

Research Article

Real-time Monitoring of Inflow to the West Dez Irrigation Network by Equipping Radial Gates

Hossein Khalili Shayan¹ , Mohammad Hamzehdoost Hassan Kiadeh², Abolfazl Barghi Khezerloo³

***Corresponding Author:** 1-Former PhD Student, Department of Irrigation and Reclamation Engineering, College of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran.

2- Graduated from the Bachelor of Science in Civil Engineering - Water Structures, Shahid Abbaspour University and CEO of Abtin Tandis Ideh Company, Tehran, Iran.

3-Former PhD Student, Department of Irrigation and Reclamation Engineering, College of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran.

(✉ **Corresponding Author:** h_kh_shayan@ut.ac.ir) .

ARTICLE INFO

Received: 13 August 2026

Revised: 28 August 2026

Accepted: 12 September 2026

Available Online: 22 September 2026

HOW TO CITE THIS ARTICLE

Khalili Shayan, H., Hamzehdoost Hassan Kiadeh, M., & Barghi Khezerloo, A., (2026). Real-time Monitoring of Inflow to the West Dez Irrigation Network by Equipping Radial Gates. V.27, No.102, P:115-138

<https://doi.org/10.22092/idser.2026.373942.1659>

Extended Abstract

Introduction

Traditional approaches to regulating irrigation canals rely heavily on manual discharge measurements and operator judgment, both of which are labor-intensive and error-prone. The advent of Supervisory Control and Data Acquisition (SCADA) systems, Remote Terminal Units (RTUs), level sensors, and wireless data transmission has opened new horizons for achieving precision water delivery. However, the successful deployment of such technology's hinges upon the accuracy and reliability of the underlying hydraulic measurement instruments and the control algorithms that interpret their readings. This study investigated the use of radial gates, which exist at most inlet and delivery points in the country's irrigation networks, as measurement structures.

Methodology

Using the as-built map of the inlet gates of the West Dez canal and using energy and momentum equations, the rating of the estimated gate discharge was derived for different combinations of the upstream water level and the percentage of opening. A total of 2,337 field measurement series were taken at various combinations of opening, upstream water level, and discharge.

Results and Discussion

The results of this study indicate the applicability of radial gates in estimating the amount of discharge delivered downstream with appropriate accuracy, based on field measurements at the inlet gates of the main canal of the West Dez. It was found that the rating proposed in the present study, without local calibration, has the ability to predict the inlet flow to the main canal of the West Dez irrigation network with an average absolute relative error of less than 4 percent.

Continuous monitoring of the flow rate entering the irrigation network requires continuous monitoring of changes in the upstream water level and the opening percentage of each gate. During this study, by installing an online VIGILEVEL level gauge and sending water level information in real time every half hour to the Water Query software system, as well as sending the opening percentage of the left and right gates entering the network after each opening change by the operator to the system, it became possible to continuously monitor changes in the volume of flow entering the West Dez irrigation network. Accordingly, during the 97

days of this study, the volume of flow entering the West Dez irrigation network, equal to 508 million cubic meters, was monitored with an error of less than 4 percent.

Considering the average error of about 10-15 percent in measuring the entry flow into the country's modern irrigation networks, the application of the proposed method, with an average absolute relative error of less than 5 percent, could lead to the management of a water volume of at least 600 million cubic meters annually. Meanwhile, the proposed method in this study will reduce the cost of equipping entry points to the country's modern irrigation networks by at least approximately 1.6 million Dollars (equivalent to 3,750 billion Rials) compared with electronic flow measurement devices.

Conclusion

This research explores the application of control gates in irrigation networks, emphasizing their role in regulating water flow and optimizing irrigation efficiency. This research demonstrates that the integration of accurate water level sensing, hydraulically validated discharge rating equations, and modern telemetry and control infrastructure constitutes an effective and practical strategy for enhancing water management in irrigation networks. The field-validated system achieved high measurement precision, enabling volumetric water delivery that closely matches agricultural demand while significantly mitigating conveyance losses. The results further confirm that the performance of automated discharge measurement is critically sensitive to the gate opening. The proposed methodology is generalizable and could be adapted to other control structures, canal geometries, and climatic contexts with appropriate recalibration.

Conflict of Interest

The authors declare that they have no conflict of interest. All authors have read and approved the final manuscript.

Funding

The authors received no financial support for the research, authorship, and publication of this article.

Data Availability Statements

All information and results are presented in the text of the article. The datasets generated and/or analyzed during the current study are available from the corresponding author on reasonable request.

Author Contribution

All authors contributed to the study conception and design. Material preparation, data collection, and analysis were performed by all authors. The first draft of the manuscript was written by H.K.S, and all authors commented on previous versions of the manuscript (H.K.S, M.H.H.K, and A.B.K). The final revisions have been applied by H.K.S. Moreover, all authors have read and approved the final manuscript. All authors contributed equally to the conceptualization of the article and writing of the original and subsequent drafts.

Acknowledgement

The authors appreciate the support of the Iran Water Resources Management Company and the Northern Khuzestan Irrigation Networks Operation Company in providing conditions for periodic visits to the Dez irrigation network.

Keywords: Field calibration, Flow measurement, Regulation, Volumetric delivery, Water level recording



نوع مقاله: پژوهشی

پایش بر خط حجم ورودی به شبکه آبیاری غرب دز با تجهیز دریچه‌های قطاعی

حسین خلیلی شایان^۱ ID، محمد حمزه دوست حسن کیاده^۲، ابوالفضل برقی خضرو^۳

تاریخ دریافت: ۱۴۰۵/۰۵/۲۲ | تاریخ بازنگری: ۱۴۰۵/۰۶/۰۶ | تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۶/۲۱ | تاریخ انتشار: ۱۴۰۵/۰۶/۳۱

چکیده

مهم‌ترین اصل در اجرای تحویل حجمی آب کشاورزی و مدیریت مصرف آب، اندازه‌گیری دقیق آب در نقاط ورودی و تحویل شبکه‌های آبیاری است. در مطالعه موردی حاضر، کاربرد دریچه‌های قطاعی به منظور اندازه‌گیری جریان در کانال اصلی غرب دز (W_1)، به عنوان یکی از مهم‌ترین نقاط ورودی به شبکه‌های آبیاری کشور، ارزیابی شد. در این مطالعه با کاربرد معادله‌های انرژی و مومنتم، جدول تعیین دبی دریچه به صورت تابعی از عمق بالادست و گشودگی دریچه (حالت اول) و جدول محاسبه گشودگی مورد نیاز برای تنظیم دریچه‌ها و به منظور گذار دبی مطلوب (حالت دوم)، استنتاج گردید. بر مبنای ۲۳۳۷ سری اندازه‌گیری در محل مشخص شد که رابطه پیشنهادی بدون نیاز به واسنجی محلی، قابلیت برآورد دبی ورودی به شبکه را، با میانگین قدرمطلق خطای نسبی کمتر از ۴ درصد، داراست. به منظور برخط‌سازی داده‌های دبی ورودی به شبکه آبیاری غرب دز، سطح سنج ثابت VIGILEVEL در بالادست دریچه‌ها نصب و اطلاعات تراز سطح آب به صورت خودکار و در بازه زمانی ۳۰ دقیقه یکبار، به سامانه Water Query در بستر پیامک مخابره گردید. با مخابره اطلاعات تراز سطح آب، ارسال درصد گشودگی دریچه‌ها توسط بهره‌بردار طی پیامک و الحاق معادله پیشنهادی دریچه به سامانه، Water Query به صورت خودکار دبی عبوری از دریچه را محاسبه و ذخیره می‌کند. روش پیشنهادی در شرایط وجود دریچه‌های تنظیم و دارای قابلیت تنظیم گشودگی می‌تواند راهکاری ارزان قیمت و پایدار نسبت به ابزارهای دبی سنج الکترونیکی برای کنترل و اندازه‌گیری همزمان جریان و در راستای استقرار تحویل حجمی معرفی کند. با توجه به مصرف سالانه حدود ۱۲ میلیارد مترمکعب آب در شبکه‌های آبیاری مدرن کشور و خطای متوسط حدود ۱۰-۱۵ درصد در اندازه‌گیری دبی ورودی به این شبکه‌ها در شرایط فعلی، کاربرد روش پیشنهادی در این مقاله با میانگین قدرمطلق خطای نسبی کمتر از ۵ درصد، مدیریت حجم آبی در حدود ۶۰۰ میلیون مترمکعب به همراه دارد.

واژه‌های کلیدی: اندازه‌گیری دبی، تحویل حجمی، تنظیم، ثبت تراز سطح آب، واسنجی صحرائی

مقدمه

از سوی کشاورزان به ازای مصرف هر مترمکعب آب و محدودیت منابع آب کشور از یک سو و نیاز روزافزون به تولیدات کشاورزی از سوی دیگر توجه به مصرف بهینه آب کشاورزی را ضروری کرده است. تلفات بالای آبیاری به خصوص در مصرف آب‌های سطحی، تأکیدی بر این مطلب است. تحویل حجمی اولین گام برای کنترل مصرف کشاورزی و سعی در کاهش تلفات است. به دلیل پرداخت نشدن آب‌بها

از سوی کشاورزان به ازای مصرف هر مترمکعب آب و ناکافی بودن دقت در کنترل حجم آب تحویلی به مصرف‌کننده، اهمیت کافی به کاهش مصرف آب داده نمی‌شود (Aon, 2007). تحویل حجمی، گامی اساسی در راستای مدیریت مصرف آب کشاورزی محسوب می‌گردد. بر اساس تعریف، تحویل فرآیندی است که طی آن آب مورد تقاضای کشاورزی

^۱ دانش‌آموخته دکتری سازه‌های آبی، گروه مهندسی آبیاری و آبادانی، دانشکدگان کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران. کرج، ایران.
(Email: h_kh_shayan@ut.ac.ir) نویسنده مسئول

^۲ دانش‌آموخته کارشناسی رشته مهندسی عمران- تاسیسات آبی، دانشگاه شهید عباسپور و مدیر عامل شرکت آبتین تندیس ایده. تهران، ایران.

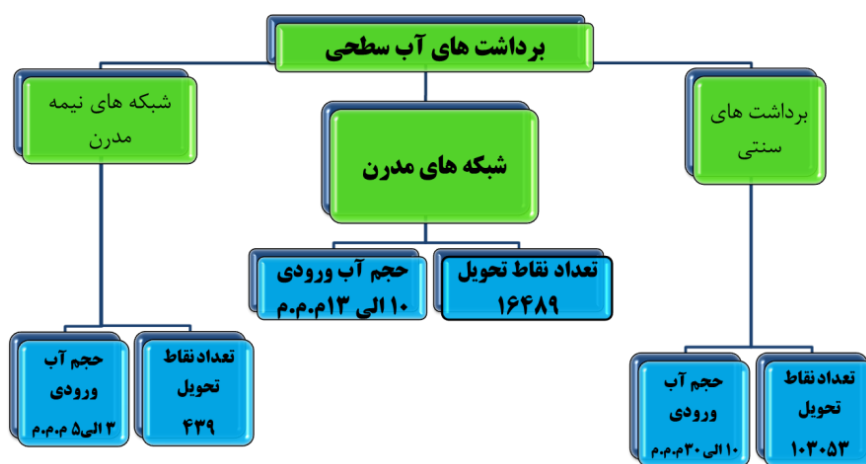
^۳ دانش‌آموخته دکتری سازه‌های آبی، گروه مهندسی آبیاری و آبادانی، دانشکدگان کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران. کرج، ایران.

به ابزارهای مناسب اندازه‌گیری و کنترل جریان آب، مهم‌ترین وظیفه واگذار شده به وزارت نیرو در اجرای تحویل حجمی است. این وظیفه علاوه بر نیاز به صرف هزینه‌های قابل‌توجه، با پیچیدگی‌هایی در انتخاب ابزار پایدار اندازه‌گیری جریان با توجه به شرایط خاص هر شبکه آبیاری همراه است.

در شرایط فعلی، سالانه و در شرایط نرمال حدود ۳۹/۳ میلیارد مترمکعب آب از منابع آب‌های سطحی در بخش کشاورزی، به مصرف می‌رسد. از این میزان حدود ۳۰/۵ درصد (۱۲ میلیارد مترمکعب) در شبکه‌های آبیاری مدرن، حدود ۱۰/۲ درصد (۴ میلیارد مترمکعب) در شبکه‌های آبیاری نیمه مدرن و حدود ۵۹/۳ درصد (۲۳/۳ میلیارد مترمکعب) در شبکه‌های آبیاری سنتی برداشت می‌گردد (Anon, 2023).

در حال حاضر ۱۳۲ شبکه مدرن آبیاری در سطح کشور وجود دارد. آب آبیاری از ۲۳۱ نقطه و عمدتاً به‌صورت ثقلی به مجموعه شبکه‌های مدرن وارد می‌گردد. بر مبنای گزارش دفتر بهره‌برداری از تأسیسات انتقال و توزیع آب، در مجموع ۱۶۴۸۹ نقطه تحویل در شبکه‌های آبیاری مدرن، ۴۳۹ نقطه تحویل در شبکه‌های آبیاری نیمه مدرن و ۱۰۳۰۵۳ نقطه تحویل در شبکه‌ها یا برداشت‌های سنتی شناخته شده است (شکل ۱).

