

Variable Height Whirling Weir-VHW Weir: Design and Hydraulic Performance

Shahla Zamani^{1*}, Atefeh Parvaresh Rizi², Salah Kouchakzadeh³

1- Ph.D. Candidate in Water Structures, Irrigation and Reclamation Department, Campus of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran

2- Associate Professor in Water Structures, Irrigation and Reclamation Department, Campus of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran.

3- Professor in Water Structures, Irrigation and Reclamation Department, Campus of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran.

* Sh.zamani@ut.ac.ir

Received: 31 January 2021, Accepted: 5 July 2021  J. Hydraul. Homepage: www.jhyd.iha.ir

Abstract

Introduction: In Water regulation and distribution structures are the main components of any irrigation network. If these structures fail, it has a direct impact on the network performance and water loss. The type and shape of the regulation structure can be effective for better performance of the distribution structure. Studies show that one of the problems in the irrigation networks is due to the mechanism of existing structures. At the present, regulation structures with various shapes are used in the world. Rubicon Water has been working in Australia since 1995 to develop, build and install water regulation and distribution structures. The automated regulation structure of the company, called FlumeGate, has been installed in different countries such as Australia, India, China and the United States. In the present study, the variable height whirling -VHW weir was introduced, designed, and constructed inspired by FlumeGate. The shape, mechanism and installation of this weir are relatively simple. The energy required to change its position is less than other gates. This is an overshoot structure that has a better performance in the face of floating objects. Placing the weir crest at different heights is another advantage over the fixed weirs. By determining the stage-discharge relationship at different angles, it can also be used as a flow measurement structure. The purpose of this study is to determine the stage-discharge relationship of the structure and its discharge coefficient at different openings.

Methodology: The body of variable height whirling weir consists of two quarter circle sections on both sides and a rectangular section on the floor. At full opening, the rectangular section is placed horizontally and provides the maximum cross-sectional area for flow. By whirling the body, this structure acts like a weir and, while regulating the water level, also passes a specified discharge. A flume with a trapezoidal section with a length of 60.5 m was used to investigate the hydraulic behavior of VHW weir. The bottom width of this flume is 0.3 meters, the maximum depth is 0.25 meters, the side slope is 1:1 and the average slope is 0.0009. The VHW weir was installed at a distance of 44.5 meters from the beginning of the canal to create a uniform flow. To collect the required data, different weir openings were investigated in each specified discharge. Data including discharge, upstream water level of weir and angle of weir floor relative to the horizon were recorded. At each stage of the experiment, discharge was recorded by a flowmeter for two minutes and piezometer board was captured via digital

photography. The recorded photos were digitized by Grapher software and the water depth in the all piezometers was determined. For determining the stage-discharge relationship of this structure in free flow condition, hydraulic, power and dimensional analysis methods were used.

Results and Discussion: In the hydraulic method, stage-discharge rating curves were plotted by the upstream water depth of the VHW weir and inlet discharge to the canal at different angles. Then, the discharge coefficient was determined for each opening. By obtaining the discharge coefficient for each opening, a relation can be written for the changes of the discharge coefficient versus the angle. Considering the relationship between the discharge coefficient and the angle, it can be seen that for angles larger than 35 degree, the VHW weir had a different performance compared to the smaller angles. The reason for changing the data trend can be attributed to increase the effect of the weir wall on the flow. In the power method by having the upstream water depth of the VHW weir and the inlet discharge to the canal, it is also possible to obtain a relation for the coefficient C and b versus the angle. In this method, the relationship trend changes at angle of 30 degrees. To generalize the results, the two dimensionless parameters which obtained from Buckingham theorem were plotted. According to the graph and the data trend, the stage-discharge relationship can be divided into two parts. Data up to an angle of 35 degrees follows a trend, so it is rational to use from one relation for angle of 7 to 35 degrees and another relation for angle of 35 to 50 degrees. Based on the statistical parameters, the obtained relationships based on the dimensional analysis gave a better result.

Conclusion: discharge of VHW weir was obtained by three methods: hydraulic, power and dimensional analysis. Comparison of the statistical parameters of these three methods shows that the relationship obtained from the dimensional analysis is almost consistent with the data. The results show that the hydraulic behavior of the weir at angles larger than 35 degrees is different from smaller angles. The main reason for this difference is the effect of the structure body on the flow path.

Keywords: VHW weir, Water level regulation structure, stage-discharge relationship, discharge coefficient.



© 2021 Iranian Hydraulic Association, Tehran, 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/>)

سرریز ارتفاع متغیر چرخان (VHW): طراحی و عملکرد هیدرولیکی

شهلا زمانی^{۱*}، عاطفه پرورش ریزی^۲، صلاح کوچک زاده^۳

۱- دانشجوی دکتری سازه‌های آبی، گروه آبیاری آبادانی، پردیس کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران.

۲- دانشیار سازه‌های آبی، گروه آبیاری آبادانی، پردیس کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران.

۳- استاد سازه‌های آبی، گروه آبیاری آبادانی، پردیس کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران.

* Sh.zamani@ut.ac.ir

دریافت: ۱۳۹۹/۱۱/۱۲، پذیرش: ۱۴۰۰/۰۴/۱۴، وب‌گاه نشریه هیدرولیک: www.jhyd.iha.ir

چکیده: در این تحقیق یک سرریز ارتفاع متغیر چرخان طراحی، احداث و آزمون شد. این سرریز می‌تواند برای تنظیم سطح آب و اندازه‌گیری دبی در کانال‌های روباز به کار رود. از مزایای طرح و شکل هندسی آن انرژی لازم کمتر برای حرکت آن نسبت به سازه‌های مشابه دیگر. بدنه سرریز ارتفاع متغیر چرخان از دو مقطع ربع دایره در طرفین و یک مقطع مستطیل شکل در کف تشکیل شده است. در شرایط بازشدگی کامل، بخش مستطیل شکل بصورت افقی قرار می‌گیرد و حداکثر سطح مقطع برای عبور جریان را فراهم می‌کند. با چرخش بدنه، این سازه مانند یک سرریز عمل می‌کند و ضمن تنظیم سطح آب، دبی معینی را نیز عبور می‌دهد. برای تعیین رابطه دبی-تراز این سازه در جریان آزاد، آزمایش‌هایی انجام شد و از سه روش هیدرولیکی، توانی و آنالیز ابعادی برای تحلیل داده‌ها استفاده شد. شاخص‌های آماری نشان داد که روابط به‌دست آمده از آنالیز ابعادی با متوسط خطای ۴/۴ درصد، نتیجه بهتری ارائه کرد. طبق نتایج، رفتار هیدرولیکی این سرریز در زوایای کمتر از ۳۵ درجه و بیشتر از آن متفاوت است که دلیل آن به اثر تسهیل‌کننده بدنه سازه برای عبور جریان در زوایای بیش از ۳۵ درجه است منسوب شد.

