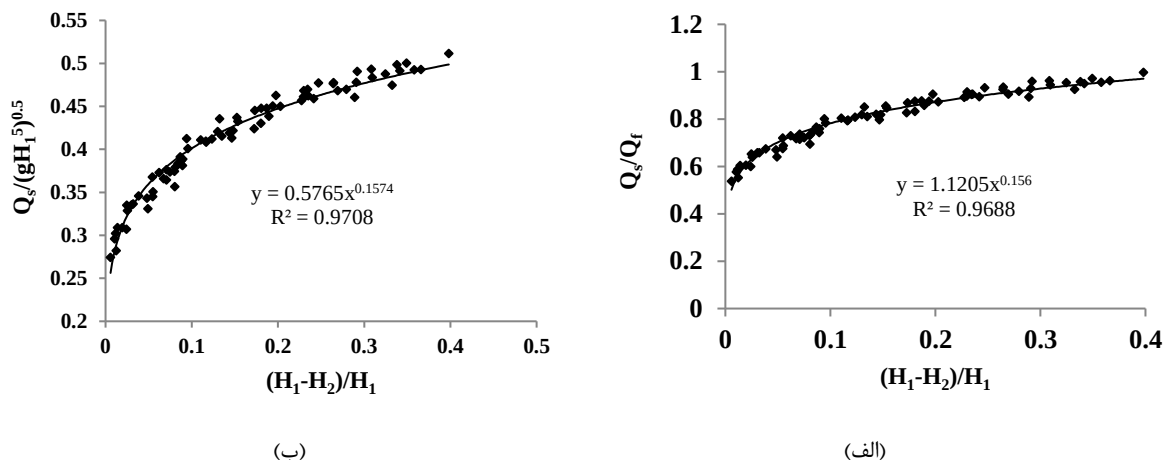
$$\frac{Q_s}{\sqrt{gH_1^3}} = f\left(\frac{H_1 - H_2}{H_1}\right) \quad (15)$$

برای ایجاد جریان مستغرق از دریچه نصب شده در انتهای کانال استفاده شد. در این شرایط ۷۷ آزمایش صورت گرفت. بر اساس نتایج آزمایش‌ها، تغییرات



شکل ۴- نتایج آزمایش‌ها در کانال با عرض کف ۲۵ سانتی‌متر (آزمایش‌های صحت‌سنجی). الف، تغییرات دبی اندازه‌گیری شده (Q) در برابر دبی تئوریک (Q_{theo.}) ب، تغییرات H_e^{2.5} در برابر دبی جریان (Q).

Fig. 4- The results of the experiments in the canal with a floor width of 25 cm. (Validation tests). a; Variations of the measured discharge (Q) vs. the theoretical discharge (Q_{theo.}) b; Variations of the H_e^{2.5} vs. the measured discharge (Q)



شکل ۵- الف، تغییرات $(H_1-H_2)/H_1$ در برابر Q_s/Q_f ب، تغییرات $(H_1-H_2)/H_1$ در برابر $Q/(gH_1^5)^{0.5}$

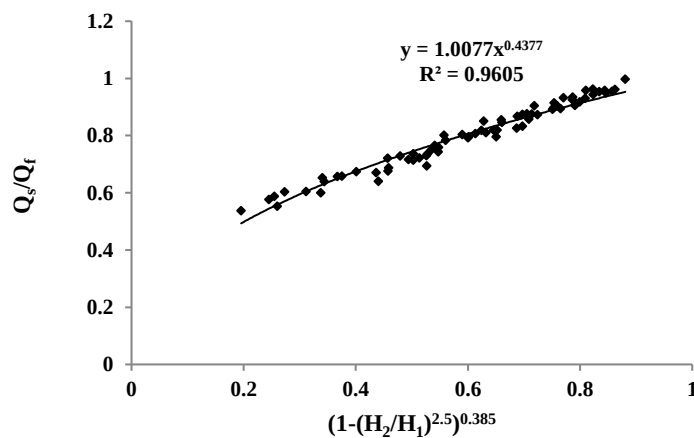
Fig. 5- a; Variations of the $(H_1-H_2)/H_1$ vs. Q_s/Q_f b; Variations of the $(H_1-H_2)/H_1$ vs. $Q/(gH_1^5)^{0.5}$

نشان داده شده در جدول (۲) حاکی از دقت مناسب رابطه‌ها در برآورد دبی جریان هم در شرایط جریان آزاد و هم در شرایط جریان مستغرق است.

