

Energy loss for sluice gates under free and submerged flow conditions

Farzin Salmasi^{1*} 

1. Professor, Department of Water Engineering, Faculty of Agriculture, University of Tabriz, Tabriz, Iran.

Abstract

Sluice gates are commonly used to measure water discharge and to adjust the water level in open canals. Sluice gates can also be used at the crest of dam spillways for controlling floods. Estimation of head loss ($\Delta E/E_0$) and discharge coefficients (C_d) for a sluice gate is essential for the design of open canals. Depending on the downstream water level, free or submerged flow conditions may occur. Although there have been some investigations on C_d for sluice gates, a comprehensive literature review shows that there are no studies of $\Delta E/E_0$ (to the best knowledge of the authors). Knowledge of $\Delta E/E_0$ is necessary for the design of intakes and irrigation canal inverts. This study uses the physical model of sluice gate to introduce helpful charts for energy loss estimation. Experiments were conducted in the University of Tabriz, department of water engineering. A rectangular canal with length of 12 m, width of 0.5 m and height of 0.8 m was used. Vertical slide gate was installed at the 6 m from canal inlet to permit flow become uniform. Water circulation is carried out using a submerged pump. Water is pumped in a 4.5 m head tank and then enters to canal with pipes. Water level/depth was measured with a point gauge with 0.1 mm accuracy. Discharge was measured with a calibrated rectangular sharp crested weir. Experiments were carried out with different discharges and gate opening. Results show that ΔE for free flow is greater than that for submerged flow conditions. Meanwhile, discharge coefficients in a free flow are greater than those under submerged flow conditions. Relative energy losses ($\Delta E/E_0$) have a minimum value of 0.271 and a maximum value of 0.604. These high energy losses cannot be ignored in intake structures and canal-designing processes and their impact on minor canal inverts receiving water from main canals should be considered. The relative energy loss changed from the minimum value of 0.271 to the maximum value of 0.604. Multivariate regression method was used to calculate the relative energy loss and the average of the residuals was -0.004. The maximum and minimum residuals for $\Delta E/E_0$ are 5 and -0.31, respectively. A mathematical equation with a coefficient of determination of 0.925 was presented to separate the boundary of free flow from submerged flow. To estimate the discharge coefficient in submerged flow, a mathematical equation was obtained. For this equation, the average of the residuals was -0.004. The maximum and minimum residuals for the discharge coefficient are -0.084 and 0.116, respectively. Application of multiple non-linear regression (MNR) models are presented for predicting $\Delta E/E_0$ and C_d . The high energy losses cannot be ignored in intake structures and canal designing processes. Their impact on minor canal inverts receiving water from main canals should be considered. Application of MNR was presented from a simple equation to more sophisticated equations by improving regression relations in each step. The MNR method provides accurate equations for predicting performance for both ΔE and C_d .

Review History

Received: Jul 08, 2024

Revised: Sep 16, 2024

Accepted: Nov 24, 2024

Keywords

Head loss

Sluice gate

Multiple non-linear

regression

Submerged flow

Discharge coefficient

* Corresponding Author Email: salmasi@tabrizu.ac.ir - ORCID: 0000-0002-1627-8598

افت انرژی دریاچه‌های کشویی تحت شرایط جریان آزاد و مستغرق

فرزین سلماسی^{*۱}

۱. استاد، گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز، ایران، تبریز.