کلید واژگان: سرریز VHW، سازه تنظیم سطح آب، رابطه دبی-اشل، ضریب دبی.

۱- مقدمه

سازه‌های تنظیم و توزیع آب از اجزای اصلی هر شبکه آبیاری هستند که هرگونه ضعف در ساختار این تاسیسات، تاثیر مستقیم بر عملکرد شبکه و هدر رفت آب و در نهایت نارضایتی آب‌بران دارد. تجهیزات ثابت تنظیم سطح آب به دلیل انعطاف‌ناپذیری در برابر تغییر شرایط جریان، در عمل امکان اعمال شیوه‌های مدیریتی را از سیاست‌گذاران سلب می‌کند. از سوی دیگر هر گونه تغییر نابجای جریان توسط تنظیم‌کننده‌ها تأثیر مستقیم بر روی سازه توزیع گذاشته و موجب مختل شدن عملکرد آن می‌شود. از جمله سازه‌های تنظیم سطح آب که به طور معمول در شبکه‌های آبیاری ایران استفاده قرار می‌شوند، عبارت‌اند از:

۱. سازه‌های تنظیم سطح آب مجهز به دریچه خودکار هیدرومکانیکی (دریچه آمیل، آویس و آویو).
۲. سازه‌های تنظیم سطح آب با سرریز ثابت که اغلب به صورت سرریز نوک اردکی و یا سرریز مورب طراحی و اجرا می‌شوند.

۳. سازه‌های تنظیم سطح آب مجهز به دریچه‌های قطاعی، کشویی و یا تیرک آب‌بند که به روش دستی یا به وسیله تجهیزات بالابر موتوری باز و بسته می‌شوند (Amiri Tokaldany and Siah, 2008).

با وجود اینکه عملکرد دریچه‌های هیدرومکانیکی در شرایط بهره‌برداری قابل اعتماد به نظر می‌رسد، اما بررسی‌ها نشان می‌دهد که بخشی از مسئله‌های موجود در شبکه‌های آبیاری ناشی از سازوکار این دریچه‌ها است. این دریچه‌ها باید به ازای دبی مشخص، در طول فصل بهره‌برداری تنظیم شوند. در نتیجه این دریچه‌ها انعطاف‌پذیری لازم را نسبت به تغییرها در طول دوره بهره‌برداری ندارند. در برخی موارد عملکرد این دریچه‌ها توسط کشاورزان مختل می‌شود و آنان با دست‌کاری از تنظیم خودکار تراز سطح آب جلوگیری می‌کنند. همچنین به علت‌هایی از جمله هزینه‌های بالای احداث، نیاز به تجهیزات خاص، ثابت بودن نقطه هدف و تغییر مقطع کانال در محل سازه، ممکن است

غربی کالیفرنیا اجرا شده است، نیروی زیادی برای به حرکت در آوردن صفحه‌ها نیاز است (Wahlin and Zimbelman, 2014). اما دریچه‌های سالونی^۴ به صورت دو دروازه به دیواره‌ی مستطیلی در امتداد کانال لولا می‌شود. دریچه در امتداد جریان باز شده و با تغییر بازشدگی، امکان تنظیم ارتفاع آب برای دبی‌های متفاوت در بالادست دریچه فراهم می‌شود. نمونه‌هایی از این دریچه در شبکه آبیاری جنوب سن یواخین کالیفرنیا در آمریکا نصب شده است، ولی هنوز از این نوع دریچه‌ها به طور گسترده استفاده نشده است (Wahlin and Zimbelman, 2014). Naghaei and Monem (2016) دریچه سالونی را در نرم افزار هیدرودینامیک ICSS مدل کردند. نتایج ناشی از این مدل با داده‌های ثبت شده از نمونه آزمایشگاهی مقایسه شد (Naghaei and Monem, 2016). Marashi et al. (2020) برای اندازه‌گیری و کنترل جریان در آبراهه‌های کوچک که به طور معمول مقطع نیم‌بیضی یا نیم‌دایره دارند سازه جدیدی به نام دریچه دوار^۵ معرفی کردند. در این تحقیق عملکرد هیدرولیکی این دریچه و تأثیر متغیرهای دبی جریان و زاویه بازشدگی دریچه دوار بر عمق جریان در یک کانال نیم‌دایره‌ای بررسی و روش‌هایی برای محاسبه دبی جریان عبوری از دریچه بر مبنای معادله‌های دبی-تراز و معادله‌های پایه‌ای در شرایط جریان آزاد و مستغرق ارائه شد (Marashi et al., 2020). Rubicon Water (1995) در استرالیا برای توسعه، ساخت و نصب سازه‌های تنظیم و توزیع آب آغاز به کار کرد و تا سال ۲۰۰۸ بیش از ۲۵۰۰ عدد از دریچه‌های تنظیم و توزیع که تولید این شرکت بودند در بیش از ۱۰۰۰ کیلومتر از کانال‌های آبیاری در کشور استرالیا نصب شدند. سازه تنظیم خودکار این شرکت موسوم به فلوم گیت^۶ در کشورهای مختلفی چون استرالیا، هند، چین و ایالات متحده آمریکا نصب شده است.

برای بهبود مدیریت بهره‌برداری، لازم است اندازه‌گیری جریان در نقطه‌هایی از شبکه که در تصمیم‌های مدیریتی تأثیرگذار هستند، انجام شود (Clemmens et al., 2001). بنابراین نوع سازه و دقت اندازه‌گیری جریان عبوری اهمیت زیادی دارد. در این تحقیق سرریز ارتفاع متغیر چرخان-VHW^۷ با الهام از سازه

دیگر سازه‌ها ترجیح داده شوند. سرریزهای ثابت به رغم تنظیم تراز سطح آب، به دلیل مسئله‌های بهره‌برداری از جمله ترسیب در بالادست سازه و همچنین انعطاف‌ناپذیری لازم در طول فصل بهره‌برداری، دارای کارایی لازم و موثر در شبکه‌های آبیاری نیستند (Nikmehr, 2016).

نوع و شکل سازه تنظیم برای عبور جریان و عملکرد بهتر سازه توزیع می‌تواند مؤثر باشد. در حال حاضر سازه‌های تنظیم با شکل‌های متنوعی در جاهای مختلف جهان استفاده می‌شوند. یکی از انواع این دریچه‌ها آرمتهک نام دارد. دریچه روگذر آرمتهک^۱ از یک صفحه فولادی تشکیل شده که بین دو دیواره سخت قرار گرفته و از کف لولا می‌شود. هنگامی که دریچه کامل باز است این صفحه به صورت افقی قرار می‌گیرد. دریچه (صفحه فولادی) به وسیله دو کابل که در انتهای پایین‌دست صفحه ثابت شده‌اند باز و بسته می‌شود. (Wahlin and Replogle, 1994) این دریچه را به عنوان یک سازه روگذر معرفی کرده و با ساخت یک نمونه آزمایشگاهی، عملکرد هیدرولیکی آن را بررسی کردند (Wahlin and Replogle, 1994). این نوع از دریچه‌ها در شبکه آبیاری امپریال کالیفرنیا در آمریکا نصب شده‌اند (Wahlin and Zimbelman, 2014).