مقایسه با دیگر تحقیقات

تحقیقات پیشین برای محاسبه دبی جریان عبوری از روی سرریز لبه تیز مثلثی اغلب در شرایطی صورت گرفته است که راس سرریز در ارتفاع معینی نسبت به کف کابال نصب شده باشد ($P \geq 0$) (همانطوریکه در مقدمه اشاره شده است).

بررسی ارتباط بین طرف اول و دوم رابطه ویلمونت (رابطه ۱۱) نشان داد که توان ۰/۳۸۵ موجود در رابطه ویلمونت در شرایط تحقیق حاضر تقریباً ۰/۱۶۸۵ است (شکل ۶). بنابراین در شرایط یکسان از نظر درجه استغراق، قابلیت عبوردهی جریان در سرریزهای بررسی شده در این تحقیق نسبت به سرریزهایی که راس آنها بالاتر از کف کانال نصب شده، بیشتر است. برای بررسی دقت روابط به‌دست آمده از توابع آماری MARE و RMSE (رابطه‌های ۱۲ و ۱۳) استفاده شد. مقادیر این توابع در جدول (۲) ارائه شده است.



شکل ۶- تغییرات $(1-(H_2/H_1)^{2.5})^{0.385}$ در برابر Q_s/Q_f (رابطه ویلمونت، رابطه ۱۱)

Fig. 6- variations of the $(1-(H_2/H_1)^{2.5})^{0.385}$ vs. Q_s/Q_f (Villemonete eq. 11)

اندازه‌گیری دبی جریان در کانال‌ها با استفاده از سرریز تیز مثلی ۹۰ درجه با راس همتراز با کف کانال

جدول ۲- مقادیر توابع آماری MARE و RMSE در محاسبه دبی جریان بر اساس روابط بدست آمده

Table 2- The values of the MARE and RMSE statistical functions in calculating the discharge based on the obtained relationships

Relationships					
RMSE	MARE	رابطه Eq.	کانال با عرض کف (cm) Canal with floor width of (cm)	شرایط جریان Flow conditions	
4E-5	0.02	شکل ۳- ب Fig. 3b	20	آزاد Free	
1.57E-4	0.077	شکل ۴- ب Fig. 4b	25		
5.44E-5	0.0218	شکل ۵- الف Fig. 5a	20	مستغرق Submerged	
5.39E-5	0.0216	شکل ۵- ب Fig. 5b			
1.26E-4	0.042	شکل ۵- الف Fig. 5a	25		
1.34E-4	0.0436	شکل ۵- ب Fig. 5b			

$$C_d = \frac{0.589}{H^{0.03}}$$

(۱۷) تامسون (Thomson, 1861) می‌گوید ارتفاع نصب

برخلاف نظر تامسون، کن (Cone, 1916) و نومچی و همکاران (Numachi *et al.*, 1940) ارتفاع نصب راس سرریز را در محاسبه دبی مؤثر دانسته‌اند. نومچی و همکاران (Numachi *et al.*, 1943) با آزمایش‌هایی روی سرریز لبه تیز مثلی ۹۰ درجه که راس آن در ارتفاعات مختلف (در محدوده ۳ میلی‌متر تا ۵ سانتی‌متر) نسبت به کف کانال نصب شده بود، رابطه زیر را برای محاسبه ضریب دبی در شرایط جریان آزاد ارائه داده‌اند.

راس سرریز نسبت به کف کانال (P) تاثیر قابل توجهی روی نتایج ندارد. استریکلند (Strickland, 1910) بر اساس داده‌های آزمایش‌های بار (Barr, 1910) که $P=60.96 \text{ cm}$ بود به این نتیجه رسید که ضریب دبی سرریز تابعی از ارتفاع جریان روی راس سرریز است (H بر حسب فوت).