چکیده

تاریخچه داوری

معمولاً برای اندازه‌گیری دبی آب و تنظیم سطح آب در کانال‌های باز از دریاچه‌های کشویی استفاده می‌شود. برآورد افت انرژی نسبی ($\Delta E/E_0$) و ضریب دبی (C_d) یک دریاچه کشویی برای طراحی کانال‌های باز ضروری است. با در نظر گرفتن سطح آب پایین دست، ممکن است شرایط جریان آزاد یا مستغرق رخ دهد. اگرچه برخی از تحقیقات برای تعیین C_d برای دریاچه‌های کشویی انجام شده است، ولی بررسی منابع نشان می‌دهد که مطالعه‌ای در مورد $\Delta E/E_0$ وجود ندارد. دانستن $\Delta E/E_0$ برای طراحی آبگیرها و تعیین رقوم کف کانال آبیاری ضروری است. هدف این تحقیق، تعیین $\Delta E/E_0$ و C_d با استفاده از نتایج آزمایشگاهی است. نتایج نشان داد که افت انرژی را نمی‌توان در سازه‌های آبگیر و طراحی کانال نادیده گرفت و تاثیر آنها بر رقوم کف کانال‌های فرعی دریافت کننده آب از کانال‌های اصلی باید در نظر گرفته شود. افت انرژی نسبی از کمترین مقدار ۰/۲۷۱ تا بیشترین مقدار ۰/۶۰۴ تغییر نشان داد. برای محاسبه استهلاك انرژی نسبی از روش رگرسیون چند متغیره بهره برده شد و میانگین باقیمانده ها ۰/۰۰۴- بود. بیشترین و کمترین باقیمانده برای $\Delta E/E_0$ به ترتیب ۵ و ۰/۳۱- است. برای تفکیک مرز جریان آزاد از جریان مستغرق، یک معادله ریاضی با ضریب تعیین ۰/۹۲۵ ارائه شد. برای تخمین ضریب دبی در جریان مستغرق، یک معادله ریاضی برای این معادله، میانگین باقیمانده‌ها ۰/۰۰۴- بود. بیشترین و کمترین باقیمانده برای ضریب دبی به ترتیب ۰/۰۸۴- و ۰/۱۱۶ است. همچنین در این تحقیق، با استفاده از مدل‌های رگرسیون غیرخطی چند متغیره، اقدام به برآورد C_d و ΔE می‌شود که در طراحی خط پروژه کانال‌های روباز مورد استفاده است.

کلمات کلیدی

افت انرژی

دریاچه کشویی

رگرسیون غیرخطی چندگانه

جریان مستغرق

ضریب دبی

۱- مقدمه

متنوعی از اجرای عملی در کانال‌های آبیاری تا فعالیت‌های پژوهش محور در دانشگاه‌ها مد نظر بوده‌اند. برای نمونه، کوانگ و همکاران (۲۰۱۹) تحقیقی در خصوص آبیاری تناوبی در مزارع شالیزاری ویتنام را با استفاده از دریاچه‌های کشویی انجام دادند [5]. اکبری و همکاران (۲۰۱۹) از سرریزهای کلید پسانویی دریاچه‌دار^۱ (GPKW) برای افزایش ظرفیت تخلیه دبی سیل استفاده کردند [6]. در مطالعه آنها، نصب دریاچه روی سرریزهای

دریاچه کشویی سازه‌ای ساده است که معمولاً در کانال‌های آبیاری برای رساندن دبی معین از کانال اصلی به کانال‌های فرعی استفاده می‌شود. هنگامی که به این روش استفاده می‌شود، به عنوان ساختمان آبگیر شناخته می‌شود. همچنین می‌توان از دریاچه‌های کشویی در تاج سرریز سدها برای کنترل سیلاب‌ها استفاده کرد [1]. 2. صرف‌نظر از ساختمان ساده آنها، هیدرولیک دریاچه‌های کشویی پیچیده است [3, 4]. دریاچه‌های کشویی در کاربردهای