دریچه‌های آبرمیر^۲ نوع دیگری از سرریزهای متحرک هستند که اغلب برای کنترل سطح آب رودخانه‌ها و سرریزهای سد به کار می‌روند. میزان بازشدگی این دریچه‌ها به وسیله کیسه‌های هوایی که در پایین‌دست آنها نصب شده است تغییر می‌کند. نمونه‌ای از این دریچه‌ها در شبکه آبیاری روخانه والکر نوادا در آمریکا اجرا شده است. در بعضی از پروژه‌ها کنترل دقیق میزان بازشدگی این نوع از دریچه‌ها با مشکل روبه‌رو است (Wahlin and Zimbelman, 2014). دریچه لانگمن^۳ شامل دو صفحه است که در وسط به هم لولا شده‌اند. صفحه زیرین در کف لولا شده و این مجموعه به صورت آکاردئونی باز و بسته می‌شود. حرکت تاج سرریز به صورت عمودی و در مسیر دو عدد ریل که در دیواره‌های کناری آن تعبیه شده است انجام می‌شود. در وضعیت بازشدگی کامل دو صفحه به صورت افقی روی هم قرار می‌گیرند. در این نوع از سرریزها که نمونه‌هایی از آن در کانال

⁵ Rotary Gate

⁶ Flume Gate

⁷ Variable Height Whirling Weir

¹ Armtec Overshot Gate

² Obermeyer Gate

³ Langemann Gate

⁴ Lopac Gate

این سازه است. در مرحله‌های ساخت بدنه سرریز، مواد مختلفی مانند ورق‌های چند لایه آلومینیوم، پلکسی گلس و فولاد بررسی شد و در نهایت از فولاد گالوانیزه استفاده شد. شکل‌پذیری مناسب، مقاومت در برابر خوردگی و آسانی الحاق قطعه‌های مختلف به بدنه از جمله برتری‌های بدنه انتخاب شده است. در شکل ۱ نمای کلی این سازه ارائه شده است.

بدنه این سازه متشکل است از دو مقطع ربع دایره با شعاع ۲۵ سانتی‌متر در طرفین، و یک مقطع مستطیل شکل با عرض ۲۴/۵ سانتی‌متر که در کف قرار دارد. در شرایط بازشدگی کامل، بخش مستطیل شکل به صورت افقی قرار می‌گیرد و بیشترین سطح مقطع برای عبور جریان در این وضعیت فراهم می‌شود. نیروی مورد نیاز برای باز و بسته شدن سرریز گرچه می‌تواند به صورت دستی هم تأمین شود ولی در این تحقیق به کمک یک موتور الکتریکی تأمین شد. وجود موتور الکتریکی برنامه‌ریزی خودکار و دقیق برای مانور سرریز را امکان‌پذیر می‌سازد. انتقال قدرت از موتور به سرریز، توسط یک شفت مرکزی هم محور با موتور، دو عدد قرقره و کابل انجام می‌شود. پیوسته بودن بازه مورد استفاده، احتمال خوردگی کمتر و دقت بالا از جمله برتری‌های این سازوکار نسبت به دیگر روش‌های انتقال قدرت مانند چرخ‌دنده است. به این ترتیب با کمک یک موتور الکتریکی این سازه قادر خواهد بود حول محور اصلی خود (پاشنه سازه) بچرخد. با چرخش بدنه و قرار گرفتن در بازشدگی‌های مختلف، این سازه مانند یک سرریز عمل می‌کند و ضمن تنظیم سطح آب، امکان عبور دبی معینی را فراهم می‌کند.

سرریز VHW که با الهام از فلوم‌گیت ساخته شده است دارای چند وجه تمایز با این سازه است. جنس بدنه، برنامه تهیه شده برای خودکارسازی و روش کنترل، شیوه نصب در کانال و امکان تعیین رابطه‌های دبی-تراز از جمله تفاوت‌های این دو سازه است. این سرریز با قابلیت تغییر ارتفاع، می‌تواند تراز مورد نظر را برای هدف‌های مختلف در فصل بهره‌برداری از کانال تأمین کند؛ ضمن اینکه می‌توان آن را برای برنامه‌های کنترل خودکار تجهیز کرد.

۲-۲- ثابت داده‌ها

برای بررسی رفتار هیدرولیکی سرریز VHW، از یک فلوم آزمایشگاهی با مقطع دوزنقه‌ای به طول ۶۰/۵ متر استفاده شد.

تنظیم فلوم‌گیت، معرفی، طراحی و ساخته شد. شکل، سازوکار و روش نصب سرریز VHW به نسبت ساده است. انرژی مورد نیاز برای تغییر وضعیت آن نسبت به سایر دریچه‌ها (مثل تغییر بازشدگی دریچه کشویی و قطاعی) کمتر است. همچنین سازه پیشنهادی به عنوان سازه روگذر طبقه بندی می‌شود که در مقابله با اجسام شناور عملکرد مناسب‌تری نسبت به دریچه‌های زیرگذر دارند. قرارگیری تاج سرریز در ارتفاع‌های مختلف برتری دیگر آن نسبت به سرریزهای ثابت است. به عبارت دیگر در دامنه مختلفی از دبی‌ها در کانال می‌توانند عمل کنند و دقت خوبی داشته باشند.

به طور کلی سرعت، تخریب و تغییر وضعیت دستی دریچه‌ها از جمله مسئله‌های متداول در بهره‌برداری از شبکه‌های آبیاری است که سرریز VHW نیز از آن مستثنی نیست. سرریزهایی که در شبکه‌های آبیاری به عنوان سازه تنظیم (سرریزهای ثابت، لبه تیز و لبه پهن) استفاده می‌شوند تنها در یک ارتفاع قرار می‌گیرند و انعطاف‌پذیری لازم برای تنظیم سطح آب را ندارند ولی این سازه با توجه به اینکه می‌تواند در ارتفاع دلخواه تنظیم شود قابلیت مناسبی برای تنظیم سطح آب بالادست خود دارد. به ویژه که می‌توان این تنظیم ارتفاع را از حالت دستی به حالت خودکار تبدیل کرد. به طوری که با تعیین عمق هدف در بالادست سرریز، این عمق همواره و با کمترین ایجاد آشفستگی، در محدوده گسترده‌ای از دبی‌ها، در کانال تأمین شود. همچنین با تعیین رابطه‌های دبی-تراز (که در سرریزهای همانند آن مانند فلوم‌گیت هم ارائه نشده است) در زاویه‌های مختلف، می‌توان آن را به عنوان سازه اندازه‌گیری جریان نیز به کار برد. با این فرضیه‌ها، بررسی‌های آزمایشگاهی در آزمایشگاه تحقیقات آب دانشگاه تهران برای نصب، آزمون و بررسی عملکرد هیدرولیکی این سازه انجام شد. هدف از انجام این بررسی‌ها معرفی یک سازه تنظیم جدید، ارائه رابطه‌های دبی-تراز سازه و تعیین ضریب آنگذری (ضریب دبی) آن در بازشدگی‌های مختلف است.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- تجزیه و تحلیل ابعادی