به‌صورت حجمی بر اساس سند ملی آب و الگوی کشت مناسب در زمان (تقویم به‌روز شده آبیاری) مشخص و مکان (نقاط تحویل آب) مشخص، تحویل تشکیل می‌گردد (Anon, 2020). منظور از نقطه تحویل برای شبکه‌های آبیاری مدرن، حداقل در ابتدای کانال‌های فرعی است. منظور از شکل نیز شکل‌های قانونی و رسمی است که در قالب الگوهای مختلف نظام‌های بهره‌برداری با اولویت شرکت‌های تعاونی تولید روستایی، شرکت‌های سهامی زراعی و کشت و صنعتی که توسط سازمان جهاد کشاورزی استان (مدیریت تعاون روستایی) معرفی می‌شوند. در تحویل حجمی، آب‌ها بر اساس میزان حجم آب تحویلی و مستقل از عملکرد محصول دریافت می‌شود. به‌منظور ضرورت هماهنگی در برنامه‌ریزی تأمین آب و بهره‌برداری از شبکه‌ها و تأسیسات اصلی و فرعی و استقرار فرآیند تحویل حجمی آب و فعالیت مؤثر بهره‌برداران در قالب شکل‌های قانونی، «دستورالعمل نحوه تحویل حجمی آب در شبکه‌های آبیاری و زهکشی» در ده ماده و هفت تبصره به تأیید کارگروه ملی سازگاری با کم‌آبی، رسید. این دستورالعمل که در مردادماه سال ۱۳۹۹ برای اجرا به استان‌ها ابلاغ گردید، وظایف متقابل وزارت نیرو و جهاد کشاورزی را برای اجرای تحویل حجمی در شبکه‌های آبیاری مدرن و نیمه مدرن و طی سه سال، نبین کرده است (Anon, 2020). تجهیز نقاط تعیین‌شده به‌عنوان نقاط تحویل



شکل ۱- تعداد نقاط تحویل و حجم آب ورودی به شبکه‌های آبیاری کشور (Anon, 2019)

Fig. 1 – Number of delivery points and volume of water entering irrigation networks in the country (Anon, 2019)

(جدول ۱) وضعیت نقاط تحویل آب به ابزارهای اندازه‌گیری جریان در شبکه‌های مدرن آبیاری و زهکشی کشور را به تفکیک نوع ابزار نشان می‌دهد (Anon, 2019). از حدود ۱۶۴۸۹ نقطه تحویل در شبکه‌های آبیاری مدرن، حدود ۱۰۹۹۳ نقطه حداقل یک‌بار به ابزار اندازه‌گیری جریان مجهز شده‌اند. دیده می‌شود ابزارهای اندازه‌گیری موجود در نقاط تحویل طیف وسیعی از روش‌های دبی-اشل، ابزارهای

جدول ۱- اطلاعات تعداد نقاط تحویل تجهیز شده به ابزارهای اندازه‌گیری جریان در شبکه‌های آبیاری مدرن (Anon, 2019)
Table 1 – Number of delivery points equipped with flow measurement devices in modern irrigation networks (Anon, 2019)

اطلاعات کل نقاط تحویل تجهیز شده به ابزارهای اندازه‌گیری جریان							تعداد کل نقاط تحویل	تعداد نقاط تحویل فاقد ابزار اندازه‌گیری
سایر	ابزارهای الکترونیکی	اشل	دریچه‌های نیرپیک	فلوم گلو بلند	پارشال فلوم	تعداد کل نقاط تجهیز شده		
۲۳۵۰	۱۴۰	۱۶۴۴	۵۱۴۸	۶۸	۱۳۹۱	۱۰۹۹۳	۵۴۹۶	۱۶۴۸۹

جریان را می‌توان به انواع سرریزهای لب نازک (سرریز مثلثی یا مستطیلی لب نازک)، سرریزهای لبه پهن و فلوم‌های موج ایستاده مانند انواع پارشال فلوم‌ها و فلوم‌های گلو بریده طبقه‌بندی کرد.

طرح تجهیز نقاط تحویل در شبکه‌های آبیاری مدرن در سال‌های پایانی دهه هشتاد آغاز گردید. این طرح سه هدف کلی را دنبال می‌کند: (۱) نوسازی نقاط تحویل آب به سازه‌ها و دریچه‌های مدول، (۲) به‌کارگیری ابزار دقیق الکترونیکی با فناوری‌های روز مانند قابلیت‌های داپلر و (۳) ارسال اطلاعات سنجش شده در بستر مخابراتی مناسب به پایگاه مرکزی مدیریت داده. تاکنون گزارش مشخصی درباره کارایی و پایداری انواع تجهیزات نصب‌شده طی طرح تجهیز نقاط منتشر نشده است، اما بخش مهمی از چالش‌های موجود مربوط به پایداری تجهیزات الکترونیکی اندازه‌گیری مبتنی بر فناوری‌های داپلر، راداری یا زمان متغیر است. بر اساس مشاهدات میدانی نگارندگان، تجهیزات الکترونیکی سنجنده سرعت و دبی جریان که در سال‌های گذشته با صرف هزینه‌های قابل‌توجه خریداری و در نقاط ورودی و تحویل نصب‌شده‌اند، فاقد کارایی مستمر و پایداری در

روش‌ها و ابزارهای اندازه‌گیری جریان در شبکه‌های آبیاری و زهکشی به دودسته طبقه‌بندی می‌شوند (Anon, 2021):

الف- اندازه‌گیری جریان آب با استفاده از تجهیزات الکترونیکی: در این روش‌ها پارامترهای مرتبط با جریان آب با استفاده از سنجنده‌های الکترونیکی اندازه‌گیری می‌شود. این سنجنده‌ها را می‌توان به انواع سرعت‌سنج زمان متغیر یا ترانزیت تایم، سرعت‌سنج داپلری یا موج صوتی و سرعت‌سنج راداری طبقه‌بندی کرد.

ب- اندازه‌گیری جریان آب با استفاده از روش‌های هیدرولیکی: این روش‌ها مبتنی بر تشکیل مقاطع کنترل هیدرولیکی است. از نظر هیدرولیکی، مقطع کنترل به مقطعی اطلاق می‌گردد که با ایجاد عمق بحرانی، معادله دبی جریان و عمق آب مشخص باشد. عمق بحرانی یا مقطع کنترل می‌تواند با تنگ‌شدگی عرض بستر یا برآمدگی تراز بستر، ایجاد شود. در این حالت، ایستگاه سنجش جریان به یک سازه اندازه‌گیری جریان تبدیل می‌گردد که رابطه دبی سنجی آن از قبل معلوم است (سازه اندازه‌گیری پیش‌واسنجی شده). سازه‌های پیش‌واسنجی شده اندازه‌گیری

کشویی و قطاعی در دامنه‌ای وسیع می‌توانند برای اندازه‌گیری دبی به کار روند و برخی دیگر، مانند مدول‌های نیرپیک، مناسب برای اندازه‌گیری دبی در دامنه مشخصی هستند. ساختمان‌های تنظیم سطح آب مجهز به دریچه قطاعی به‌طور معمول برای کنترل دبی‌های بیشتر از $2/5$ مترمکعب بر ثانیه و ساختمان‌های تنظیم مجهز به دریچه کشویی برای کنترل دبی‌های کمتر از $2/5$ مترمکعب بر ثانیه استفاده می‌شوند (Anon, 2004). شکل (۲) نمونه‌هایی از کاربرد دریچه‌های قطاعی را در سطح شبکه آبیاری غرب دز در استان خوزستان نشان می‌دهد.

عملکرد هستند. به دلایل متعدد از جمله صرف هزینه‌های قابل توجه در خرید واردات ابزارهای الکترونیکی از کشورهای سازنده در شرایط تحریم اقتصادی و تعهد نکردن شرکت‌های واردکننده در پشتیبانی طولانی‌مدت، در مقیاس کلی استفاده از این ابزارها در شبکه‌های آبیاری و زهکشی کشور فاقد پایداری در عملکرد است.

در شبکه‌های آبیاری و زهکشی، انواع دریچه‌ها و مدول‌ها، برای تنظیم یا تثبیت سطح آب به کار می‌رود. مزیت این سازه‌ها، امکان توأم تنظیم سطح آب و اندازه‌گیری جریان است. در این میان سازه‌های هیدرولیکی مانند دریچه‌های



شکل ۲- (الف) دریچه‌های قطاعی ورودی کانال اصلی غرب دز (دریچه راست باز و دریچه چپ بسته) و (ب) دریچه‌های قطاعی در کانال آبیاری فرعی ۳۵ کیلومتری غرب دز (دریچه راست تحت شرایط جریان آزاد و دریچه چپ تحت شرایط آستانه استغراق)
Fig. 2- (a) Radial gates at the inlet of the West Dez main canal (right gate is open, left gate is closed) and (b) radial gates in the West Dez 35-km secondary irrigation canal (right gate under free-flow conditions, left gate under transition flow conditions)

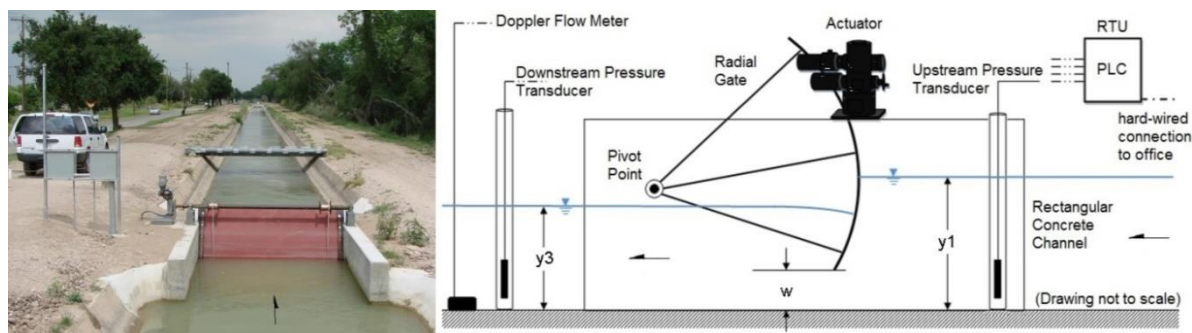
Clemmens *et al.*, 2003; Wahl, 2005; Shahrokhnia & Javan, 2006; Zahedani *et al.*, 2012; Clemmens & Wahl, 2012; Bijankhan *et al.*, 2013). این مطالعات بر توسعه معادله‌هایی برای تخمین دبی دریچه‌های قطاعی تحت شرایط جریان آزاد و مستغرق تمرکز دارند و سهم کمتری از مطالعات به تعیین گشودگی دریچه موردنیاز برای عبور دبی مشخص اختصاص دارد. خلیلی شایان و همکاران (الف) (Khalili Shayan *et al.*, 2021a) و خلیلی شایان و همکاران (ب) (Khalili Shayan *et al.*, 2021b) راه‌حلی برای تعیین پارامترهای مجهول اعم از دبی و گشودگی دریچه قطاعی و رویکردهایی به‌منظور تمایز شرایط

با در دست داشتن اطلاعات تراز سطح آب بالادست و تراز سطح آب پایین‌دست در صورت استغراق دریچه) و نیز گشودگی، برآورد دبی دریچه قطاعی ممکن خواهد بود و از سوی دیگر می‌توان با برآورد گشودگی موردنیاز برای گذار دبی مشخص از دریچه تحت شرایط معین از عمق‌های بالادست و پایین‌دست و تنظیم دریچه در این گشودگی، حجم مطلوب را از مقطع دریچه عبور داد. تاکنون مطالعات گسترده‌ای در خصوص تخمین دبی عبوری از دریچه‌های قطاعی در شرایط مختلف جریان صورت گرفته است (Metzler, 1948; Toch, 1955; Buyalski, 1983;)

ترنسدیوسرهای فشاری و اندازه‌گیری میزان گشودگی دریچه با استفاده از یک Actuator استفاده شده است. با چرخش محور دریچه در نتیجه تغییر گشودگی و ایجاد شدت جریان معین از یک سو تعریف رابطه شدت جریان- گشودگی و از سوی دیگر در دیتالاگر امکان ثبت گشودگی به صورت غیرمستقیم وجود دارد. در این نمونه خاص، بازه شدت جریان ۴-۱۰۰ میلی‌آمپر در دیتالاگر با یک بازه صفر تا ۱۰۰ درصدی تنظیم شده است که متناظر با محدوده گشودگی صفر تا ۱/۵ متر دریچه است. اطلاعات پیوسته تراز سطح آب بالادست و پایین‌دست و نیز گشودگی دریچه با استفاده از RTU² مخابره می‌گردد و در نهایت با کاربرد رابطه دریچه، میزان دبی عبوری از مقطع دریچه به صورت پیوسته سنجیده می‌شود. متوسط خطای تعیین دبی دریچه در مقایسه با اندازه‌گیری‌های مستقیم، در این مطالعه موردی، کمتر از ۳ درصد گزارش شده است (Bonaiti et al., 2018).

جریان اعم از جریان آزاد یا مستغرق در هر مسئله ارائه داده‌اند و معادلات پیشنهادی را از مجموعه داده‌های آزمایشگاهی واسنجی کرده‌اند.