$$C_d = 0.566 + \frac{0.0157}{\sqrt{H}} \quad (۱۶)$$

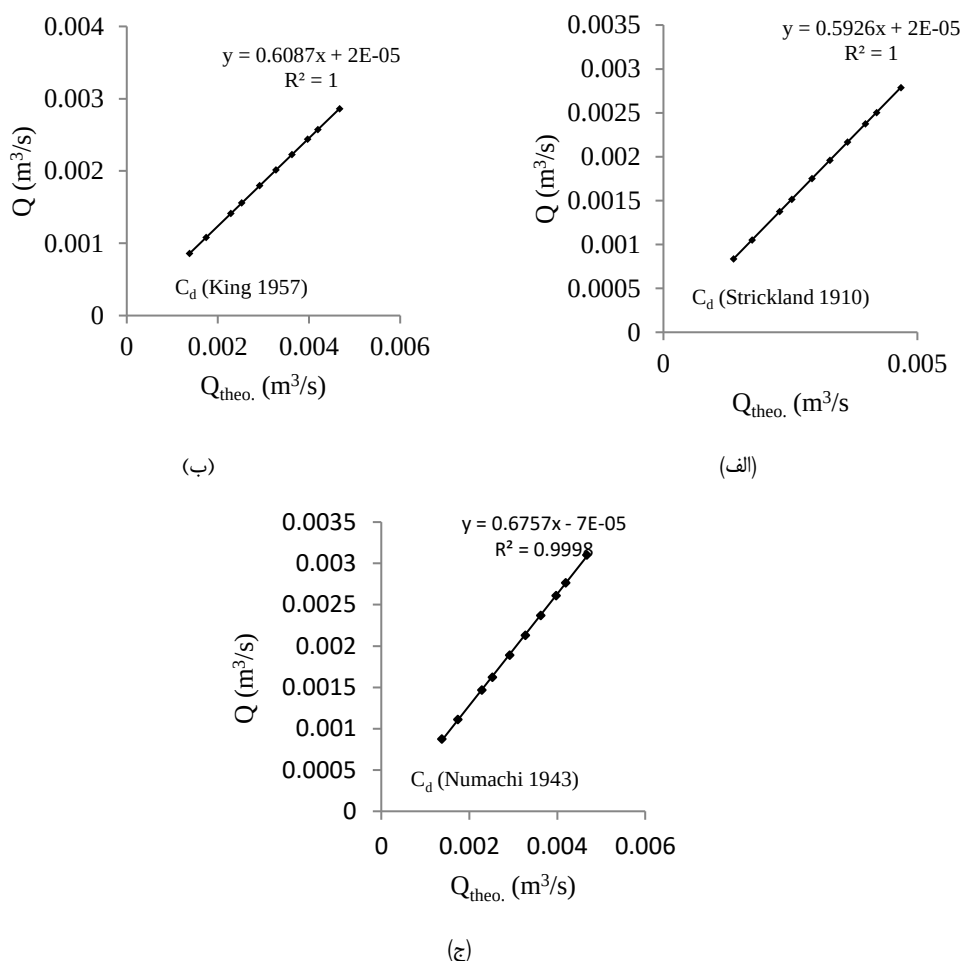
کینگ (King, 1916-1954) پس از تحقیق روی سرریزهای ۲۲/۵، ۶۰ و ۹۰ درجه با $P=60.96 \text{ cm}$ رابطه محاسبه ضریب دبی سرریز ۹۰ درجه را به‌دست آورد (H بر حسب فوت).

$$C_d = 0.574 + \frac{0.0055}{H} + \left(0.055 + \frac{0.278}{0.886 + P}\right) \left[\frac{H}{B} - \left(0.1 - \frac{0.0098}{0.079 + P}\right)\right]^2 \quad (۱۸)$$

شرایط جریان آزاد محاسبه و طبق رابطه‌های ۶ و ۷، دبی واقعی (Q) به‌دست می‌آید. تغییرات Q_{theo} در برابر Q واقعی که بر اساس رابطه ۱۶، ۱۷ و ۱۸ در شکل (۷) نشان داده شده است.

که در آن H = ارتفاع آب روی راس سرریز (فوت)، B = عرض کف کانال (فوت) و P = ارتفاع راس سرریز نسبت به کف کانال (فوت) است.