برای طراحی و ساخت نمونه آزمایشگاهی سرریز VHW بررسی‌های زیادی صورت گرفت. شکل و عملکرد ساده، قابلیت تغییر ارتفاع و قابلیت خودکارسازی از جمله علت‌های انتخاب

عرض کف این فلوم ۰/۳ متر، عمق بیشینه ۰/۲۵ متر، شیب جانبی ۱:۱ و میانگین شیب کف ۰/۰۰۰۹ است. سرریز VHW در فاصله ۴۴/۵ متری از ابتدای کانال نصب شد تا امکان ایجاد جریان یکنواخت فراهم شود. برای تأمین آب مورد نیاز، در ابتدای مجموعه آزمایشگاهی یک مخزن تغذیه کننده وجود دارد. ذخیره آب خروجی از کانال اصلی به کمک یک مخزن در انتهای کانال انجام می‌شود. آب ذخیره شده در این مخزن توسط پمپ به مخزن تغذیه باز می‌شود. شکل ۲ نمای کلی مجموعه آزمایشگاهی را نشان می‌دهد.

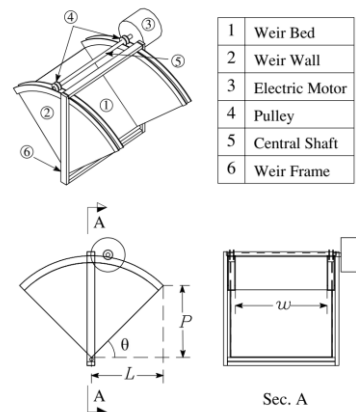


Fig. 1 Schematic view of VHW weir
شکل ۱ نمای کلی سرریز VHW

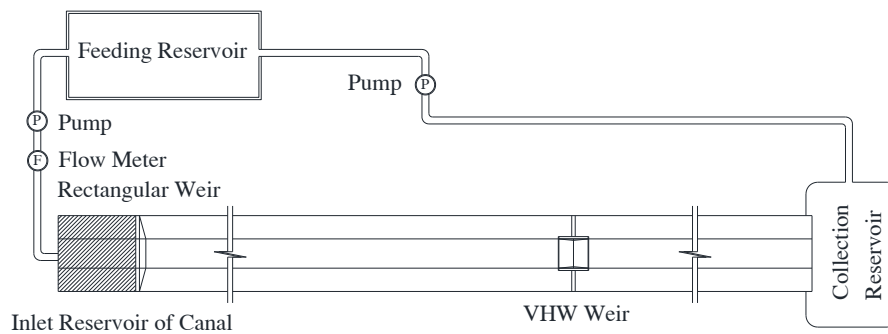


Fig. 2 Schematic view of the experimental setup
شکل ۲ نمای کلی مجموعه آزمایشگاهی

نسبت به افق قرار گرفته و ثبت داده‌ها انجام شد. جدول ۱ محدوده داده‌های اندازه‌گیری شده را نشان می‌دهد. در هر مرحله‌ی آزمایش، پس از به تعادل رسیدن سطح آب در پیژومترها (رسیدن جریان به شرایط ماندگار)، میزان دبی در مدت دو دقیقه به وسیله جریان سنج^۱ ثبت شد و عکس‌برداری از صفحه پیژومتر انجام شد. عکس‌های ثبت شده از صفحه

برای برداشت داده‌های مورد نیاز، در هر دبی مشخص، بازشدگی‌های مختلف سرریز بررسی شد و داده‌ها شامل دبی، ارتفاع آب در بالادست سرریز و زاویه کف سرریز نسبت به افق (θ) ثبت شد. با توجه به شرایط ساخت و نصب سرریز، کمترین زاویه θ در این تحقیق ۷ درجه است. در دبی‌های مختلف، سرریز در زاویه‌های ۷، ۱۰، ۱۵، ۲۰، ۲۵، ۳۰، ۳۵، ۴۰، ۴۵ و ۵۰ درجه

جدول ۱ محدوده داده‌های اندازه‌گیری شده

Table 1 Measured data range

Angle of Weir Floor Relative to the Horizon (Degree)	Discharge Range (lit/s)	Range of Water Height on the Weir Crest (cm)	Number of Tests
50	0.8-3	3-14	17
45	0.5-4.4	2.8-13.6	17
40	0.8-8	2.7-13.1	17
35	2.7-12.4	2.4-12.3	16
30	2.8-16.6	2.6-10.6	12
25	2.9-20.2	2.4-9	9
20	2.9-25	2.1-7.6	6
15	3-25.9	0.3-5.2	5
10	3.1-26	0.3-3.1	5
7	3.1-26	0.4-2.5	5

¹ Flowmeter

ورودی آب به سازه تا تاج آن را با متغیر L نشان داده شد. با محاسبه نسبت L/h در زاویه‌ها و دبی‌های مختلف مشخص شد که این سازه در دبی‌های کمتر از ۱۳ لیتر بر ثانیه همانند سرریز لبه پهن عمل می‌کند و در دیگر موارد این سازه نه در محدوده لبه پهن و نه لبه تیز قرار می‌گیرد. جدول ۲ وضعیت سرریز را با توجه به تعریف (Henderson, 1966) از سرریزهای لبه پهن و لبه تیز، نشان می‌دهد.

با بررسی نسبت L/h ، مشخص شد که در $37/6$ درصد برداشت‌های انجام شده، این سازه عملکردی همانند سرریزهای لبه پهن دارد. ولی به دلیل شیب دار و متغیر بودن کف سازه، نمی‌توان آن را از نظر ضریب دبی یا متغیرهای دیگر با سرریزهای لبه پهن مقایسه کرد. همچنین این سازه به دلیل متحرک بودن و قرارگیری تاج آن در ارتفاع‌های مختلف قابل مقایسه با سرریزهای لبه پهن نیست.