با توجه به اینکه کنترل تراز سطح آب و حجم جریان توسط سازه دریچه ممکن است، با تجهیز دریچه به ابزارهای سنجش پیوسته تراز سطح آب و گشودگی و تجهیزات ثبت و انتقال خودکار داده، ارسال اطلاعات و کنترل خودکار عملکرد دریچه از راه دور در سامانه‌های کنترل نظارتی و دریافت داده (SCADA¹) امکان‌پذیر است. با این روش می‌توان به یک سازه کنترل و اندازه‌گیری برخط جریان در کانال‌های آبیاری دست یافت. شکل (۳) نمونه‌ای از تجهیز سازه دریچه قطاعی را به منظور اندازه‌گیری و تنظیم خودکار جریان در United Irrigation District واقع در تگزاس جنوبی نشان می‌دهد (Bonaiti et al., 2018). اندازه‌گیری سطح آب در بالادست و پایین‌دست دریچه با استفاده از



شکل ۳- نمونه تجهیز دریچه قطاعی به ابزارهای ثابت اندازه‌گیری تراز سطح آب و گشودگی به منظور اندازه‌گیری جریان در United Irrigation District واقع در تگزاس جنوبی (Bonaiti et al., 2018)

Fig. 3 – Example of a radial gate equipped with instruments to monitor water level and gate opening at the United Irrigation District in South Texas (Bonaiti et al., 2018)

قرار داده است، اما رویکرد مشابه برای برخی از نقاط تحویل (ابتدای کانال‌های فرعی) و دارای دریچه قطاعی و دریچه کشویی قابل بسط است. ضمن آنکه پیش‌شرط اصلی تحقق تحویل حجمی در ابتدای کانال‌های فرعی کسب اطلاع دقیق از میزان ورودی آب در ابتدای شبکه آبیاری و کانال اصلی است. نوآوری مقاله حاضر بر دو محور متمرکز است: یکی

مقاله حاضر به صورت متمرکز امکان کاربرد دریچه‌های تنظیم را به منظور اندازه‌گیری حجمی جریان در ورودی به کانال اصلی غرب دز و تجهیز آن به ادوات ثبت و انتقال خودکار داده بررسی می‌کند. اگرچه مطالعه حاضر امکان‌سنجی کاربرد دریچه‌های قطاعی را به عنوان ابزار اندازه‌گیری در یک نقطه ورودی به کانال اصلی موردتوجه

¹ Supervisory Control and Data Acquisition systems

² Remote Terminal Unit

ساخته شده است. ظرفیت کانال‌های اصلی غرب و شرق دز به ترتیب ۱۵۷ و ۹۲ مترمکعب بر ثانیه است. شبکه آبیاری دز در مجموع ۱۰۷۰ دريچه آبياري دارد (Fili et al. 2009). ورودی کانال اصلی غرب دز (W1) متشکل از دو دريچه قطعی است که ظرفیت گذردهی جریان در حدود ۱۵۷ مترمکعب بر ثانیه را داراست. تراز نشیمنگاه دريچه معادل ۱۱۴ متر، تراز کف کانال بالادست معادل ۱۱۳ متر و تراز کف کانال پایین‌دست معادل ۱۱۱/۴۲ متر است. به دلیل اختلاف ارتفاع تراز آستانه با کف کانال پایین‌دست معادل ۲/۵۸ متر، هر دو دريچه همواره تحت شرایط جریان آزاد عمل می‌کنند (شکل ۲-الف). محور دريچه در تراز ۱۱۷/۶۲ متر نصب شده است. هر یک از دريچه‌ها به عرض ۱۵ متر، شعاع قوس ۷ متر و ارتفاع محور ۳/۶۲ متر است.

شکل (۴) شواهدی از نگاه اولیه طراحان شبکه آبیاری دز را به استفاده از دريچه‌های قطعی در اندازه‌گیری جریان با نصب اشل قرائت سطح آب در بالادست و پایین‌دست دريچه، احداث پل کابلی به منظور استقرار گروه آب‌سنجی برای واسنجی دريچه‌ها و وجود ابزار اندازه‌گیری گشودگی دريچه‌ها نشان می‌دهد.

ارزیابی معادله‌های توسعه داده شده در سابقه مطالعاتی برای پیش‌بینی دبی دريچه‌های قطعی در شرایط صحرایی و دیگری اجرای سامانه پایش برخط جریان از دريچه‌های قطعی در نقاط ورودی و تحویل شبکه‌های آبیاری.

مواد و روش‌ها

مشاهدات عملکرد دريچه‌های قطعی در کانال اصلی

آبیاری غرب دز

مطالعه موردی حاضر امکان‌سنجی کاربرد دريچه‌های تنظیم را به منظور اندازه‌گیری دبی ورودی به شبکه آبیاری مدرن غرب دز بررسی می‌کند. شبکه آبیاری دز در بالادست متشکل از یک سد تنظیمی دريچه‌دار قطعی است که به منظور کنترل و تنظیم آب خروجی از سد مخزنی دز و تأمین آب ورودی به شبکه با دبی ۲۰۰ مترمکعب بر ثانیه عبور جریان سیلابی معادل ۶۰۰۰ مترمکعب بر ثانیه طراحی شده است. در ۶ کیلومتری پایین‌دست سد تنظیمی، یک سد انحرافی با طول ۳۹۴ متر و ارتفاع ۴ متر به منظور هدایت آب موردنیاز کانال‌های اصلی مناطق شرق و غرب رودخانه دز و برای سیلابی معادل ۶۰۰۰ مترمکعب بر ثانیه



شکل ۴- الف- اشل برای تراز سطح آب در بالادست دريچه قطعی (کانال W1) و ب- گیج قرائت گشودگی دريچه

Fig. 4- (a) Gauge upstream of the radial gate (W1 canal) and (b) gate opening reading gauge

و ۱۳۹۶، از شبکه‌های آبیاری غرب و شرق دز بازدید شد. طی این بازدیدها سازه دريچه قطعی واقع در کانال اصلی

به منظور ارزیابی موقعیت اجرای طرح، دریافت نقشه حین ساخت دريچه، طرح مسئله با شرکت بهره‌برداری و نیز اندازه‌گیری‌های مستقیم، در سه مرحله طی سال‌های ۱۳۹۵

- غرب دز انتخاب گردید و مطابق شکل (۵) برداشت‌های صحرایی صورت گرفت.
- در مطالعه حاضر سه مجموعه اندازه‌گیری مستقیم به-منظور ارزیابی صحت و دقت معادله‌های پیشنهادی در پیش‌بینی دبی دریچه‌های قطاعی ورودی کانال آبیاری اصلی غرب دز استفاده شده است.
- سری اول شامل ۷۹ اندازه‌گیری مستقیم شامل ۱۳ سری اندازه‌گیری در شرایط گشودگی یکسان دو دریچه و ۶۶ سری اندازه‌گیری در شرایط گشودگی متفاوت دو دریچه است.
- سری دوم، شامل ۳۴ سری اندازه‌گیری است که طی آن هر دو دریچه دارای عملکرد هستند اما گشودگی متفاوت دارند.
- سری سوم اندازه‌گیری‌ها شامل ۲۲۲۴ سری داده مربوط به اندازه‌گیری‌های صورت گرفته از سال ۱۹۷۷ میلادی روی دریچه‌های قطاعی مذکور است.
- سری اول اندازه‌گیری‌ها به عنوان اندازه‌گیری‌های مرجع از قایق کیولاینر استفاده شد و سری دوم و سری سوم اندازه‌گیری‌ها به واسطه برداشت سرعت در کانال پایین‌دست دریچه با مولینه اجرا گردید (شکل‌های ۵-الف و ۵-ب). در هر برداشت علاوه بر اندازه‌گیری میزان دبی کانال، عمق بالادست به واسطه قرائت اشل بالادست دریچه (شکل ۴-الف) و گشودگی دریچه با استفاده از گیج مدرج نصب‌شده روی دریچه (شکل ۴-ب) ثبت گردید. گیج مدرج قرائت گشودگی دریچه‌های قطاعی ورودی کانال اصلی غرب دز برحسب درصد گشودگی تنظیم‌شده است. در شرایط گشودگی ۱۰۰ درصد، میزان ارتفاع قائم گشودگی معادل ۳ متر تنظیم‌شده است.



شکل ۵- (الف) اندازه‌گیری دبی جریان خروجی از دریچه با استفاده از مولینه و پل کابلی، (ب) اندازه‌گیری دبی جریان خروجی دریچه با استفاده از قایق کیولاینر و (ج) کنترل عملکرد کنتور اندازه‌گیری گشودگی

Fig. 5- Measurement of discharge from the gate using (a) a current meter and cableway, (b) a Q-Liner boat, and (c) verification of the opening reading gauge

نتایج و بحث

عبوری از دریچه‌های قطاعی (Q) تابعی از مشخصات هندسی کانال‌های بالادست و پایین‌دست (مانند عرض B)، مشخصات جریان اعم از عمق بالادست (y_0) و عمق پایاب (y_t)، شرایط جریان اعم از آزاد، مستغرق یا انتقالی و مشخصات هندسی دریچه قطاعی مانند شعاع (R)، ارتفاع نصب محور (Y)، گشودگی (w)، و عرض دریچه (b) است. تحت شرایط جریان آزاد، دبی مستقل از عمق پایین‌دست و در شرایط جریان مستغرق، دبی تابعی از عمق‌های بالادست و پایین‌دست است. به دلیل ناپایداری شرایط جریان انتقالی در حفاصل شرایط آزاد و مستغرق، توصیه می‌گردد در بهره‌برداری صحرائی از دریچه‌ها از تنظیم گشودگی در شرایط جریان انتقالی به منظور جلوگیری از افزایش خطای برآورد آبگذری اجتناب گردد (Clemmens, 2004).

تحت شرایط جریان آزاد، با کاربرد معادله انرژی در حفاصل پیش از دریچه و مقطع تنگ‌شدگی پس از دریچه و با در نظر گرفتن مجموعه پارامترهای بی‌بعد به فرم $a=w/y_0$ ، $\gamma=y_t/y_0$ و $F=Q/(B\sqrt{(gy_0^3)})$ دبی بی‌بعد دریچه قطاعی عبارت است از (Khalili Shayan et al., 2021a):

مطالعه حاضر متمرکز بر توسعه کاربرد دریچه‌های قطاعی برای اندازه‌گیری دبی جریان در نقاط ورودی و تحویل شبکه‌های آبیاری است. در بهره‌برداری از دریچه‌های قطاع دو نیاز ممکن است رخ دهد:

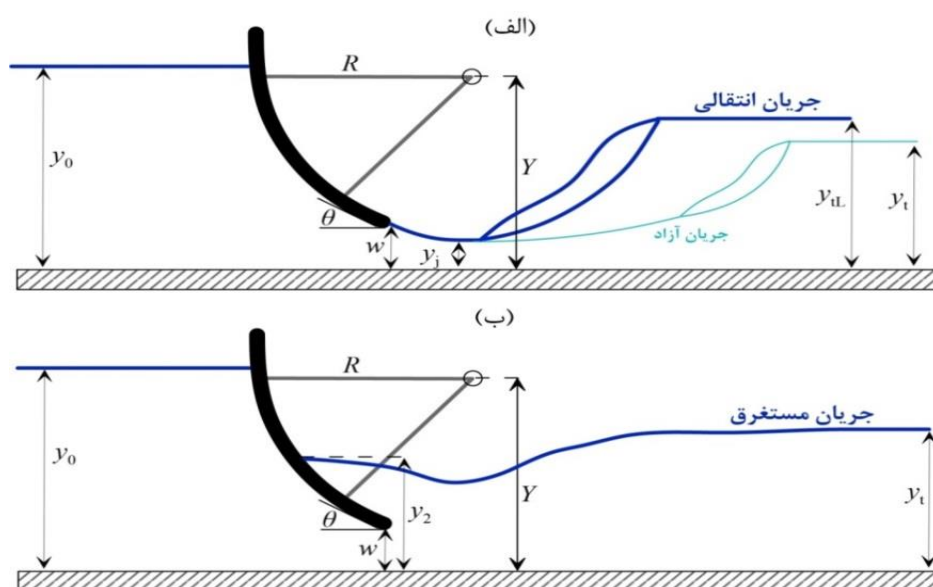
○ اندازه‌گیری حجم جریان عبوری از دریچه به ازای عمق‌های معین بالادست و پایین‌دست و گشودگی دریچه.

○ برآورد گشودگی موردنیاز برای عبور دبی مطلوب از دریچه به ازای عمق‌های معین بالادست و پایین‌دست.

حالت نخست استفاده از سازه دریچه برای اندازه‌گیری جریان است. حالت دوم استفاده از دریچه برای تنظیم سطح آب یا دبی خروجی از مقطع دریچه است که به‌خصوص در اهداف کنترل عملکرد دریچه از راه دور و سامانه‌های کنترل نظارتی و دریافت داده (SCADA) موردنیاز است.