بر اساس داده‌های آزمایشگاهی تحقیق حاضر، مقادیر C_d (طبق رابطه‌های ۱۶، ۱۷ و ۱۸) برای هر آزمایش در



شکل ۷- تغییرات دبی تئوریک ($Q_{theo.}$) در برابر دبی واقعی محاسبه شده طبق تحقیقات الف: استریکلند (رابطه ۱۶)، ب: کینگ (رابطه ۱۷) و ج: نومچی (رابطه ۱۸)

Fig. 7. variations of the theoretical discharge ($Q_{theo.}$) vs, actual calculated discharge according to the research of a; Strickland (Eq. 16) b; King (Eq. 17) and c; Nomachi (Eq. 18)

۰/۳۸۵ است اما با توجه به شکل (۶)، برای سرریزهای بررسی شده در این تحقیق توان گفته شده برابر با ۰/۱۶۸۵ می‌شود. بنابراین، هم در شرایط جریان آزاد و هم در شرایط جریان مستغرق عبوردهی سرریزهای بررسی شده در این تحقیق (با $P=0$) بیشتر است تا سرریزهایی با $P>0$.

نتیجه‌گیری

در محدوده پارامترهای ذکر شده، ضریب C_d در سرریز بررسی شده در این تحقیق (با $P=0$) معادل ۰/۶۶۰۲ به دست آمد که این مقدار با آزمایش‌های صحت سنجی نیز تایید شد. در حالیکه بر اساس تحقیقات استریکلند و کینگ برای سرریزهای لبه تیز مثلثی ۹۰ درجه کاملاً یا

با توجه به شکل (۷)، مقدار C_d بر اساس تحقیقات استریکلند، کینگ و نومچی به ترتیب ۰/۵۹۲۶، ۰/۶۰۸۷ و ۰/۶۷۵۹ به دست می‌آید. این مقدار در تحقیق حاضر ۰/۶۶۰۲ به دست آمده است. C_d به دست آمده از رابطه نومچی (رابطه ۱۸) در محدوده P از ۳ میلی‌متر تا ۵ سانتی‌متر حاصل شده به همین دلیل به مقدار C_d به دست آمده در این تحقیق نزدیکتر است. اما در تحقیقات استریکلند و کینگ که راس سرریز در فاصله ۶۰/۹۶ سانتی‌متری از کف کانال نصب شده، مقدار C_d کمتر از مقدار آن در تحقیق حاضر است. در شرایط جریان مستغرق برای سرریزهای کاملاً یا نسبتاً متراکم شده با $P>0$ ، توان طرف دوم رابطه ویلمونت (رابطه ۱۱) معادل

نسبتاً متراکم شده (با P برابر با ۶۰/۹۶ سانتی‌متر) مقدار C_d به‌ترتیب معادل ۰/۵۹۲۶ و ۰/۶۰۸۷ و بر اساس تحقیقات نوماچی (با P از ۰/۰۳ تا ۰/۰۵ متر) معادل ۰/۶۷۵۷ به‌دست می‌آید. بنابراین در شرایط جریان آزاد ضریب‌های دبی به‌دست آمده در این تحقیق بزرگتر از ضریب‌های دبی در سرریزهای متناظر با $P > 0$ هستند. در شرایط جریان مستغرق توان طرف دوم در رابطه ویلمونت در سرریز بررسی شده کمتر از سرریزهای متناظر با $P > 0$ است. از این‌رو هم در شرایط جریان آزاد و هم در شرایط جریان مستغرق قابلیت عبوردهی سرریزهای لبه تیز مثلثی با $P = 0$ بیشتر است تا از سرریزهای با $P > 0$ و دبی‌های بزرگتری را می‌توان انتقال داد. پیشنهاد می‌شود روی سرریزهای لبه تیز مثلثی (با راس هم‌تراز با کف) با زاویه‌های مختلف راس سرریز و نیز تاثیر زبری بستر کانال روی جریان از روی این سرریزها، در کانال‌های بزرگتری تحقیقات انجام شود.