پیزومتر با استفاده از نرم‌افزار گرافر رقومی شده و عمق آب در پیزومتر مشخص شد. این شیوه ثبت داده‌ها امکان خواندن پیزومترها را با دقت یک صدم میلی‌متر فراهم کرد. برای بررسی رابطه‌های هیدرولیکی سرریز VHW باید عمق آب بالادست سرریز در فاصله‌ای مناسب اندازه‌گیری شود. این عمق می‌بایست در نقطه‌ای اندازه‌گیری می‌شد که تحت تاثیر برگشت آب در بالادست سازه و دیواره‌های جانبی قرار نداشته و بیش از حد از سرریز فاصله نگیرد. بنابراین عمق آب روی پیزومتری که در فاصله ۵۹ سانتی متری از مقطع نصب سازه است، معیار اندازه‌گیری عمق آب بالادست سرریز VHW قرار گرفت. در سرریزهای لبه پهن و لبه تیز اگر طول سرریز را در راستای جریان L و عمق آب بالای تاج سرریز را h در نظر بگیریم، در سرریزهای لبه پهن نسبت $L/h=3\sim34$ است و در سرریزهای لبه تیز نسبت $L/h<0.07$ است (Henderson, 1966). در سرریز VHW طول سرریز در راستای جریان یا همان فاصله افقی

جدول ۲ وضعیت سرریز VHW بنابر تعریف سرریزهای لبه پهن و لبه تیز (هندرسون، ۱۹۶۶)

Table 2 VHW weir status according to the definition of board-crested and sharp-crested weirs (Henderson, 1966)

Discharge Range (lit/s)	Angle Range(Degree)	L/h	VHW Weir Status
2.7-13	7, 10, 15, 20, 25, 30, 35	3-34	Board-Crested Weir
1.1-8	40, 45, 50	3-34	Board-Crested Weir
13-26	7, 10, 15, 20, 25, 30, 35	1.8-3	Not Sharp-Crested Weir
<1.1	40, 45, 50	>34	Not Board-Crested Weir

با ارتفاع متغیر است و در هر بازشدگی ارتفاع سرریز متفاوت است.

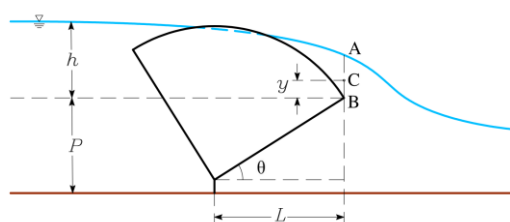


Fig. 3 Variables used in VHW weir

شکل ۳ متغیرهای به کار رفته در سرریز VHW

به دلیل مشخص نبودن جای دقیق تشکیل عمق بحرانی، استفاده از مفهوم عمق بحرانی در روی سرریز قابل استفاده نبود. برای محاسبه دبی عبوری از روی سازه فرضیه‌های زیر در نظر گرفته شد:

۲-۳- تعیین رابطه‌های دبی - تراز ($Q-h$)

برای بهبود مدیریت توزیع آب در شبکه‌های آبیاری، تعیین دبی عبوری از سازه‌های موجود دارای اهمیت بالایی است. بنابراین برای استخراج رابطه‌های حاکم از روش‌های متداولی مانند دبی-تراز و تحلیل ابعادی استفاده می‌شود. در روش دبی-تراز، دبی عبوری از سازه با عمق بالادست سازه رابطه توانی دارند که در ادامه این روش در قالب دو رابطه هیدرولیکی و توانی آمده است.

الف- رابطه هیدرولیکی

همان‌طور که در شکل ۳ نشان داده شده است سرریز VHW در کف لولا شده و زاویه کف آن با افق قابل تنظیم است. با توجه به عبور آب از روی تاج، این سازه همانند یک سرریز عمل می‌کند. در واقع سرریز VHW همان‌طور که از نام آن پیداست یک سرریز

برداشت شده است، که با برازش منحنی و استفاده از رابطه (۶) می‌توان ضریب C را به دست آورد.

ب- رابطه توانی

برای اعمال تأثیر شکل سازه اندازه‌گیری، بهتر است ضریب‌های بیشتری برای رابطه (۶) در نظر گرفت. برای این کار در این رابطه توان h نیز متغیر در نظر گرفته شد و رابطه به صورت زیر اصلاح شد:

$$Q = C(w - 0.2h)h^b \quad (7)$$

در این روش نیز با استفاده از داده‌های Q و h می‌توان رابطه‌ای برای به دست آوردن ضریب C بر حسب θ و همچنین b بر حسب θ ارائه داد.

پ- تحلیل ابعادی

با استفاده از تحلیل ابعادی می‌توان شمار و پیچیدگی‌های متغیرهای آزمایشگاهی را که روی پدیده فیزیکی تأثیر می‌گذارند را کم کرد. با این روش می‌توان بعضی از متغیرها را حذف کرد که در فرایند برداشت داده‌ها سودمند است. همچنین این روش رابطه بین متغیرها را روشن می‌کند و به نتایج به دست آمده جامعیت می‌دهد (White, 2001).

عامل‌های موثر بر پدیده را می‌توان دبی عبوری از سازه (Q)، اختلاف رقوم سطح آب و تراز تاج سرریز (h)، شتاب ثقلی (g)، عرض سازه (w)، اختلاف رقوم تاج سرریز و کف کانال (P)، فاصله افقی ورودی آب به سازه تا تاج آن (L)، لزجت دینامیکی آب (μ) و زاویه کف سرریز نسبت به افق ($\sin\theta$) در نظر گرفت که در رابطه تابعی (۸) ارائه شده است.

$$F(Q, h, g, w, P, L, \mu, \sin\theta) = 0 \quad (8)$$

با در نظر گرفتن h ، Q ، و μ به عنوان متغیرهای تکرار شونده پنج عدد بی‌بعد زیر به دست می‌آید:

$$\Pi_1 = \sin\theta, \quad \Pi_2 = \frac{Q}{h^{2.5}\sqrt{g}}, \quad \Pi_3 = \frac{w}{h}, \quad \Pi_4 = \frac{P}{h}, \quad \Pi_5 = \frac{L}{h}$$

از آنجایی که w در همه‌ی بازشدگی‌ها میزان ثابتی (۲۴/۵) سانتی‌متر) است، پس عدد بی‌بعد w/h نادیده گرفته می‌شود. همچنین تأثیر P در عدد بی‌بعد $\sin\theta$ دیده شده است؛ پس از عدد بی‌بعد P/h نیز صرف‌نظر می‌شود. در نتیجه رابطه ۹ برقرار است:

$$F\left(\frac{Q}{h^{2.5}\sqrt{g}}, \frac{L}{h}, \sin\theta\right) = 0 \quad (9)$$

• ارتفاع آب در روی تاج سازه همان h باقی‌مانده و انقباض و کاهش عمقی وجود ندارد (Bos, 1989).

• جهت جریان در روی سازه هم‌راستا با کف کانال است (Bos, 1989).

• فشار در همه مقطع روی تاج سازه همان فشار اتمسفریک است (Chaudhry, 2008. Henderson,) (1966).