¹ Gated piano key weirs

می‌یابد [16]. ناصحی اسکویی و سلماسی (۱۳۹۱) از معادلات انرژی و اندازه حرکت برای جریان از زیر دریچه‌های کشویی استفاده کردند و این معادلات غیرخطی را به طور همزمان به صورت دستگاه معادلات حل کردند [17]. نتایج با نمودار هنری (۱۹۵۰) مقایسه شد و میانگین درصد مطلق خطا^۱ (MAPE) برابر ۲۱/۵۴ درصد به دست آمد. نقص مطالعه ناصحی اسکویی و سلماسی [17] این بود که آنها افت انرژی از دریچه‌های کشویی را نادیده گرفتند. وطن‌خواه و حسینی (۲۰۲۱) مقادیر دبی جریان از دریچه‌های گرد (ساخت شرکت آرمکو) را بررسی کردند [18]. این دریچه‌های به طور گسترده در کالیفرنیا و بسیاری از نقاط دیگر جهان برای کنترل جریان و اندازه گیری دبی مورد استفاده قرار می‌گیرند. آنها معادلات همگن از نظر ابعادی را برای تعیین دبی ارائه کردند. خلیلی شایان و همکاران. (۲۰۲۱) تعدادی معادلات تئوری برای محاسبه ضریب دبی از دریچه‌های قطاعی با استفاده از اصول انرژی و اندازه حرکت^۲ (E-M) را ارائه کردند [19]. معادلات پیشنهادی می‌تواند دبی را در شرایط جریان آزاد و مستغرق محاسبه کنند. حسینی و وطن‌خواه (۲۰۲۱) رابطه دبی-اشل برای دریچه‌های کشویی واقع در کانال‌هایی با مقطع دایره‌ای را بررسی کردند [20].

آزمایش‌های موجود بیشتر روی تعیین C_d برای جریان از طریق دریچه‌های کشویی بود. اما مطالعات بسیار محدودی در مورد تلفات انرژی ناشی از جریان زیر دریچه‌های کشویی وجود دارد. درک این افت انرژی در طراحی رقوم کف کانال‌های آبیاری مفید خواهد بود. برآورد افت انرژی برای محاسبات مربوط به رقوم کف کانال با متعادل کردن سطح آب در کانال‌های اصلی و فرعی مورد نیاز است. در این تحقیق، مدل فیزیکی از دریچه کشویی ساخته شد. داده‌های آزمایشگاهی با اندازه‌گیری دبی و عمق‌های جریان برداشت شد. سپس داده‌های آزمایشگاهی برای معرفی نمودارهای مفید برای برآورد افت انرژی استفاده شد. این نمودارها، چهار متغیر بی‌بعد C_d ، h_0/a ، h_2/a و ΔE را به هم مرتبط می‌کند. استخراج معادلات کاربردی با استفاده از روش رگرسیون غیرخطی چندگانه^۳ (MNR) از دیگر اهداف این پژوهش است.

کلید پیانویی (PKW) باعث افزایش دبی از سرریز شد و تأثیر مثبتی بر عملکرد سرریز نشان داد. قوش و همکاران (۲۰۱۴) تأثیر مثبت باز و بسته کردن دریچه بر عملیات شستشوی رسوبات انباشته شده در پشت سد را مطالعه کردند [7].