اندازه‌گیری جریان عبوری از دریچه به ازای عمق‌های معین بالادست و پایین‌دست و گشودگی دریچه

شکل (۶) پارامترهای مؤثر بر هیدرولیک جریان از دریچه‌های قطاعی را نشان می‌دهد. در حالت کلی، دبی



شکل ۶- پارامترهای مؤثر بر آبگذری دریچه‌های قطاعی (الف) شرایط جریان آزاد و شرایط جریان انتقالی و (ب) شرایط جریان مستغرق
Fig. 6—Definition sketch of the flow through radial gates (a) free-flow and transitional flow conditions, and (b) submerged flow condition

به شعاع دریچه است $\delta = f\left(\frac{Y}{R}, \theta\right)$ ، زاویه θ در این معادله برحسب درجه است، $(\theta = \cos^{-1}[(Y-w)/R])$. ضریب تنگ‌شدگی دریچه قطاعی به صورت معادله زیر تعریف می‌شود:

$$\delta = c_1 \left(\frac{Y}{R}\right)^{\left[c_2 - \frac{c_3}{\theta}\right]} + c_4 \quad (3)$$

در جدول (۲) مقادیر ضریب k و ثابت‌های تجربی c_1, c_2, c_3 و c_4 برای دریچه قطاعی لبه تیز و به تفکیک شرایط جریان آزاد و مستغرق ارائه شده است. میانگین قدر مطلق خطای نسبی در برآورد دبی دریچه قطاعی لبه تیز از معادله‌های (۱) و (۲) بر اساس داده‌های آزمایشگاهی و تحت شرایط جریان آزاد و مستغرق، به ترتیب ۱/۴ درصد و ۱/۲ درصد برآورد می‌گردد (Khalili Shayan et al., 2021a).

$$F = k\delta a \sqrt{\frac{2(1-\delta a)}{1-\delta^2 a^2}} \quad (1)$$

در شرایط جریان مستغرق نیز با ترکیب معادله انرژی (در حدفاصل پیش از دریچه و مقطع تنگ‌شدگی) و معادله مومنتم (در حدفاصل مقطع تنگ‌شدگی و مقطع پایاب)، دبی بی‌بعد دریچه قطاعی به قرار زیر است (Khalili Shayan et al., 2021a):

$$F = k\delta a \sqrt{\frac{2\left(1 - \frac{1}{2}\left(\frac{4k^2\delta a(y-\delta a)}{\gamma(1-\delta^2 a^2)} + \sqrt{\frac{16k^2\delta^2 a^2(y-\delta a)^2}{\gamma^2(1-\delta^2 a^2)^2} + 4\left\{y^2 + \frac{4k^2\delta a(\delta a - y)}{\gamma(1-\delta^2 a^2)}\right\}}\right)}{1-\delta^2 a^2}}\right)} \quad (2)$$

در معادله‌های (۱) و (۲)، δ ضریب تنگ‌شدگی دریچه و k ضریبی است که به منظور تصحیح تأثیر فرضیات ساده کننده به کار می‌رود. ضریب تنگ‌شدگی دریچه قطاعی در حالت کلی تابعی از شرایط جریان و مشخصات فیزیکی و هندسی دریچه شامل فرم سیل دریچه و نسبت ارتفاع محور

جدول ۲- ثابت‌های تجربی در معادله‌های (۱) و (۲) به منظور محاسبه آبگذری دریچه قطاعی لبه تیز (Khalili Shayan et al., 2021a)
Table 2- Empirical constants in Eqs. (1) and (2) for calculating the discharge of a sharp-edged radial gate (Khalili Shayan et al., 2021a)

شرایط جریان	c_1	c_2	c_3	c_4	k
جریان آزاد	0.039	9.395	658.469	0.629	0.940
جریان مستغرق	0.030	9.368	658.458	0.665	

شکل (۷) مقادیر دبی محاسباتی دریچه‌های قطاعی ورودی کانال آبیاری W1 دز از معادله (۱) را در مقایسه با دبی‌های مشاهداتی نشان می‌دهد. میانگین قدر مطلق خطای نسبی ($MARE^1$) در پیش‌بینی دبی بر اساس سری اول اندازه‌گیری‌ها به عنوان اندازه‌گیری‌های مرجع، در حدود ۳/۵ درصد است (شکل ۷-الف). بر اساس سری اول داده‌های اندازه‌گیری‌شده، میانگین قدر مطلق خطای نسبی در پیش‌بینی دبی در شرایط گشودگی متفاوت دو دریچه معادل ۳/۴۸ درصد و در شرایط گشودگی یکسان دو دریچه معادل ۳/۵۱ درصد است. در نتیجه می‌توان گفت خطای پیش‌بینی دبی در شرایط گشودگی یکسان و متفاوت دریچه‌ها از روش

برای دریچه‌های قطاعی ورودی کانال اصلی غرب دز با توجه به ابعاد مندرج در نقشه حین ساخت، $Y=3.62m$ ، $B=15.00m$ و $R=7.00m$ است. با در نظر گرفتن مقادیر فوق و کاربرد معادله (۱) با توجه به عملکرد دریچه‌های ورودی کانال اصلی غرب دز تحت شرایط جریان آزاد، امکان برآورد دبی دریچه‌ها ممکن است. با توجه به نصب صفر اشل قرائت عمق بالادست دریچه در تراز ۱۱۳ متر (کف کانال بالادست) و اختلاف ارتفاع ۱ متری تراز نشیمنگاه دریچه با تراز کف کانال بالادست، برای اندازه‌گیری عمق بالادست (y_0) لازم است ۱ متر از قرائت اشل بالادست کسر گردد.

¹ Mean Absolute Relative Error

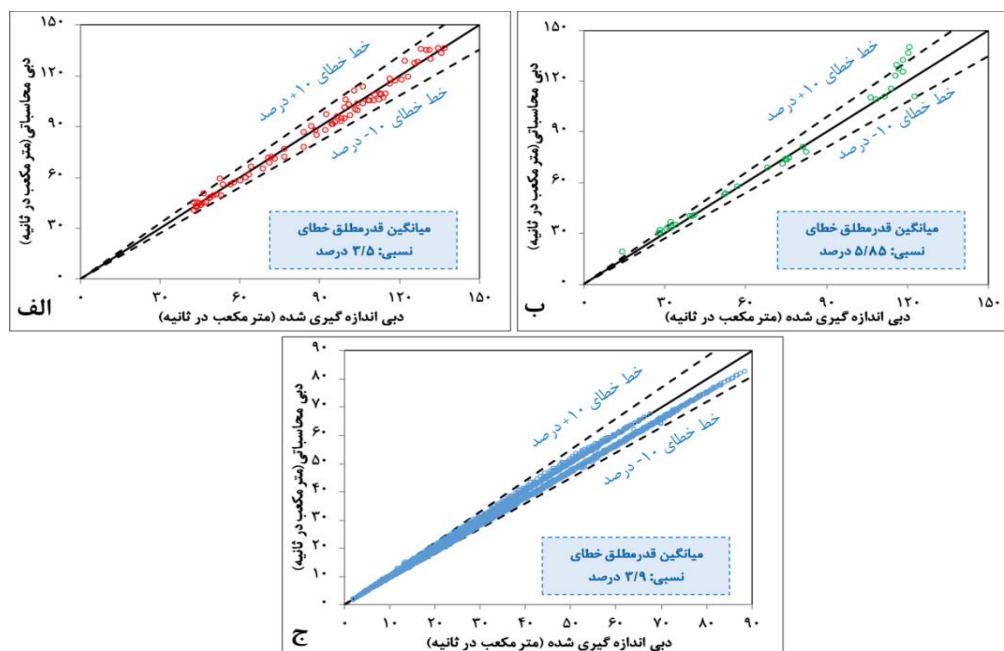
پیشنهادی طرح حاضر در حدود یکدیگر است. قدرمطلق خطای نسبی در پیش‌بینی دبی در سری اول داده‌ها از ۰/۰۱ درصد تا ۱۲/۶ درصد متغیر است.

سری دوم اندازه‌گیری‌ها عمدتاً متناظر با شرایط گشودگی متفاوت دریچه‌های قطاعی است. جالب‌توجه است که بر اساس این سری از اندازه‌گیری‌ها، میانگین قدرمطلق خطای نسبی در پیش‌بینی دبی به حدود ۵/۸۵ درصد افزایش یافته است (شکل ۷-ب). در این سری از اندازه‌گیری‌ها، حداکثر قدرمطلق خطای نسبی در پیش‌بینی دبی بر اساس سری دوم اندازه‌گیری‌ها به حدود ۳۱/۹ درصد افزایش یافته است. این محدوده از خطای قابل‌توجه متناظر با محدوده گشودگی کمتر دریچه (۱۵-۱۴ سانتی‌متر) و

آبگذری کمتر دو دریچه (دبی مجموع کمتر از ۲۰ مترمکعب بر ثانیه) است.

سری سوم اندازه‌گیری‌ها متناظر با شرایط گشودگی یک دریچه است. میانگین قدرمطلق خطای نسبی در پیش‌بینی دبی در این حالت در حدود ۳/۹ درصد است (شکل ۷-ج). حداکثر قدرمطلق خطای نسبی دبی از مجموعه این داده‌ها بر اساس روش پیشنهادی به حدود ۱۳/۵ درصد افزایش یافته است.

بر این اساس میانگین قدرمطلق خطای نسبی در پیش‌بینی دبی از معادله (۱) و از مجموعه ۲۳۳۷ سری داده صحرایی، حدود ۳/۹۲ درصد است.



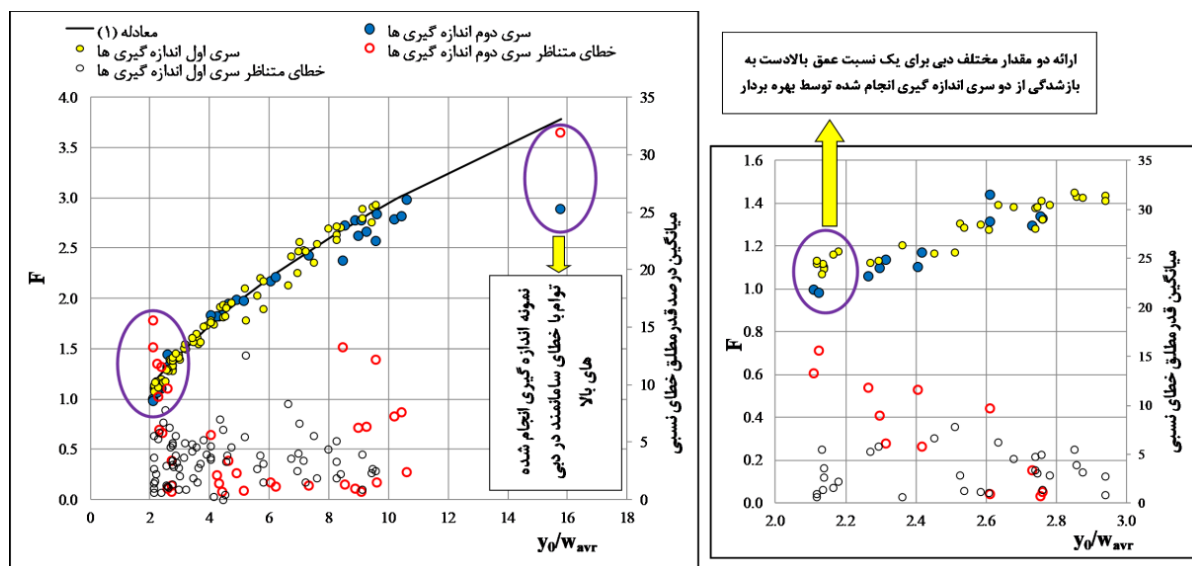
شکل ۷- مقایسه دبی محاسبه‌شده دریچه‌های قطاعی ورودی کانال W1 دز از معادله (۱) با اندازه‌گیری‌های مستقیم

الف- سری اول اندازه‌گیری‌ها، ب- سری دوم اندازه‌گیری‌ها و ج- سری سوم اندازه‌گیری‌ها

Fig. 7- Comparison of calculated discharge for the radial gates at the W1 canal using Eq. (1) with direct measurements, (a) First series, (b) Second series, and (c) Third series

با مقایسه خطای پیش‌بینی دبی دریچه‌های قطاعی ورودی کانال آبیاری W1 دز از سه سری اندازه‌گیری مستقیم، افزایش قابل‌توجه خطای پیش‌بینی دبی بر اساس سری دوم اندازه‌گیری‌ها مورد سؤال است. شکل (۸) تغییرات پارامتر $F = Q / (B \sqrt{(gy_0^3)})$ در مقابل عمق بالادست نسبی (نسبت عمق بالادست به گشودگی دریچه، y_0/W) بر اساس دو سری مختلف از اندازه‌گیری‌ها توسط بهره‌بردار را نشان می‌دهد. انتظار می‌رود در تمامی سری‌های اندازه‌گیری‌ها به ازای هر نسبت معین y_0/W تنها یک مقدار برای دبی و در نتیجه پارامتر F حاصل شود. این در حالی است که از شکل

(۸) به‌وضوح می‌توان دریافت به ازای مقادیر حدی پایین و بالا از نسبت عمق بالادست به گشودگی (y_0/w) دو سری از اندازه‌گیری دو مقدار متفاوت برای پارامتر F به دست داده است. این امر به‌وضوح خطا در مجموعه اندازه‌گیری‌ها توسط



شکل ۸- آشکارسازی خطا در اندازه‌گیری‌های دبی توسط بهره‌بردار

Fig. 8 – Error detection in flow measurements by the operator

درصد، ریشه میانگین مربعات خطا ($RMSE^1$) معادل ۲/۱۴ مترمکعب بر ثانیه و چولگی^۲ خطاها معادل ۰/۱۷- درصد است. میانگین خطای نسبی (MRE^3) معادل ۰/۸۶+ درصد است که نشان می‌دهد معادله (۱) دبی دریچه را نسبت به دبی‌های اندازه‌گیری عمدتاً کمتر برآورد می‌کند.