با توجه به فرضیه‌های بالا و استفاده از رابطه $y=V^2/2g$ در نقطه‌ای مانند C در مقطع AB ، دبی عبوری از سرریز به دست می‌آید:

$$Q = wq = w \int_0^h v dy = w \sqrt{2g} \int_0^h y^{0.5} dy \quad (1)$$

$$Q = \frac{2}{3} \sqrt{2g} w h^{1.5} \quad (2)$$

در رابطه‌های (۱) و (۲) w عرض سرریز (۲۴/۵ سانتی‌متر)، q دبی در واحد عرض، h اختلاف رقوم سطح آب و تراز تاج سرریز، g شتاب ثقل و y ارتفاع آب روی تاج سرریز است. برای دخالت عامل‌هایی که در پدیده موثراند اما در استخراج رابطه وارد نشده‌اند مانند تأثیر شکل و نوع سازه اندازه‌گیری، ضریب بده در رابطه بالا وارد می‌شود:

$$Q = \frac{2}{3} \sqrt{2g} C_d w h^{1.5} \quad (3)$$

$$C = \frac{2}{3} \sqrt{2g} C_d \quad (4)$$

با توجه به رابطه (۳) و (۴) برای محاسبه میزان دبی می‌توان رابطه زیر را ارائه داد:

$$Q = C w h^{1.5} \quad (5)$$

که در آن w عرض موثر سازه است. از آنجا که عرض سرریز از عرض کانال کمتر است، جریان سه بعدی شکل گرفته باعث می‌شود طول موثر سازه (که امکان عبور آب را میسر می‌سازد) از طول واقعی آن کمتر باشد. در این حالت رابطه دبی-تراز به صورت زیر است (Francis, 1883):

$$Q = C(w - 0.2h)h^{1.5} \quad (6)$$

با استفاده از داده‌های ثبت شده در آزمایش‌ها می‌توان ضریب دبی سرریز را به دست آورد. برای هر بازشدگی داده‌های Q و h

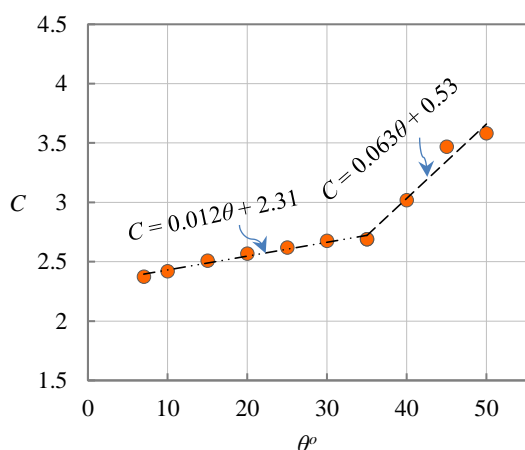


Fig. 4 Variation of discharge coefficient versus various openings

شکل ۴ تغییرات ضریب دبی نسبت به بازشدگی‌های مختلف

$$\begin{cases} Q = (0.012\theta + 2.31)(w - 0.2h)h^{1.5} & \text{for } \theta \leq 35^\circ \\ Q = (0.063\theta + 0.53)(w - 0.2h)h^{1.5} & \text{for } \theta > 35^\circ \end{cases} \quad (11)$$

ب- رابطه توانی

با توجه به رابطه (۷) و با در دست داشتن عمق آب بالادست سرریز VHW و دبی ورودی به کانال می‌توان رابطه‌ای برای ضریب C و b نسبت به زاویه سرریز بدست آورد. شکل ۵ این تغییرات را نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل ۵ مشاهده می‌شود رابطه بین ضریب‌ها و زاویه سرریز برای زاویه‌های کمتر از ۳۰ درجه از یک رابطه پیروی می‌کند در حالی که این روند برای زاویه‌های بیشتر از ۳۰ درجه متفاوت است. از این رو معادله دبی-تراز به صورت زیر خواهد بود:

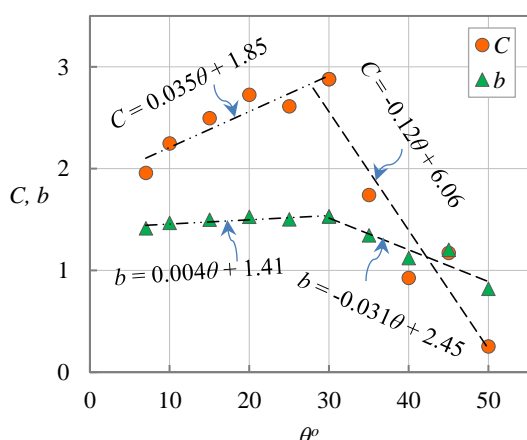


Fig. 5 Variation of discharge coefficient and power of stage-discharge equation versus various openings

شکل ۵ تغییرات ضریب و توان معادله دبی-تراز نسبت به بازشدگی‌های مختلف

که با در نظر گرفتن رابطه زیر می‌توان یک معادله واحد برای سرریز به دست آورد:

$$\frac{Q}{h^{2.5} \sqrt{g}} = C(\sin \theta)^a \left(\frac{L}{h}\right)^b \quad (10)$$

با تعیین ضریب‌های C ، a و b می‌توان یک رابطه مشخص مبتنی بر داده‌ها به دست آورد.

۳- نتایج

۳-۱- تعیین رابطه‌های دبی-تراز ($Q-h$)

برای استفاده از هر سازه تنظیم یا اندازه‌گیری جریان، به رابطه‌های بین دبی و تراز آب در مجاورت سازه نیاز است. در این تحقیق تعیین دبی عبوری از سرریز VHW با استفاده از رابطه‌های هیدرولیکی حاکم بر آن، با استفاده از رابطه توانی و همچنین به کمک تحلیل ابعادی انجام شد و نتیجه حاصل از هر روش ارزیابی شد.

الف- رابطه هیدرولیکی

برای تعیین دبی عبوری از سرریز VHW از رابطه (۶) استفاده شد. با اندازه‌گیری عمق آب بالادست سرریز VHW و دبی ورودی به کانال در زاویه‌های مختلف، منحنی‌های دبی-تراز ترسیم شد تا با استفاده از آن بتوان ضریب C را برای هر بازشدگی تعیین کرد. با به دست آوردن ضریب دبی برای هر بازشدگی، همان‌طور که در شکل ۴ مشاهده می‌شود می‌توان رابطه‌ای برای تغییرات ضریب دبی نسبت به زاویه نوشت. رابطه بین ضریب دبی و زاویه سرریز برای زاویه‌های کمتر از ۳۵ از یک روند مشخصی پیروی می‌کند در حالی که روند تغییرات ضریب دبی برای زاویه‌های بیشتر از ۳۵ درجه متفاوت است. علت تغییر روند داده‌ها در شکل ۴ را به افزایش تاثیر دیواره سرریز بر جریان عبوری بالادست منسوب کرد. یعنی در زاویه‌های بیشتر از ۳۵ درجه دیواره سرریز وارد میدان جریان عبوری بالادست شده و به شکلی هادی عبور جریان مرکز کانال از روی سرریز می‌شود. بنابراین در این زاویه‌ها ضریب دبی افزایش می‌یابد.