اردبرینک و همکاران (۲۰۱۴) از چند دریچه برای تنظیم تخلیه از رودخانه به دریا با استفاده از هر دو روش تجربی و محاسباتی استفاده کردند [4]. در آن مطالعه، تعداد دریچه‌های باز شده متفاوت بود و بازشدن‌های دریچه‌ها به طور خودکار کنترل شدند. بسیاری از پژوهشگران عملکرد هیدرولیکی دریچه‌های کشویی را مطالعه کرده‌اند. یکی از پارامترهای مهم ضریب دبی است. هنری (۱۹۵۰) نموداری را ارائه داد که نشان دهنده تغییرات ضرایب دبی (C_d) با ضریب بدون بعد h_0/a در شرایط جریان آزاد بود [8]. هنری (۱۹۵۰) همچنین جریان از زیر دریچه‌های کشویی در شرایط جریان مستغرق را بررسی کرد و تغییرات C_d با عوامل بی‌بعد h_0/a و h_2/a را نشان داد. در اینجا h_0 سطح آب بالادست، h_2 سطح آب پایین‌دست و a بازشدگی دهانه دریچه است. بعدها راجاراتنام و سوبرامانیا [9] دقت نمودار هنری (۱۹۵۰) برای تخمین C_d را تایید کردند. دریچه کشویی استوانه‌ای نوع دیگری از سرریز است که برای اندازه‌گیری دبی استفاده می‌شود. رامورتی و همکاران (۱۹۷۸) مطالعات تجربی را روی این سرریزها انجام دادند و ضرایب دبی را محاسبه کردند [10]. سوامی [11] و سوامی و همکاران [12] معادله‌ای را برای تعیین ضرایب دبی برای دریچه‌های کشویی عمودی برای شرایط جریان آزاد و مستغرق ارائه کردند. بر اساس تحقیقات دوآمارام و همکاران [13]، نوسانات عمق آب در کانال‌های آبیاری می‌تواند بر تخلیه از طریق دریچه‌های کشویی تأثیر بگذارد. آنها نشان دادند که تنظیم‌کننده جریان خودکار، تأثیرگذارتر از دریچه‌های کشویی معمولی است. بلاد و همکاران (۲۰۰۹) ضریب انقباض (C_c) را برای دریچه‌های کشویی با استفاده از معادله اندازه حرکت و معادله انرژی مورد مطالعه قرار دادند [14]. نتایج نشان داد که در جریان آزاد، $C_c=0.6$ با مطالعات قبلی مطابقت دارد. سیلوا و ریجو (۲۰۱۷) از روش‌های مختلف تخمین دبی مبتنی بر معادله بقای انرژی برای ارزیابی دبی در زیر یک دریچه برای جریان آزاد و شرایط جریان مستغرق استفاده کردند [15]. لی و همکاران (۲۰۱۸) نشان دادند که وقتی مقدار h_0/a کوچک است، با افزایش h_0/a ، C_d کاهش

¹ Mean absolute percentage error

² Energy and momentum

³ Multiple nonlinear regression

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- معادلات حاکم

با مراجعه به شکل (۱)، با متعادل کردن انرژی بین مقطع صفر در بالادست دریاچه با مقطع ۱ (بلافاصله پایین دست دریاچه)، به معادله بقای انرژی منجر می‌شود که می‌تواند به صورت زیر بیان شود:

$$h_0 + \frac{v_0^2}{2g} = h_1 + \frac{v_1^2}{2g} \rightarrow h_0 + \frac{q^2}{2gh_0^2} = h_1 + \frac{q^2}{2gh_1^2} \quad (1)$$

که در آن h_0 عمق آب بالادست، h_1 عمق در مقطع انقباض، v_1 = سرعت متوسط در مقطع انقباض، g شتاب گرانش و q دبی جریان از زیر دریاچه در واحد عرض کانال هستند.

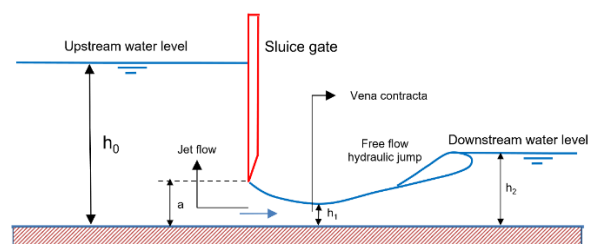
با مرتب سازی مجدد معادله (۱) و با ساده سازی، معادله (۲) بدست می‌آید.

$$h_0 - h_1 = \frac{q^2}{2g} \times \frac{h_0^2 - h_1^2}{h_0^2 h_1^2} \rightarrow q = h_0 h_1 \sqrt{\frac{2g}{h_0 + h_1}} \quad (2)$$