با اثبات کارایی معادله پیشنهادی در مطالعه حاضر، مراتب تأیید کارایی و استفاده عملیاتی از آن طی نامه شماره ۵۵۰۰/۳۶۶۵ مورخ ۱۳۹۷/۰۴/۲۳ از سوی شرکت بهره‌برداری از شبکه‌های آبیاری و زهکشی ناحیه شمال خوزستان اعلام گردید. روش پیشنهادی بدون نیاز به واسنجی محلی و مجدد، میانگین قدرمطلق خطای نسبی کمتر از ۴ درصد در پیش‌بینی دبی دریچه‌های ورودی کانال W1 ارائه می‌دهد.

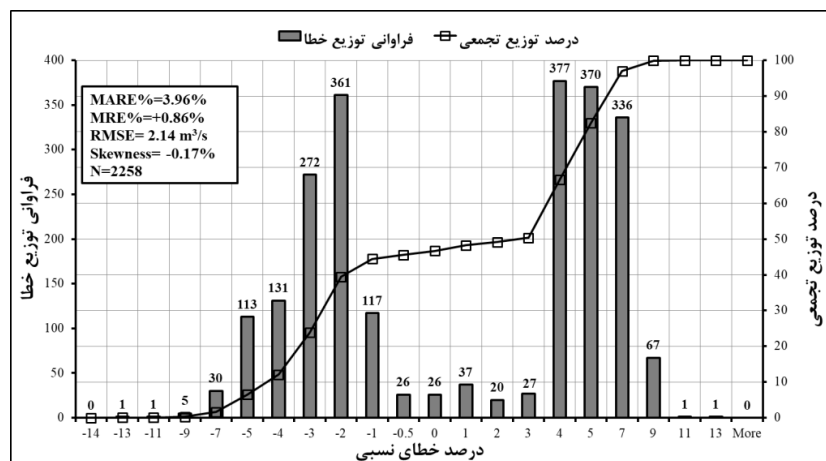
پیش از ارزیابی دقت معادله‌های پیشنهادی تعیین دبی لازم است از نبود خطای سامانمند در اندازه‌گیری‌ها و صحت اندازه‌گیری‌ها اطمینان داشت. در مجموعه‌ای از اندازه‌گیری‌ها در صورت نبود خطاهای سامانمند، توزیع خطاهای نسبی دارای توزیع نرمال است. شکل (۹) نمودار توزیع خطای نسبی را بر اساس مجموعه اندازه‌گیری‌ها توسط بهره‌بردار (سری دوم و سری سوم اندازه‌گیری‌ها) نشان می‌دهد. عدم توزیع نرمال خطاهای نسبی در اندازه‌گیری دبی با مولینه توسط بهره‌بردار از این شکل مشخص و نشانگر وجود خطای سامانمند است. این نوع خطا برخلاف خطاهای تصادفی دارای ریشه مشخص در تجهیزات اندازه‌گیری است که با رفع آن، خطای پیش‌بینی دبی تعدیل می‌گردد.

از شکل (۹) و بر اساس سری دوم و سری سوم اندازه‌گیری‌ها، میانگین قدرمطلق خطای نسبی معادل ۳/۹۶

³ Mean Relative Error

¹ Root Mean Square Error

² Skewness



شکل ۹- نمودار توزیع فراوانی خطا در پیش‌بینی دبی دریاچه‌های قطاعی از سری دوم و سوم اندازه‌گیری‌ها

Fig. 9 – Frequency distribution of discharge prediction errors for radial gates based on the second and third series of measurements

نزدیک در بالادست دریاچه‌ها پلی بتنی وجود دارد و گردابه‌های ایجادشده ناشی از جداسدن جریان از محل پایه‌ها، خود تشدیدکننده اثرهای افت انرژی اضافی می‌شود و سبب افزایش دبی پیش‌بینی شده از معادله (۱) نسبت به دبی اندازه‌گیری شده می‌گردد (شکل ۱۰-ب). واسنجی محلی ثابت‌های تجربی معادله‌های پیشنهادی طی مطالعه حاضر به‌منظور لحاظ کردن تأثیر عواملی مانند پایه‌های پل در بالادست، تبدیل‌های عرضی در بالادست و پایین‌دست دریاچه و افت‌های اضافی می‌تواند به کاهش خطای پیش‌بینی دبی منجر شود.

افزایش میانگین قدرمطلق خطای نسبی در پیش‌بینی آبگذری از مدل پیشنهادی طرح حاضر از حدود ۱/۴ درصد بر مبنای داده‌های آزمایشگاهی به حدود ۴ درصد بر مبنای سری اندازه‌گیری‌های صحرایی دریاچه‌های قطاعی ورودی کانال W1 دز سؤال‌برانگیز است. صرف‌نظر از تأثیر خطای اندازه‌گیری صحرایی دبی با استفاده از مولینه، به نظر می‌رسد بخشی از اختلاف مذکور متأثر از تفاوت در هندسه کانال و دریاچه‌های قطاعی از مدل آزمایشگاهی و نمونه واقع در ورودی کانال W1 دز باشد. دریاچه‌های قطاعی ورودی کانال W1 دز در کانال آبگیر و با زاویه قائم نسبت به کانال اصلی قرارگرفته است (شکل ۱۰-الف). به‌علاوه، در فاصله بسیار



شکل ۱۰- انحناي خطوط جريان و گردابه‌های ناشی از جدايش جريان در بالادست دریاچه قطاعی ورودی کانال W1 دز

Fig. 10 – Curvature of streamlines and vortices resulting from flow separation upstream of the radial gate at the inlet of the W1 canal

محاسبه گشودگی موردنیاز دریچه برای عبور یک دبی مشخص

(۱۳) $\Delta'' = \frac{\Delta_1'' - 4\Delta_0''}{-27}$

(۱۴) $\Delta_0'' = \lambda_3^2 - 3\lambda_2\lambda_4 + 12\lambda_1\lambda_5$

(۱۵) $\Delta_1'' = 2\lambda_3^3 - 9\lambda_2\lambda_3\lambda_4 + 27\lambda_2^2\lambda_5 + 27\lambda_1\lambda_4^2 - 72\lambda_1\lambda_3\lambda_5$

(۱۶) $\lambda_1 = 1 + \frac{F^4}{4} + F^2 - \gamma^2 - \frac{2F^2}{\gamma}$

(۱۷) $\lambda_2 = \frac{2F^2}{\delta}$

(۱۸) $\lambda_3 = -\left\{\frac{F^2}{\delta^2} + \frac{F^4}{2\delta^2}\right\}$

(۱۹) $\lambda_4 = 0$

(۲۰) $\lambda_5 = \frac{F^4}{4\delta^4}$

با محاسبه پارامتر گشودگی نسبی $a=w/y_0$ از معادله‌های (۴) و (۸) به ترتیب در شرایط جریان آزاد و مستغرق، گشودگی از معادله $w=a \times y_0$ تعیین می‌گردد. در این معادله-ها، δ ضریب تنگ‌شدگی دریچه است که از معادله زیر تعیین می‌گردد:

(۲۱) $\delta = \mu_1 \left(\frac{Y}{R}\right)^{(\mu_2 + \mu_3 \times F)} + \mu_4$

ثابت‌های μ_1, μ_2, μ_3 و μ_4 از جدول (۳) و متناظر با شرایط جریان آزاد و مستغرق برای دریچه‌های قطاعی لبه تیز تعیین می‌گردد. میانگین قدر مطلق خطای نسبی در محاسبه گشودگی دریچه قطاعی لبه تیز از معادله‌های (۴) و (۸) بر اساس سری داده‌های آزمایشگاهی و تحت شرایط جریان آزاد و مستغرق، به ترتیب ۱/۸ درصد و ۲/۱ درصد برآورد می‌گردد (Khalili Shayan et al., 2021b).

معادله گشودگی موردنیاز دریچه برای عبور یک دبی مشخص

(۴) $a = -\frac{\omega_1}{3} \left(1 - 2 \cos \frac{\pi + \phi''}{3}\right)$

که در آن، $a=w/y_0$ ، $F=Q/(B\sqrt{gy_0^3})$ همچنین خواهیم داشت:

(۵) $p'' = \delta^2 a^2 + \frac{2F^2}{\delta a}$

(۶) $r'' = 2F^2$

(۷) $\rho = \cos^{-1} \left[-\frac{r''}{2} \sqrt{\left(\frac{3}{p''}\right)^3} \right]$

در شرایط جریان مستغرق نیز گشودگی موردنیاز دریچه قطاعی (w) برای عبور دبی مطلوب از دریچه (Q) تحت شرایط معین از عمق‌های بالادست (y_0) و پایین‌دست (y_t)، عبارت است از (Khalili Shayan et al., 2021b):

(۸) $a = -\frac{\lambda_2}{4\lambda_1} + S' + \frac{1}{2} \sqrt{-4S'^2 - 2p'' - \frac{q''}{S'}}$

(۹) $S' = \frac{1}{2} \sqrt{-\frac{2}{3}p'' + \frac{2}{3\lambda} \sqrt{\Delta_0''} \cos \frac{\rho'}{3}}$

(۱۰) $p'' = \frac{8\lambda_1\lambda_3 - 3\lambda_2^2}{8\lambda_1^2}$

(۱۱) $q'' = \frac{\lambda_2^3 - 4\lambda_1\lambda_2\lambda_3 + 8\lambda_1^2\lambda_4}{8\lambda_1^3}$

(۱۲) $\rho' = \cos^{-1} \left[\frac{\Delta_1''}{2\sqrt{\Delta_0''^3}} \right]$

جدول ۳- ثابت‌های تجربی در معادله‌های (۴) و (۸) به منظور محاسبه گشودگی دریچه‌های قطاعی لبه تیز (Khalili Shayan et al., 2021b)

Table 3 – Empirical constants in Eqs. (4) and (8) for calculating the opening of sharp-edged radial gates (Khalili Shayan et al., 2021b)

شرایط جریان	μ_1	μ_2	μ_3	μ_4
جریان آزاد	0.212	0.655	9.205	0.593
جریان مستغرق	0.141	0.166	16.650	0.604

با در نظر گرفتن ابعاد دریاچه‌های قطاعی ورودی کانال W1 ($R=7.00m$ و $B=15.00m$ ، $Y=3.62m$) و عملکرد این دریاچه‌ها تحت شرایط جریان آزاد، از معادله (۴) تعیین گشودگی موردنیاز دریاچه برای گذار دبی مطلوب و مقدار معین عمق بالادست ممکن است. شکل (۱۱) تعیین گشودگی موردنیاز یک دریاچه قطاعی از دو دریاچه ورودی کانال اصلی غرب دز برای انتقال دبی مطلوب و به ازای ترازهای مختلف سطح آب بالادست دریاچه را نشان می‌دهد. این جدول به ازای ترازهای سطح آب بالادست در محدوده