این نشان می‌دهد که عملکرد سرریز در زاویه‌های کمتر از ۳۵ درجه و بیشتر از آن متفاوت است که با تفکیک زاویه، معادله دبی-تراز با استفاده از داده‌های برداشت شده به صورت زیر خواهد بود:

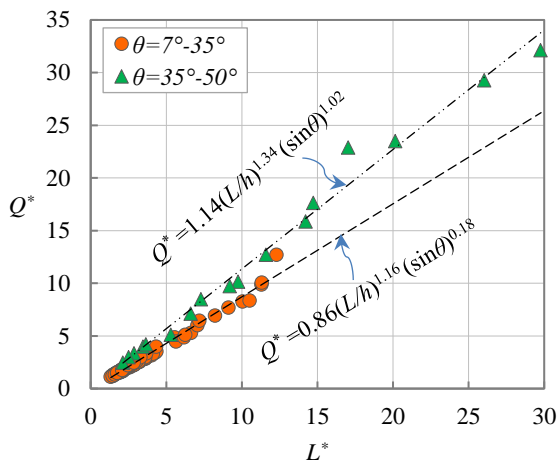


Fig. 7 Variation of relative discharge and relative opening variables

شکل ۷ تغییرات متغیرهای دبی نسبی و بازشدگی نسبی

$$Q^* = \frac{Q}{h^{2.5}\sqrt{g}} \quad (14)$$

$$L^* = (\sin \theta)^a \left(\frac{L}{h}\right)^b \quad (15)$$

در شکل ۷ تغییرات دبی نسبی (Q^*) به ازای بازشدگی نسبی (L^*) دیده می‌شود که با برازش دو خط روی داده‌ها می‌توان ضریب‌های a و b را به دست آورد.

$$\begin{cases} Q = 0.86\sqrt{g} \sin^{0.18} \theta h^{2.5} \left(\frac{L}{h}\right)^{1.16} & \text{for } \theta < 35^\circ \\ Q = 1.14\sqrt{g} \sin^{1.02} \theta h^{2.5} \left(\frac{L}{h}\right)^{1.34} & \text{for } \theta \geq 35^\circ \end{cases} \quad (16)$$

با مقایسه دو رابطه مشخص می‌شود که در زاویه‌های بیشتر از ۳۵ درجه توان عدد بی‌بعد L/h و ضریب دبی بیشتر است. در این زاویه‌ها دیواره سرریز وارد میدان جریان عبوری بالادست شده و به شکلی هادی عبور جریان مرکز کانال از روی سرریز می‌شود. در زاویه‌های کمتر از ۳۵ درجه وجود دیواره‌های مثلثی، مانعی در مقابل جریان می‌شود که عبور آن را سخت‌تر می‌کند.

۳-۲- مقایسه روش‌های تعیین دبی سرریز

برای بررسی خطای بین دبی مشاهده شده (Q_o) و دبی محاسبه شده (Q_c) هر روش از شاخص‌های آماری پر کاربرد استفاده شده است. این شاخص‌ها عبارت‌اند از میانگین خطای نسبی^۱، مجذور

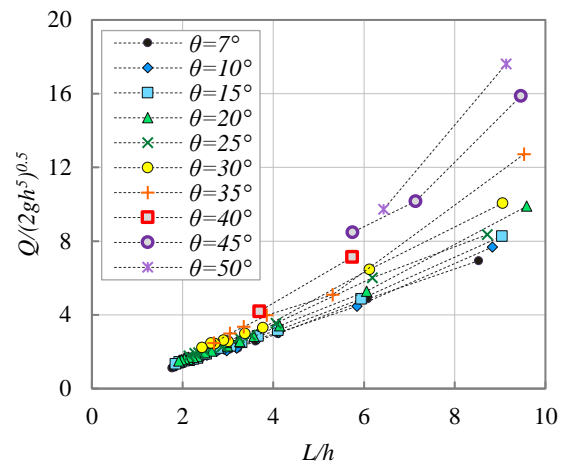


Fig. 6 Variation of dimensionless numbers in various openings

شکل ۶ تغییرات اعداد بی‌بعد در بازشدگی‌های مختلف

$$\begin{cases} Q = C(w-0.2h)h^b & \text{for } \theta \leq 30^\circ \\ C = 0.035\theta + 1.85, b = 0.004\theta + 1.41 \\ Q = C(w-0.2h)h^b & \text{for } \theta > 30^\circ \\ C = -0.12\theta + 6.06, b = -0.031\theta + 2.45 \end{cases} \quad (12)$$

پ- تحلیل ابعادی

برای تعمیم نتایج، از اعداد بی‌بعد که در بخش تحلیل ابعادی به‌دست آمد استفاده شده است (رابطه ۱۰). در شکل ۶ دو عدد بی‌بعد $Q/(h^{2.5}\sqrt{2g})$ و L/h در بازشدگی‌های مختلف در مقابل هم ترسیم شده‌اند.

این نمودار نشان می‌دهد که برای هر بازشدگی، با در دست داشتن عمق آب بالادست سرریز می‌توان دبی عبوری از آن را محاسبه کرد. با توجه به گردآوری و تنظیم داده‌ها برای به دست آوردن رابطه دبی-تراز می‌توان زاویه‌ها را دسته‌بندی کرد. بنابر شکل ۶ داده‌ها تا زاویه ۳۵ درجه از یک روند پیروی می‌کنند، پس بهتر است از زاویه ۷ تا ۳۵ درجه از یک رابطه و از ۳۵ تا ۵۰ درجه از رابطه‌ای دیگر استفاده شود.

برای درک بهتر این مسئله، رابطه (۱۰) به صورت زیر نوشته شد:

$$Q^* = CL^* \quad (13)$$

که در این رابطه دو متغیر دبی نسبی Q^* و بازشدگی نسبی L^* در نظر گرفته شده است.

¹ Average Relative Error

ابعادی نسبت به دو روش دیگر خطای کمتری دارد. از رابطه‌های این روش می‌توان در مدل‌های هیدرودینامیک و کنترل خودکار سرریز که نیاز به دقت بالاتری دارد، استفاده کرد. همچنین به دلیل داشتن رابطه‌های کوتاه‌تر، می‌توان برای برآورد اولیه دبی عبوری از سرریز استفاده کرد. با مقایسه شاخص‌ها می‌توان نتیجه گرفت درستی بیشتری در رابطه هیدرولیکی نسبت به رابطه توانی وجود دارد. این موضوع را می‌توان با مقایسه رابطه‌های دبی-تراز در سه روش متوجه شد. در دو روش رابطه هیدرولیکی و تحلیل ابعادی زاویه‌ای که رابطه‌ها را جدا می‌کند ۳۵ درجه است ولی در رابطه توانی در ۳۰ درجه رخ می‌دهد. همچنین در رابطه توانی برای زاویه‌های بیشتر از ۳۰ درجه برازش خوبی برای ضریب C و b نسبت به زاویه دیده نشد. بنابراین بهترین روش برای تعیین دبی این سازه رابطه‌های به دست آمده از روش تحلیل ابعادی و روش رابطه هیدرولیکی است.