ضریب انقباض (C_c) به عنوان نسبت عمق آب در مقطع ۱ به بازشدگی دریاچه (a) تعریف می‌شود، یعنی $C_c = h_1/a$. بنابراین، با جایگزینی $h_1 = a \times C_c$ در معادله (۲)، خواهیم داشت:

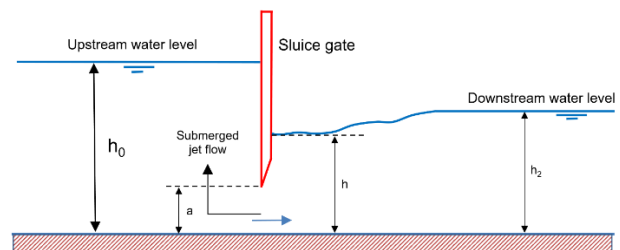
$$q = C_c a \sqrt{\frac{2gh_0^2}{h_0 + C_c a}} \rightarrow q = C_c a \sqrt{\frac{2gh_0}{1 + C_c \left(\frac{a}{h_0}\right)}} \quad (3)$$

که در آن C_c ضریب انقباض در مقطع ۱ است.



شکل ۱. وضعیت هیدرولیکی جریان آزاد از زیر دریاچه کشویی عمودی

Fig. 1. Free flow condition under the sluice gate



شکل ۲. شرایط جریان مستغرق برای یک دریاچه کشویی

Fig. 2. Submerged flow condition for a sluice gate

بیشتر محققین پذیرفته‌اند که مقدار $C_c = 0.61$ برای مسائل عملی به اندازه کافی دقیق است [11, 21, 22].

در معادله (۳)، افت انرژی ناشی از فاصله کوتاه بین مقاطع بالادست و پایین دست دریاچه نادیده گرفته می‌شود. اثر از دست دادن افت انرژی همراه با سایر آثار مانند سرعت غیریکنواخت در بخش انقباض و فشارهای غیر هیدرواستاتیک توسط ضریب دبی (C_d) محاسبه می‌شود. در معادله (۳)، C_d به صورت زیر تعریف می‌شود [10]:

$$C_d = \frac{C_c}{\sqrt{1 + C_c \left(\frac{a}{h_0}\right)}} \quad (4)$$

در نتیجه معادله شناخته شده برای محاسبه دبی را می‌توان به صورت زیر نوشت:

$$q = C_d a \sqrt{2gh_0} \quad (5)$$

از رابطه (۵) می‌توان برای دریاچه‌های قطاعی نیز استفاده کرد. با قبول $C_c = 0.61$ ، مطابق معادله (۳)، C_d تابعی از a/h_1 برای شرایط جریان آزاد است (شکل ۱).

هنگامی که عمق آب پایاب بالا می‌رود و بر عمق آب بالادست تأثیر می‌گذارد، دریاچه کشویی در شرایط مستغرق کار می‌کند. در این حالت، ضریب دبی در معادله (۵) هم به a/h_1 و هم به نسبت عمق پایین دست به بازشدگی دریاچه، یعنی h_2/a بستگی دارد. شکل (۲) شرایط مستغرق برای یک دریاچه کشویی عمودی را نشان می‌دهد.

یکی از شناخته شده‌ترین نمودار در مورد دریاچه کشویی، نمودار تعیین ضریب دبی توسط هنری [8] است. هنری (۱۹۵۰) یک نمودار طراحی برای تعیین C_d برای هر دو شرایط جریان آزاد و مستغرق ارائه کرد. نمودار هنری (۱۹۵۰) عامل بی بعد a/h_1 را به C_d مرتبط می‌کند و برای جریان مستغرق نیز عامل بی بعد h_2/a به عنوان متغیر سوم مهم تلقی شده است.