		عمق بالادست نسبت به آستانه، نشیمنگاه دریاچه (متر) - $Y_0(m)$																							
		2	2.05	2.1	2.15	2.2	2.25	2.3	2.35	2.4	2.45	2.5	2.55	2.6	2.65	2.7	2.75	2.8	2.85	2.9	2.95	3			
		تراز سطح آب بالادست (متر)																							
دبی یک دریاچه بر حسب متر مکعب در ثانیه	70	1.775	1.669	1.593	1.531	1.48	1.435	1.395	1.359	1.327	1.297	1.269	1.244	1.22	1.198	1.177	1.157	1.138	1.121	1.104	1.088	1.073			
	68	1.655	1.574	1.51	1.457	1.412	1.371	1.335	1.302	1.272	1.245	1.219	1.196	1.173	1.152	1.133	1.114	1.097	1.08	1.064	1.049	1.035			
	66	1.555	1.489	1.435	1.388	1.347	1.311	1.278	1.248	1.22	1.194	1.171	1.148	1.128	1.108	1.09	1.072	1.056	1.04	1.025	1.011	0.997			
	64	1.467	1.411	1.364	1.322	1.286	1.252	1.222	1.195	1.169	1.145	1.123	1.102	1.083	1.065	1.047	1.031	1.015	1.001	0.986	0.973	0.96			
	62	1.388	1.339	1.297	1.26	1.227	1.196	1.169	1.143	1.119	1.097	1.077	1.058	1.039	1.022	1.006	0.99	0.976	0.962	0.948	0.936	0.924			
	60	1.314	1.271	1.234	1.2	1.17	1.142	1.117	1.093	1.071	1.051	1.032	1.014	0.997	0.98	0.965	0.951	0.937	0.924	0.911	0.899	0.888			
	58	1.245	1.207	1.173	1.143	1.115	1.09	1.066	1.045	1.024	1.005	0.987	0.971	0.955	0.94	0.925	0.912	0.899	0.886	0.874	0.863	0.852			
	56	1.18	1.146	1.115	1.088	1.063	1.039	1.018	0.997	0.979	0.961	0.944	0.929	0.914	0.9	0.886	0.873	0.861	0.85	0.838	0.828	0.817			
	54	1.118	1.087	1.06	1.035	1.011	0.99	0.97	0.951	0.934	0.917	0.902	0.887	0.873	0.86	0.848	0.836	0.824	0.813	0.803	0.793	0.783			
	52	1.058	1.031	1.006	0.983	0.962	0.942	0.924	0.906	0.89	0.875	0.861	0.847	0.834	0.822	0.81	0.799	0.788	0.778	0.768	0.758	0.749			
	50	1.002	0.977	0.954	0.933	0.914	0.896	0.879	0.863	0.848	0.833	0.82	0.807	0.795	0.784	0.773	0.762	0.752	0.742	0.733	0.724	0.716			
	48	0.947	0.925	0.904	0.885	0.867	0.85	0.835	0.82	0.806	0.793	0.78	0.768	0.757	0.746	0.736	0.726	0.717	0.708	0.699	0.691	0.683			
	46	0.895	0.874	0.855	0.838	0.821	0.806	0.792	0.778	0.765	0.753	0.741	0.73	0.72	0.71	0.7	0.691	0.682	0.674	0.666	0.658	0.65			
	44	0.844	0.825	0.808	0.792	0.777	0.763	0.749	0.737	0.725	0.714	0.703	0.693	0.683	0.674	0.665	0.656	0.648	0.64	0.632	0.625	0.618			
	42	0.795	0.778	0.762	0.747	0.734	0.721	0.708	0.697	0.686	0.675	0.665	0.656	0.647	0.638	0.63	0.622	0.614	0.607	0.6	0.593	0.586			
40	0.747	0.732	0.717	0.704	0.691	0.679	0.668	0.657	0.647	0.638	0.628	0.62	0.611	0.603	0.596	0.588	0.581	0.574	0.568	0.561	0.555				
38	0.701	0.687	0.674	0.662	0.65	0.639	0.629	0.619	0.61	0.601	0.592	0.584	0.576	0.569	0.562	0.555	0.548	0.542	0.536	0.53	0.524				
36	0.656	0.643	0.631	0.62	0.61	0.6	0.59	0.581	0.573	0.564	0.557	0.549	0.542	0.535	0.528	0.522	0.516	0.51	0.504	0.499	0.494				
34	0.612	0.601	0.59	0.58	0.57	0.561	0.552	0.544	0.536	0.529	0.522	0.515	0.508	0.502	0.496	0.49	0.484	0.479	0.473	0.468	0.463				
32	0.569	0.559	0.549	0.54	0.531	0.523	0.515	0.508	0.5	0.494	0.487	0.481	0.475	0.469	0.463	0.458	0.453	0.448	0.443	0.438	0.434				
30	0.528	0.518	0.51	0.501	0.493	0.486	0.479	0.472	0.465	0.459	0.453	0.447	0.442	0.437	0.431	0.426	0.422	0.417	0.413	0.408	0.404				
28	0.487	0.479	0.471	0.463	0.456	0.449	0.443	0.437	0.431	0.425	0.42	0.415	0.409	0.405	0.4	0.395	0.391	0.387	0.383	0.379	0.375				
26	0.447	0.44	0.433	0.426	0.42	0.414	0.408	0.402	0.397	0.392	0.387	0.382	0.378	0.373	0.369	0.365	0.361	0.357	0.353	0.35	0.346				
24	0.409	0.402	0.396	0.39	0.384	0.379	0.373	0.368	0.364	0.359	0.355	0.35	0.346	0.342	0.338	0.335	0.331	0.328	0.324	0.321	0.318				
22	0.371	0.365	0.359	0.354	0.349	0.344	0.339	0.335	0.331	0.327	0.323	0.319	0.315	0.312	0.308	0.305	0.302	0.299	0.296	0.293	0.29				
20	0.334	0.329	0.324	0.319	0.314	0.31	0.306	0.302	0.298	0.295	0.291	0.288	0.285	0.281	0.278	0.275	0.273	0.27	0.267	0.265	0.262				
18	0.297	0.293	0.289	0.285	0.281	0.277	0.273	0.27	0.267	0.263	0.26	0.257	0.254	0.252	0.249	0.246	0.244	0.241	0.239	0.237	0.235				
16	0.262	0.258	0.254	0.251	0.247	0.244	0.241	0.238	0.235	0.232	0.23	0.227	0.225	0.222	0.22	0.218	0.215	0.213	0.211	0.209	0.207				
14	0.227	0.224	0.221	0.218	0.215	0.212	0.209	0.207	0.204	0.202	0.2	0.197	0.195	0.193	0.191	0.189	0.187	0.186	0.184	0.182	0.18				
12	0.193	0.19	0.187	0.185	0.183	0.18	0.178	0.176	0.174	0.172	0.17	0.168	0.166	0.165	0.163	0.161	0.16	0.158	0.157	0.155	0.154				
10	0.159	0.157	0.155	0.153	0.151	0.149	0.147	0.146	0.144	0.142	0.141	0.139	0.138	0.136	0.135	0.134	0.132	0.131	0.13	0.129	0.128				

شکل ۱۱- تعیین گشودگی دریاچه قطاعی ورودی کانال W1 برای عبور دبی‌های مختلف و عملکرد یک دریاچه (بر حسب متر)

Fig. 11 – Determination of the opening of the radial gate at the inlet of W1 canal for various flow rates and the operation one gate (in meter)

معادله‌های پیشنهادی خلیلی شایان و همکاران Khalili (Shayan et al. 2021a,b) برای عملکرد آزاد و مستغرق دریاچه‌های قطاعی و تحت شرایط وجود کانال با مقطع

مستطیلی توسعه یافته است. در شرایط وجود کانال با مقطع دوزنقه‌ای در مقطع بالادست و پایین‌دست دریاچه، معادله

انرژی در حد فاصل قبل و پس از دریاچه و معادله مومنتم در حدفاصل پس از دریاچه تا مقطع پایاب، نیازمند بازنویسی است. در شرایط وجود تبدیل‌های اضافی در بالادست و

تعیین دبی از روش پیشنهادی نیازمند گزارش تراز سطح آب و گشودگی دریاچه است. درنتیجه و به‌منظور رصد پیوسته و برخاسته دبی عبوری از مقطع دریاچه در ساختمان

بهره‌برداری، نیاز به ارسال پیوسته اطلاعات تراز سطح آب و گشودگی دریچه است. به‌منظور ثبت و ارسال برخط داده‌های تراز سطح آب در بالادست دریچه‌های ورودی کانال اصلی غرب دز، سطح سنج ثابت VIGILEVEL، استفاده شد. VIGILEVEL دستگاهی است که به کمک قانون شناوری ارشمیدسی می‌تواند تغییرات سطح آب را اندازه‌گیری کند. شکل (۱۲) تصاویری از نصب سطح سنج ثابت VIGILEVEL در بالادست دریچه‌های ورودی کانال W1 را نشان می‌دهد. سطح سنج ثابت در مجاورت اشل موجود نصب شده است که شرایطی را برای مقایسه ارقام خروجی سطح سنج ثابت و اشل صحیح سطح آب به‌منظور تنظیم سطح سنج ثابت فراهم می‌کند.



شکل ۱۲- نصب سطح سنج ثابت VIGILEVEL در بالادست دریچه‌های ورودی کانال W1

Fig. 12 – Installation of the VIGILEVEL upstream of the W1 canal

به سامانه Water Query، ولتاژ باتری داخلی، ولتاژ باتری خارجی، پالس، دما، شناسه دستگاه و... است. مقادیر گشودگی دریچه‌های قطاعی چپ و راست ورودی کانال W1 پس از هر بار تغییر گشودگی دریچه توسط بهره‌بردار دریچه به شماره ۹۸۳۰۰۰۹۹۰۰۶۶۴۶۶۰ پیامک گردیده و در سامانه Water Query ثبت می‌گردد.

در سامانه Water Query، محاسبه دبی ورودی به کانال W1 دز با ورود رابطه ریاضی محاسبه دبی به‌صورت تابعی از تراز سطح آب بالادست و درصد گشودگی دریچه‌های چپ و راست ممکن است. معادله ریاضی وارده در این سامانه بر مبنای معادله‌های پیشنهادی طی مطالعه حاضر (معادله ۱)، استوار است. فرم این معادله برای محاسبه دبی کل ورودی به کانال W1 دز عبارت است از:

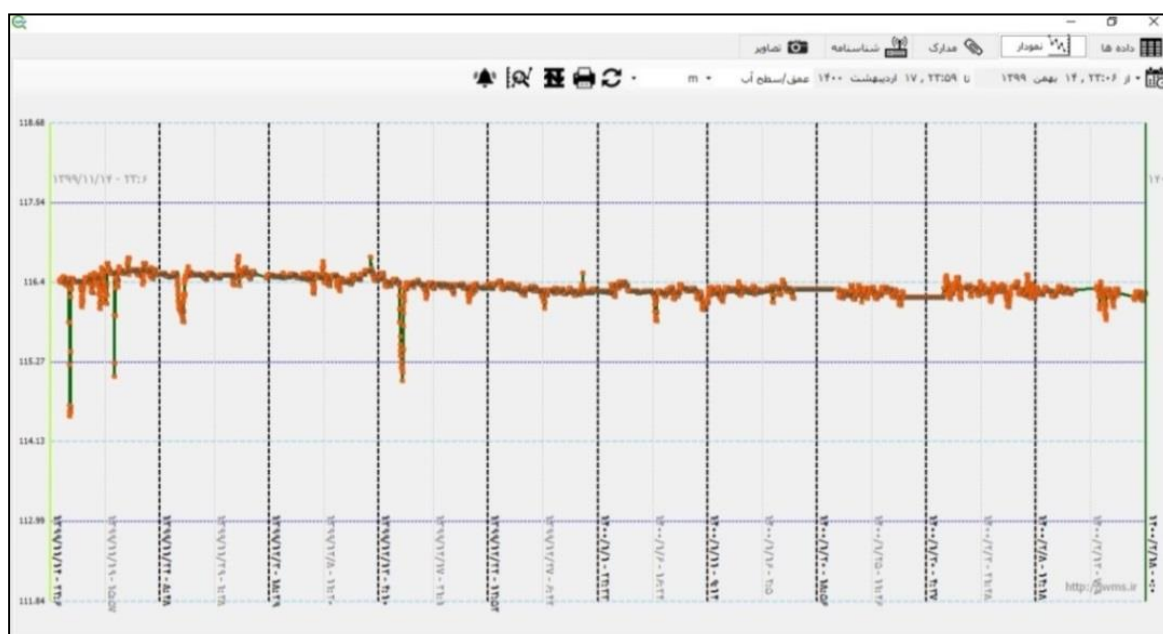
داده‌های VIGILEVEL می‌تواند به کمک یک نرم‌افزار کلاینت-سرور به نام Water Query مدیریت گردد. Water Query داده‌ها را بر اساس فرآیندی قانونمند و بدون دست‌کاری در پایگاه داده‌های خود نگهداری می‌کند. این برنامه شامل پردازش‌های چند موضوعی، دسترسی به بانک داده‌ها، مدیریت سطح دسترسی، نمایش داده‌ها در سامانه‌های مکان محور، مدیریت هشدارها و برنامه‌ریزی آن‌ها، قابلیت تعریف ایستگاه‌ها، نمایش داده به‌صورت نمودار، جدول و... است.

باوجود امکان ارسال اطلاعات توسط VIGILEVEL در بستر پیامک و GPRS، سطح سنج نصب‌شده در ورودی شبکه آبیاری غرب دز، اطلاعات را به‌صورت پیامکی می‌فرستد. اطلاعات شامل وزن روی حسگر مستغرق به‌منظور تبدیل به تراز سطح آب در بازه زمانی ۳۰ دقیقه یک‌بار

$$Q = ((0.94 * 15 * (9.81^{0.5}) * (X - 114)^{1.5}) * ((L * 3/100) / (X - 114)) * (2^{0.5}) * (0.03875 * (3.62/7)^{(9.39471 - 658.468 / (\text{ACOS}((3.62 - L * 3/100) / 7) * 180 / \text{PI}))) + 0.62944) / (1 + (0.03875 * (3.62/7)^{(9.39471 - 658.468 / (\text{ACOS}((3.62 - L * 3/100) / 7) * 180 / \text{PI}))) + 0.62944) * ((L * 3/100) / (X - 114)))^{0.5} + (0.94 * 15 * (9.81^{0.5}) * ((X - 114)^{1.5}) * ((R * 3/100) / (X - 114)) * (2^{0.5}) * (0.03875 * (3.62/7)^{(9.39471 - 658.468 / (\text{ACOS}((3.62 - R * 3/100) / 7) * 180 / \text{PI}))) + 0.62944) / (1 + (0.03875 * (3.62/7)^{(9.39471 - 658.468 / (\text{ACOS}((3.62 - R * 3/100) / 7) * 180 / \text{PI}))) + 0.62944) * ((R * 3/100) / (X - 114)))^{0.5}$$

که در آن، X تراز سطح آب بالادست برحسب متر، L درصد گشودگی دريچه قطاعی چپ و R درصد گشودگی دريچه قطاعی راست و Q دبی کل ورودی به کانال W1 دز (مجموع دبی دريچه‌های قطاعی چپ و راست) است.