میانگین مربعات خطا^۱، خطای استاندارد^۲ و مجذور میانگین مربعات خطای نرمال^۳، و روابط آنها در زیر آمده است:

$$Error = \frac{\sum \left| \frac{Q_o - Q_c}{Q_o} \right|}{N} \times 100 \quad (17)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum (Q_o - Q_c)^2}{N - 1}} \quad (18)$$

$$SE = \frac{RMSE}{\bar{Q}_o} \times 100 \quad (19)$$

$$NRMSE = \frac{RMSE}{Q_{o_max} - Q_{o_min}} \times 100 \quad (20)$$

با مقایسه شاخص‌های آماری که در جدول ۳ ارائه شده است، می‌توان نتیجه گرفت که تعیین دبی با استفاده از روش تحلیل

جدول ۳ شاخص‌های آماری برای محاسبه دبی سرریز

Table 3 Statistical indices for calculating weir discharge

	ARE(%)	RMSE(cms)	SE(%)	NRMSE(%)
Hydraulic Relationship	11.59	0.0005	8.54	5.85
Power Relationship	11.62	0.0006	12.71	8.65
Dimensional Analysis	4.41	0.0005	5.32	4.74

می‌دهد که رفتار هیدرولیکی سرریز در زاویه‌های کمتر از ۳۵ درجه، متفاوت از زاویه‌های بیشتر از ۳۵ درجه است. دلیل اصلی این تفاوت تأثیر بدنه سازه در مسیر جریان است. با افزایش زاویه، تیغه‌های دیواره سازه به میزان بیشتری در مسیر جریان بالادست قرار می‌گیرد و این باعث می‌شود تا جریان راحت‌تر از مرکز به سمت ورودی سرریز عبور کند. سرریز VHW به دلیل متحرک بودن و قرار گرفتن در ارتفاع‌های مختلف، می‌تواند سطح آب را بهتر از سرریزهای ثابت تنظیم کند و همچنین با رابطه‌های ارائه شده در مورد آن می‌توان میزان جریان عبوری از آن را اندازه‌گیری کرد. از آنجاکه که این سرریز از نظر شکل ظاهری و عملکرد، همانندی با سازه‌های تنظیم دیگر ندارد، تنها معرفی و ارائه رابطه‌های هیدرولیکی آن انجام شد. گرچه می‌توان با مطالعات تکمیلی، حساسیت هیدرولیکی این سرریز از جنبه کنترل سطح آب را نیز بررسی و ارزیابی کرد.

۴- نتیجه‌گیری

در این تحقیق سرریز VHW معرفی و طراحی شد و به صورت آزمایشگاهی ساخته شد. سپس عملکرد هیدرولیکی آن به طور دقیق و در محدوده ابعاد و دبی به کار رفته در آزمایش‌ها، بررسی شد. این در حالی است که تاکنون رابطه‌های مشخصی برای دبی-تراز و ضریب دبی این نوع از سرریزها منتشر نشده است. رابطه دبی عبوری از سرریز VHW با سه روش هیدرولیکی، توانی و تحلیل ابعادی به دست آمد. مقایسه شاخص‌های آماری این سه رابطه نشان می‌دهد که رابطه به دست آمده از تحلیل ابعادی بیشترین تطبیق را با داده‌ها دارد. بررسی نتایج نشان می‌دهد که در رابطه هیدرولیکی، روند افزایش ضریب دبی در زاویه‌های بزرگ‌تر از ۳۵ درجه، بیشتر است. در این محدوده اگر زاویه سرریز میزان مشخصی تغییر کند، تغییرات دبی نسبت به تغییر زاویه در محدوده زاویه‌های کمتر از ۳۵ درجه، بیشتر است. این نشان

³ Normal Root Mean Square Error

¹ Root Mean Square Error

² Standard Error

Marashi, A., Kouchakzadeh, S., Yonesi, H.A. and Torabi-Poudeh, H. (2020). Hydraulics of Rotary Gate: Novel Structure for Semicircular Canals, 147(4), DOI:10.1061/ (ASCE)IR.1943-4774.0001537.

Naghaei, R. and Monem, M.J. (2016). Development of a Mathematical Model of Lopac Gates in Accordance with the ICSS Hydrodynamic Model, Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 142 (10), 04016043(1-8).

Nikmehr, S. (2016). Demand-Oriented Designing of Irrigation Canals Based on Automation, Phd Thesis, University of Tehran, 189p. (In Persian)

Wahlin, B.T. and Replogle, J.A. (1994). Flow Measurement Using an Overshot Gate, UMA Engineering, Inc, USA, 24p.

Wahlin, B. and Zimbelman, D. (2014). Canal Automation for Irrigation Systems, ASCE Manuals and Reports on Engineering Practice. No. 131, 265p.

White, F.M. (2001). Fluid Mechanics, The McGraw-Hill Company, 826p.

۵- سپاسگزاری

دست اندر کاران این پژوهش از حمایت مالی پارک علم و فناوری دانشگاه تهران به این تحقیق در قالب اعتبار شماره ۵۴۳۵۱۳۳ قدردانی می کنند.

۶- فهرست نشانه‌ها

C	ضریب دبی ($m^{0.5}s^{-1}$)
g	شتاب ثقل (ms^{-2})
h	عمق آب روی تاج (m)
L	طول سرریز (فاصله افقی) (m)
P	ارتفاع سرریز (فاصله عمودی) (m)
q	دبی در واحد عرض (m^2s^{-1})
Q	دبی (m^3s^{-1})
V	سرعت (ms^{-1})
w	عرض سرریز (m)
μ	لزجت دینامیکی آب ($kgm^{-1}s^{-1}$)
θ	زاویه کف سرریز نسبت به افق

۷- منابع‌ها

Amiri Tokaldany, E. and Siahi, M.K. (2008). Design of Irrigation Canals and Related Structures, University of Tehran Press, Iran, 494p. (In Persian)

Bos, M.G. (1989). Discharge Measurement Structures, International Institute for Land Reclamation and Improvement/ILRI, Wageningen, The Netherlands, 401p.

Chaudhry, M.H. (2008). Open-Channel Flow, Springer Science+Business Media, LLC, New York, 523p.

Clemmens, A.J., Wahl, T.L., Bos, M.G. and Replogle, J.A. (2001). Water Measurement with Flumes and Weirs, International Institute for Land Reclamation and Improvement, Wageningen, The Netherlands, 382p.

Francis, J.B. (1883). Lowell Hydraulic Experiments, D.Van Nostrand Company, Inc, New York.

Henderson, F.M. (1966). Open Channel Flow, Macmillan Publishing Company, Inc, New York. Collier Macmillan Publishers, London, 522p.

[Http://www.Rubiconwater.com](http://www.Rubiconwater.com)