منابع

- Ayaz, M.d. & Mansoor, T. (2018). Discharge coefficient of oblique sharp crested weir for free and submerged flow using trained ANN model. *Water Science*. 32(2). pp. 192-212.
- Babaei, E. Karami, H. & Farzin, S. (2019). Numerical investigation of flow characteristics horizontal sharp edge triangular weir with vertex at downstream. *Journal of irrigation and water engineering*. 9(35). 49-65 (in persian).
- Bagheri, S. & Heidarpour, M. (2010). Flow over rectangular sharp-crested weirs. *Irrigation Science*. 28. pp. 173-179.
- Castro-Orgaz, O. Giraldez, J. & Ayuso, J. L. (2008). Critical flow over circular crested weirs. *Journal of Hydraulic Engineering, ASCE* 134(11). pp. 1661-1664
- Carlier, M. (1980). *Hydraulique générale et appliquée*, Eyrolles.
- Chaudhry, M.H. (2008). *Open-Channel Flow*. Second edition. University of South Carolina.
- Cone, V. M. (1916). Flow through weir notches with thin edges and full contractions. *Journal of Agricultural Research*. 5(23). p. 1051.
- Di Stefano, C. & Ferro, V. (2013). A new approach for deducing the stage-discharge relationship of triangular in plan sharp-crested weirs. *Flow Measurement and Instrumentation*. 32. pp. 71-75
- Diwedat, A. I. Mamdouh L. and Ibrahim, M. M. (2022). Hydraulics of combined triangular sharp crested weir with inverted V-shaped gate. *Alexandria Engineering Journal*. 51(10). 8249-8262
- Hamed, M. H. (2002). *Open channel hydraulics*, Tehran: Khaje Nasir University of technology publishing.
- Henderson, F.M. (1966). *Open Channel Flow*. Macmillan publishing company.
- Igathinathane, C. Srikanth, I. Prakash, K. Ramesh, B. & Womac, A. R. (2007). Development of parabolic weirs for simplified discharge measurement. *Biosystems Engineering*. 96(1). pp.111-119
- Kindsvater, C. E. & Carter, R. W. (1957), Discharge characteristics of rectangular thin-plate weirs: *Am. Soc., Civil Engineers Trans*. 124. p. 772.
- King, H. W. (1916). Flow of water over right-angled V-notch weir. *Univ. Michigan Technic*. (29(3) p. 189
- Lenz, A.T. (1943). Viscosity and surface tension effects on V-notch weir coefficients. *Trans. Am. Soc. Civ. Eng*. 108. pp. 759-782.
- Mahtabi G. & Arvanaghi, H. (2018). Experimental and numerical analysis of flow over a rectangular full-width sharp-crested weir. *Water Science and Engineering*. 11(1). pp. 75-80
- Mohamed Ali, A.A. Ibrahim, M. & Diwedat, A. I. (2015). The Discharge Coefficient for a Compound Sharp Crested V-Notch Weir. *Asian Journal of Engineering and Technology*. 3(5). pp. 494-501.
- Nicosia, A. Di Stefano C. & Ferro, V. (2022). A generalized stage-discharge relationship for sharp-crested power-law weirs by dimensional analysis and self-similarity. *Flow Measurement and Instrumentation*. 86(12). 102200.

- Nicosia, A. Serio, M. A. Costanza. A. Di Stefano, C. & Ferro, V. (2024). The stage-discharge relationship of a sharp-crested triangular weir pierced by square orifices. *Flow Measurement and Instrumentation*. 100.102705.
- Ranga Raju, K.G. (1989). Flow Through Open-Channel. Mc Graw-Hill Company.
- Rezaee, M. Emadi, A. & Aqajani Mazandarani, Q. (2016). Laboratory study overflow rectangular Congress. *Journal of Water and Soil Science*. 29(6).pp.1438-1446.
- Saadatnejadgharahassanlou, H., Gharehbaghi, A. Mehdizadeh, S. Kaya B. & Behmanesh, J. (2017). Experimental investigation of discharge coefficient over novel kind of sharp-crested V-notch weir. *Flow Measurement and Instrumentation*. 54. pp. 236-242.
- Shen, J. (1981). Discharge Characteristics of Triangular-notch Thin-plate Weirs. United States.Geological Survey water-supply. paper ; 1617-B.
- Swamee, P. K. Ojha C. S. P. & Mansoor, T. (2011). Discharge characteristics of skew weirs. *Journal of Hydraulic Research*. 49(6). pp. 818–820.
- Vatankhah A.R. (2010). Flow measurement using circular sharp-crested weirs. *Flow Measurement and Instrumentation*. 21. pp. 118-122.
- Vatankhah, A. R. & Khamisabadi, M. (2019). Stage-discharge relationship for triangular and curved-edge triangular weirs. *Flow Measurement and Instrumentation*. 69. 101609
- Zahiri, A. (2012). Quasi-two dimensional mathematical model for prediction of flow discharge over compound sharp-crested weirs. *Journal of Water and Soil Conservation*. 19(3). pp.27-42 (in Persian).
- Zeinivand, M. Sadat Ahmadi, S. N. & Ghomeshi, M. (2024). The discharge coefficient of sharp triangular weir pierced by orifices. *Flow measurement and Instrumentation*. 97. 102560.