شکل (۱۳) داده‌های سطح سنج ثابت به سامانه Water Query در بازه‌های زمانی ۳۰ دقیقه یک‌بار و نمودار پیوسته تغییرات سطح آب را در بالادست دريچه‌های ورودی کانال W1 نشان می‌دهد. از شروع راه‌اندازی سامانه Water Query و تجهیز دريچه‌های ورودی کانال W1 دز (۱۴ بهمن ماه ۱۳۹۹) تا روز ۱۸ اردیبهشت ۱۴۰۰، حداقل گشودگی دريچه چپ معادل صفر (بسته بودن دريچه) در تاریخ ۱۴۰۰/۰۱/۲۸ و حداکثر گشودگی دريچه چپ معادل ۲۶ درصد در تاریخ ۱۳۹۹/۰۱/۰۶ تا روز ۱۸ اردیبهشت ۱۴۰۰ حداکثر تراز سطح آب ۱۷ درصد است.



شکل ۱۳- تغییرات تراز سطح آب بالادست در ورودی کانال W1 دز با زمان در سامانه Water Query (ساعت ۲۲:۲۹ روز ۱۳۹۹/۱۱/۱۴ تا ساعت ۰۰:۰۰ روز ۱۴۰۰/۰۲/۱۸)

Fig. 13 – Variations in upstream water level over time in the Water Query system



شکل ۱۴- نمونه تغییرات درصد گشودگی دریچه قطاعی چپ ورودی کانال W1 دز با زمان در سامانه Water Query (ساعت ۲۲:۲۹ روز ۱۳۹۹/۱۱/۱۴ تا ساعت ۲۲:۵۹ روز ۱۴۰۰/۰۲/۱۷)

Fig. 14 – Example of opening percentage variations for the left gate at the W1 canal in the Water Query system

میانگین قدر مطلق خطای نسبی کمتر از ۴ درصد مدیریت گردید.

روش پیشنهادی علاوه بر عمده نقاط ورودی مجهز به دریچه‌های تنظیم در شبکه‌های مدرن آبیاری کشور، در برخی از نقاط تحویل کانال‌های آبیاری مجهز به دریچه با سیستم مناسب تنظیم گشودگی نیز می‌تواند به کار رود. این روش با صرف حداقل هزینه، تنها نیاز به تجهیز یک سطح سنج ثابت در بالادست سازه (و یک سطح سنج ثابت در پایین‌دست در صورت عملکرد مستغرق دریچه) دارد.

در حال حاضر ابزارهای الکترونیکی متنوعی برای سنجش پیوسته سرعت و دبی جریان در آبراهه‌های روباز مشتمل بر ابزارهای تماسی مبتنی بر فناوری‌های داپلری، تیکه‌نگار صوتی و زمان متغیر (مانند OTTSLD, H-ADCP, FATS, Kanalıs TT MT و Q-Eye PSC MT) و غیرتماسی مبتنی بر فناوری‌های سرعت‌سنجی تصویری ذرات در مقیاس بزرگ (LSPIV: Large Scale Particle Image Velocimetry) و راداری (مانند Discharge Keeper, OTT SVR و SOMMER) توسعه یافته است (Khalili Shayan et al., 2025).

با ارسال اطلاعات تراز سطح آب بالادست در بازه ۳۰ دقیقه یک‌بار و در دست داشتن داده‌های گشودگی دریچه‌های چپ و راست، دبی کل ورودی هر ۳۰ دقیقه یک‌بار در سامانه Water Query محاسبه می‌گردد. بر اساس سامانه Water Query، در بازه زمانی ساعت ۲۱:۴۹ روز ۱۳۹۹/۱۱/۱۴ (شروع راهاندازی سامانه) تا ساعت ۰۰:۴۹ روز ۱۴۰۰/۰۲/۲۱، حجم کل جریان سطحی ورودی کانال W1 طی ۹۶ روز ۲۰ ساعت ۵۱ دقیقه در حدود ۵۰۶/۶۴۰ میلیون مترمکعب است. بر اساس شکل (۱۵)، کل حجم جریان ورودی به کانال W1 دز بازه زمانی ساعت ۰۰:۰۰ روز ۱۳۹۹/۱۱/۱۵ (شروع راهاندازی سامانه) تا ساعت ۲۳:۵۹ روز ۱۴۰۰/۰۲/۲۱، حجم کل جریان سطحی ورودی کانال W1 طی ۹۷ روز و ۱۲ ساعت و ۰۲ دقیقه در حدود ۵۰۸/۰۲۹ میلیون مترمکعب است. حداقل دبی ورودی به کانال W1 دز معادل صفر در روز ۱۴۰۰/۰۱/۲۸، حداکثر دبی ورودی به کانال W1 دز در حدود ۸۹/۸ مترمکعب بر ثانیه در ساعت ۱۵:۴۹ روز ۱۴۰۰/۰۱/۰۵ و متوسط دبی ورودی در این بازه در حدود ۶۰/۳ مترمکعب بر ثانیه است. با اجرا شدن این راهکار، دبی جریان ورودی به شبکه مدرن آبیاری غرب دز بیش از نیم میلیارد مترمکعب طی کمتر از یک‌صد روز با



شکل ۱۵- نمودار تغییرات دبی کل ورودی به کانال W1 در سامانه Water Query (ساعت ۲۱:۲۹ روز ۱۴/۱۱/۱۳۹۹ تا ساعت ۰۰:۴۹ روز ۰۲/۱۸/۱۴۰۰)
Fig. 15 – Plot of total inflow rate to the W1 canal in the Water Query system

قطاعی کانال اصلی غرب دز (W1) و پس از مطالعه حاضر را نشان می‌دهد. دقت اندازه‌گیری گشودگی دریاچه با این حسگر ۱ درصد مقیاس کامل (F.S.)، فناوری آن وزنی و امکان ارسال اطلاعات در بستر پیامک و GPRS را داراست. از جدول (۴) ملاحظه می‌شود عمده ابزارهای الکترونیکی از نظر دقت اندازه‌گیری نسبت به روش هیدرولیکی (مطالعه حاضر)، به ویژه تحت عملکرد مستغرق دریاچه‌ها، اولویت دارند. در جدول (۴) کل هزینه لازم برای تجهیز اولیه و بهره‌برداری و نگهداری در ۲۳۱ نقطه ورودی از شبکه‌های آبیاری مدرن کشور مقایسه گردیده است. مشاهده می‌شود کل اعتبار مورد نیاز برای نصب و نگهداری از تجهیزات مورد استفاده در مطالعه حاضر برای ۲۳۱ نقطه ورودی حدود ۴۶۶ هزار دلار است. این مقدار برای روش‌های الکترونیکی سنجش پیوسته سرعت و دبی جریان ۵/۱-۲/۱ میلیون دلار برآورد می‌شود. بر این اساس استفاده از روش پیشنهادی طی مطالعه حاضر، نسبت به دیگر روش‌ها، هزینه تجهیز نقاط ورودی به شبکه‌های آبیاری مدرن کشور را حداقل در حدود ۱/۶ میلیون دلار (معادل ۳۷۵۰ میلیارد ریال)، کاهش خواهد داد.

جدول (۴)، روش پیشنهادی در این مطالعه (استفاده از ظرفیت دریاچه‌های تنظیم در ترکیب با حسگرهای پایش خودکار تراز سطح آب و گشودگی دریاچه) را به عنوان روشی هیدرولیکی در مقایسه با ابزارهای الکترونیکی سنجش مستقیم سرعت و دبی جریان در کانال‌های آبیاری و بر مبنای معیارهای مختلف مقایسه می‌کند. روش هیدرولیکی ارائه شده در مطالعه حاضر علاوه بر امکان اندازه‌گیری جریان از قابلیت تنظیم و کنترل جریان برخوردار است. با این حال روش‌های الکترونیکی یادشده صرفاً سنجش پیوسته‌ای از دبی جریان ارائه کرده است و کنترلی بر میزان آب عبوری ندارند. بررسی‌ها نشان می‌دهد ابزارهای سرعت‌سنج الکترونیکی مانند داپلری، راداری، زمان متغیر و H-ADCP، وارداتی هستند و ناپایداری‌هایی از منظر کاربرد این ابزار از نظر پشتیبانی پیوسته از تجهیزات و شرایط تحریمی کشور، در شبکه‌های آبیاری و زهکشی در دسترس است. با این حال حسگرهای مورد نیاز در روش پیشنهادی طی مطالعه حاضر برای سنجش تراز سطح آب (VIGILEVEL) و گشودگی دریاچه (VIGIGATE)، در سطح کشور به تولید انبوه رسیده است. شکل (۱۶) تصاویر نصب حسگر VIGIGATE به منظور سنجش خودکار گشودگی و نصب‌شده روی دریاچه‌های



شکل ۱۶- نصب حسگر VIGIGATE برای سنجش خودکار گشودگی دریچه‌های ورودی کانال W1

Fig. 16 – Installation of the VIGIGATE for automatic monitoring of the opening of the W1 canal

تحلیل حساسیت در تعیین دبی با استفاده از دریچه‌های تنظیم

دریچه‌ها به‌عنوان سازه‌های اندازه‌گیری جریان، موارد متعددی ممکن است رخ دهد که به دلایل مختلف مانند نقص در سیستم مانور دریچه یا کشیدگی در کابل بالابرنده دریچه باگذشت زمان، اندازه‌گیری میزان گشودگی دریچه با خطا یا عدم قطعیت مواجه گردد. در این حالت پرسش آن است که اگر در اندازه‌گیری گشودگی دریچه به دلایل گفته شده با عدم قطعیت مشخصی مواجه باشیم، اندازه‌گیری دبی و حجم جریان از دریچه با چه میزان عدم قطعیت همراه است؟

هر سازه اندازه‌گیری دارای سطح معینی از دقت، صحت، خطا و عدم قطعیت است. برحسب تعریف، حساسیت نسبی متغیر وابسته عبارت است از میزان تغییر آن متغیر با تغییر مشخص در متغیرهای مستقل. آبگذری یک دریچه علاوه بر مشخصات هندسی سازه دریچه و کانال، تابعی است از عمق آب بالادست (و عمق آب پایین‌دست در شرایط جریان مستغرق) و میزان گشودگی دریچه. در کاربردهای عملی

جدول ۴- مقایسه روش پیشنهادی در مطالعه حاضر با روش‌های الکترونیکی در سنجش دبی در کانال‌های آبیاری

Table 4- Comparison of the proposed method in the present study with electronic methods for discharge measurement

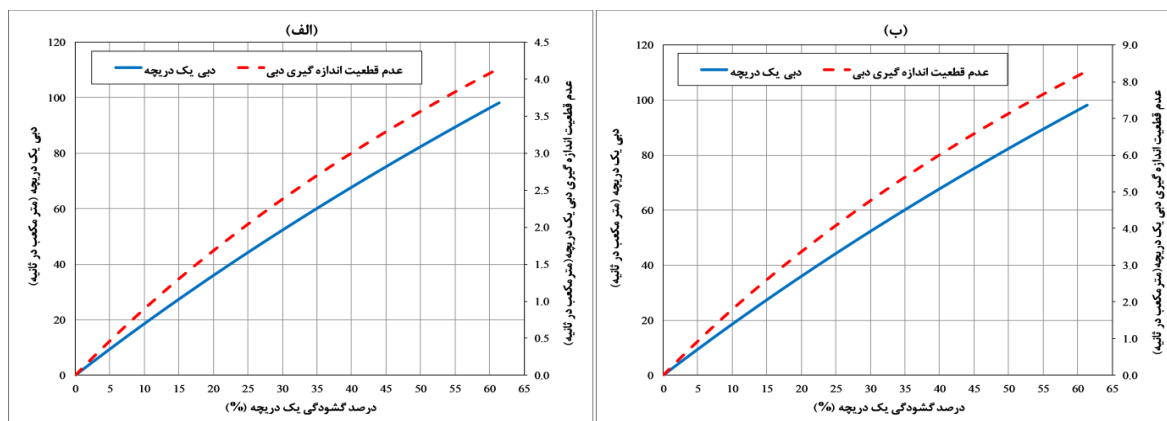
برآورد هزینه در مقیاس ۲۳۱ نقطه ورودی به شبکه‌های آبیاری مدرن (دلار)			متوسط خطا در اندازه‌گیری دبی (درصد)	تولید داخل و عدم نیاز به واردات (پایداری)	امکان کنترل جریان علاوه بر اندازه‌گیری جریان	روش
مجموع هزینه‌های اولیه و نگهداری طی ۵ سال	هزینه سالانه بهره‌برداری و نگهداری	هزینه اولیه				
466,000	46,600	233,000	5-10	+	+	روش هیدرولیکی (مطالعه حاضر)
2,097,000	209,700	1,048,500	2-8	-	-	روش‌های الکترونیکی
2,097,000	209,700	1,048,500	5-10	-	-	سنجش راداری
3,728,000	372,800	1,864,000	2-5	-	-	مستقیم و پیوسته سرعت (دو مسیره)
5,126,000	512,600	2,563,000	1-3	-	-	و دبی جریان H-ADCP

از گشودگی و عمق بالادست دریچه ممکن است. شکل (۱۷) نمونه تأثیر ۵ درصد و ۱۰ درصد عدم قطعیت در اندازه‌گیری گشودگی یک دریچه را در برآورد دبی دریچه قطاعی در ورودی کانال W1 غرب دز نشان می‌دهد. برای نمونه، در تراز سطح آب بالادست معادل ۱۱۶/۵ متر و به ازای گشودگی ۱۹ درصد یک دریچه، ۵ درصد و ۱۰ درصد عدم قطعیت در اندازه‌گیری گشودگی یک دریچه، به ترتیب سبب ۴/۷ درصد و ۹/۴ درصد عدم قطعیت در پیش‌بینی دبی دریچه ورودی کانال W1 خواهد شد. به ازای تراز سطح آب بالادست معادل ۱۱۶/۵ متر و به ازای گشودگی دریچه در بازه ثفر تا ۶۱ درصد درصد، نسبت عدم قطعیت در تعیین دبی دریچه ورودی کانال W1 به عدم قطعیت در اندازه‌گیری گشودگی دریچه، در بازه ۰/۸۴۵-۱ متغیر است. بر این اساس درصد عدم قطعیت در پیش‌بینی دبی دریچه همواره از درصد عدم قطعیت در اندازه‌گیری گشودگی دریچه کمتر است.

با در نظر گرفتن پارامترهای بی‌بعد به فرم $\lambda = \delta w / y_0$ و حساسیت نسبی دبی نسبت به گشودگی $F = Q / (B \sqrt{(gy_0^3)})$ دریچه عبارت است از (Khalili Shayan et al., 2021b):

$$S_{r(Q)} = \frac{\frac{\Delta Q}{Q}}{\frac{\Delta w}{w}} = \frac{(3\lambda - 2) - \lambda^3}{2(1 - \lambda)\{\lambda^2 - 1\}} \quad (23)$$

که در آن، w میزان گشودگی دریچه، y_0 عمق آب بالادست، Q دبی دریچه، ΔQ میزان تغییر دبی دریچه، Δw میزان تغییر گشودگی دریچه، و S_r حساسیت نسبی تعیین دبی دریچه نسبت به گشودگی است. از معادله (۲۳) و برای نمونه به ازای گشودگی نسبی دریچه معادل $w/y_0 = 0.6$ ، میزان حساسیت نسبی تعیین دبی در حدود ۰/۸۶۵ است. در نتیجه، اگر اندازه‌گیری میزان گشودگی دریچه با $\pm 3\%$ درصد عدم قطعیت همراه باشد، اندازه‌گیری میزان دبی دریچه با عدم قطعیتی در حدود $\pm 2/6\%$ درصد همراه است. با کاربرد معادله (۲۳) امکان تعیین میزان عدم قطعیت در پیش‌بینی دبی دریچه‌های قطاعی ورودی کانال W1 در هر ترکیب دلخواه



شکل ۱۷- عدم قطعیت در برآورد دبی یک دریچه ورودی کانال W1 در تراز سطح آب بالادست معادل ۱۱۶/۵ متر به ازای اندازه‌گیری گشودگی با (الف) ۵ درصد عدم قطعیت و (ب) ۱۰ درصد عدم قطعیت

Fig. 17- Uncertainty in the discharge estimation at an upstream water level of 116.5 m, based on opening measurements with (a) 5% uncertainty and (b) 10% uncertainty

قابلیت‌های کنترل سطح آب و اندازه‌گیری جریان برخوردار هستند. نتایج این مطالعه بر اساس اندازه‌گیری‌های صحرایی روی دریچه‌های ورودی کانال اصلی غرب دز نشان‌دهنده قابلیت کاربرد دریچه‌های تنظیم در تخمین میزان دبی تحویلی به پایین‌دست با درستی مناسب است. مشخص شد

نتیجه‌گیری

در مطالعه حاضر، کاربرد دریچه‌های تنظیم، سازه موجود در ورودی شبکه‌های آبیاری کشور به‌عنوان سازه اندازه‌گیری بررسی شده است. دریچه‌های تنظیم علاوه بر سادگی طرح و اینکه در غالب شبکه‌های آبیاری موجودند، هم‌زمان از

رابطه پیشنهادی بدون واسنجی محلی، قابلیت پیش‌بینی دبی ورودی به کانال اصلی شبکه آبیاری غرب دز را با میانگین قدرمطلق خطای نسبی کمتر از ۴ درصد داراست. با دریافت نقشه حین ساخت دریچه‌های ورودی غرب کانال غرب دز و با کاربرد معادلات انرژی و مومنتم، رابطه برآورد دبی دریچه به ازای ترکیب‌های مختلف از تراز سطح آب بالادست و درصد گشودگی دریچه استنتاج شد. علاوه بر آن، جدولی ارائه گردید که بر اساس آن درصد گشودگی موردنیاز دریچه برای عبور دبی مطلوب به پایین‌دست متناسب با نیاز آبی تعیین می‌شود.

پایش پیوسته دبی ورودی به شبکه آبیاری نیازمند رصد پیوسته تغییرات تراز سطح آب بالادست و درصد گشودگی هر دریچه است. در این مطالعه مشخص شد با نصب سطح سنج ثبات و برخط نوع VIGILEVEL و ارسال بهنگام اطلاعات تراز سطح آب بافاصله زمانی نیم ساعت یکبار به سامانه نرم‌افزاری Water Query و نیز ارسال درصد گشودگی دریچه‌های چپ و راست ورودی به شبکه پس از هر بار تغییر گشودگی توسط بهره‌بردار به سامانه، امکان رصد پیوسته تغییرات حجم جریان ورودی به شبکه آبیاری غرب دز وجود دارد. بر این اساس، طی ۹۷ روز از اجرای این مطالعه، حجم جریان ورودی به شبکه آبیاری غرب دز معادل ۵۰۸ میلیون مترمکعب با میانگین قدرمطلق خطای نسبی کمتر از ۴ درصد پایش گردید.

روش پیشنهادی بر پایه استفاده از ظرفیت دریچه‌های تنظیم و تنها با نصب سطح سنج ثبات، نسبت به ابزارهای الکترونیکی اندازه‌گیری دبی جریان در نقاط ورودی و تحویل شبکه‌های آبیاری مدرن، راهکاری ارزان قیمت و پایدار است. با توجه به مصرف سالانه حدود ۱۲ میلیارد مترمکعب آب در شبکه‌های آبیاری مدرن کشور و خطای متوسط اندازه‌گیری دبی ورودی به این شبکه‌ها به میزان ۱۵-۱۰ درصد در شرایط فعلی (Anon, 2019)، کاربرد روش پیشنهادی با میانگین قدرمطلق خطای نسبی کمتر از ۵ درصد، می‌تواند سالانه سبب مدیریت حجم آبی در حدود ۶۰۰ میلیون مترمکعب و صرفاً در شبکه‌های آبیاری مدرن کشور گردد. با

فرض قیمت آب‌بها معادل ۶۳۷۰ ریال در هر مترمکعب، حجم آب مدیریت‌شده در نتیجه بهبود خطای اندازه‌گیری از روش پیشنهادی، معادل با حدود ۳۸۰۰ میلیارد ریال آب‌بها در سال (بر اساس محاسبات سال ۱۴۰۴) است. استفاده از روش پیشنهادی در این مطالعه، نسبت به سایر روش‌ها، هزینه تجهیز نقاط ورودی به شبکه‌های آبیاری مدرن کشور را حداقل در حدود ۱/۶ میلیون دلار (معادل ۳۷۵۰ میلیارد ریال)، کاهش خواهد داد. روش پیشنهادی در نقاط ورودی آب به شبکه‌های آبیاری مدرن و نیمه مدرن و در نقاط تحویل مجهز به دریچه باقابلیت تنظیم گشودگی می‌تواند برای اندازه‌گیری جریان و در راستای استقرار تحویل حجمی موردتوجه قرار گیرد.

تضاد منافع نویسندگان

نویسندگان این مقاله اعلام می‌دارند که هیچ‌گونه تضاد منافی در خصوص نگارش و انتشار مطالب و نتایج این پژوهش ندارند.

منابع مالی

نویسندگان هیچ‌گونه حمایت مالی برای تحقیق، تألیف و انتشار این مقاله دریافت نکرده‌اند.

دسترسی به داده‌ها

همه اطلاعات و نتایج در متن مقاله ارائه شده است. مجموعه داده‌های مطالعه حاضر، در صورت درخواست، از نویسنده مسئول در دسترس هستند.

مشارکت نویسندگان

همه نویسندگان در طرح و ایده‌پردازی مطالعه مشارکت داشتند. تهیه مطالب، جمع‌آوری داده‌ها و تجزیه و تحلیل توسط همه نویسندگان انجام شد. پیش‌نویس اولیه مقاله توسط H.K.S نوشته شد و همه نویسندگان در مورد نسخه‌های قبلی مقاله (H.K.S, M.H.H.K و A.B.K) اظهارنظر کرده‌اند. اصلاحات نهایی توسط H.K.S اعمال شده است و علاوه بر این، همه نویسندگان نسخه نهایی مقاله را خوانده و تأیید کرده‌اند. همه نویسندگان به‌طور مساوی در مفهوم‌سازی مقاله و نوشتن پیش‌نویس‌های اولیه و بعدی مشارکت داشته‌اند.

تقدیر و تشکر

خوزستان در مهیاسازی شرایط بازدیدهای دوره‌ای از شبکه

نویسندگان از حمایت‌های شرکت مدیریت منابع آب آبیاری دز، قدردانی می‌نمایند.

ایران و شرکت بهره‌برداری از شبکه‌های آبیاری ناحیه شمال

منابع

- Anon. 2007. Guideline for volumetric water delivery in irrigation and drainage systems. Publication No. 384. Management and Planning Organization of Iran, Tehran, Iran (in Persian).
- Anon. 2020. Instructions on deliver water by volume in irrigation and drainage networks. Water Scarcity Adaptation National Workgroup, Tehran, Iran. (in Persian).
- Anon. 2023. Statistics and data from the third nationwide survey of water resources and consumption, Iran Water Resources Management Company, Tehran, Iran. (in Persian).
- Anon. 2019. Volumetric water delivery in line with consumption management, Iran Water Resources Management Company, Tehran, Iran. (in Persian).
- Anon. 2021. Selection and operation criteria for water measuring equipment in irrigation and drainage networks. Publication No. 833. Plan and Budget Organization, Tehran, Iran. (in Persian).
- Anon. 2004. Hydraulic design criteria for canals regulators and turnouts structures. Publication No. 282. Management and Planning Organization of Iran, Tehran, Iran (in Persian).
- Bonaiti, G., Karimov, A. & Fipps, G. (2018). A Simple Method for Calibrating a Radial Gate for Use as a Flow Measuring Device. *Applied Engineering in Agriculture*, 34(2), 379-388.
- Buyalski, C.P. (1983). Discharge algorithms for canal radial gates. United States Bureau of Reclamation, Denver, CO, USA. *Research Report REC-ERC-83-9*.
- Bijankhan, M., Ferro, V. & Kouchakzadeh, S. (2013). New stage-discharge relationships for radial gates. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 139 (5), 378-387.
- Clemmens, A.J., Strelkoff T.S. & Replogle J.A. (2003). Calibration of submerged radial gates. *Journal of Hydraulic Engineering*, 129(9), 680-687.
- Clemmens, A. & Wahl T. (2012). *Computational Procedures Used for Radial Gate Calibration in WinGate*. World Water and Environmental Resources Congress, May 20-24. Albuquerque, NM, USA.
- Clemmens, A.J. (2004). *Avoiding Submergence Transition Zone for Radial Gates in Parallel*. World Water and Environmental Resources Congress. June 27-July 1. Environmental and Water Resources Institute of the American Society of Civil Engineers, Salt Lake City, UT, USA.
- Fili, J., Abbaspour, S. & Daavi, H. (2009). *Investigating various remedial options and optimizing the Dez diversion dam*. 2nd Irrigation and Drainage Network Management National Conference, Jan. 20. Ahwaz, Iran. (in Persian).
- Khalili Shayan, H., Farhoudi, J. & Vatankhah R. (2021a). Experimental and field verifications of radial gates as flow measurement structures. *Water Supply*, 21(6): 3057-3079.
- Khalili Shayan, H., Farhoudi, J. & Vatankhah, R. (2021b). Solutions for Estimating Opening of Sluice and Radial Gates for Flow Regulation. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 147(3), 06021001 (1-13).
- Khalili Shayan, H., Zahedi Hamedani, R. & Behrooz, S. (2025). *Application of Modern Technologies in Surface Flow Measurements Based on Global Experiences*. Shiraz, Iran. Navideshiraz (in Persian).
- Metzler, D.E. (1948). A model study of tainter gate operation (M. Sc. Thesis), Iowa State University, Iowa City, IA, USA.
- Shahrokhnia, M.A. & Javan M. (2006). Dimensionless stage-discharge relationship in radial gates. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 132(2), 180-184.
- Toch, A. (1955). Discharge characteristics of Tainter gates. *Transactions of the American Society of Civil Engineers*, 120, 290-300.
- Wahl, T.L. (2005). Refined energy correction for calibration of submerged radial gates. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 131(6), 457-466.