برخی از پژوهشگران سعی کرده‌اند تا معادلات رگرسیونی برای تخمین C_d را به عنوان جایگزینی برای نمودار هنری (۱۹۵۰) معرفی کنند. برای نمونه هندرسون [23] و سوامی [11] معادلات جداگانه‌ای برای این مسئله ارائه کردند. حبیب‌زاده و همکاران (۲۰۱۱) تحقیقی برای تعیین C_d با در نظر گرفتن تلفات انرژی در دریاچه‌های کشویی ارائه کردند [24]. آنها از یک ضریب تلفات

رگرسیون را برای پیش‌بینی نشت از کانال‌های خاکی بدون پوشش بتنی ارائه نمودند. اکبری و همکاران (۲۰۱۹) یک مدل رگرسیونی برای تخمین ضریب دبی برای سرریزهای کلید پیانویی دریاچه‌دار (GPKW) پیشنهاد کردند [6].

۲-۳- تجهیزات آزمایشگاهی

آزمایش‌های این تحقیق در آزمایشگاه هیدرولیک گروه مهندسی آب دانشگاه تبریز انجام گرفته است. سیستم تامین آب در این آزمایشگاه، شامل مخزن زیرزمینی است که به یک دستگاه الکترو پمپ عمودی مستغرق به قدرت ۱۰۰ اسب بخار مجهز است. این پمپ وظیفه پمپاژ آب به یک مخزن هوایی به ارتفاع ۴ متر را بر عهده دارد. مخزن هوایی از طریق سرریزی که در داخل آن تعبیه شده است، تامین کننده ارتفاع ثابت آب است. این سرریز آب اضافی مخزن هوایی را به مخزن زیرزمینی بر می‌گرداند و با این کار ارتفاع و در نتیجه دبی آب در سیستم چرخش ثابت می‌ماند. جریان پس از عبور از فلوم مستطیلی به سمت سرریز مثلثی واسنجی شده هدایت شده و به کمک این سرریز، اندازه‌گیری دبی جریان صورت می‌پذیرد. در نهایت آب پس از عبور از این سرریز، دوباره به سمت مخزن اصلی هدایت می‌شود.

فلوم آزمایشگاه مستطیلی شکل به طول ۱۰ متر، عرض ۲۵ سانتی‌متر و ارتفاع ۵۰ سانتی‌متر از جنس فلز با دیواره‌های شیشه‌ای است که این فلوم روی یک شاسی به ارتفاع ۱۱۰ سانتی‌متر از سطح زمین قرار گرفته و شیب فلوم ثابت و برابر با ۰/۰۰۲۲ می‌باشد. همچنین این فلوم در بالادست مجهز به سرریز است که در کف آن صفحه‌های مشبک وجود دارد. به این ترتیب تلاطم جریان ورودی به فلوم کاهش یافته و دقت اندازه‌گیری ارتفاع آب افزایش می‌یابد. آب اضافی در مواقع لازم سرریز کرده و از طریق لوله‌هایی دوباره به مخزن برگردانده شود. بیشترین جریان عبوری در فلوم ۴۰ لیتر بر ثانیه بوده و دبی جریان در این محدوده با دقت خوبی توسط شیرفلکه ابتدای فلوم قابل تنظیم است.

همچنین بار آبی بالادست و عمق آب پایین‌دست دریاچه به وسیله سطح سنج مستقر روی دیواره‌های فلوم اندازه‌گیری می‌شود. دقت اندازه‌گیری عمق آب توسط این تراز سنج ۰/۱ میلی‌متر است. جریان بعد از عبور فلوم، به درون حوضچه آرامش هدایت می‌شود

انرژی (k) در معادله انرژی بین دریاچه بالادست و پایین‌دست در مقطع انقباض جریان استفاده کردند. با ضرب k در هد سرعت، آنها این اتلاف را $kV^2/2g$ تعریف کردند، که در آن V_2 میانگین سرعت در مقطع انقباض جریان است. حبیب‌زاده و همکاران [24] با استفاده از داده‌های تجربی به دست آمده از تحقیق راجع به اتلاف سویرامانیا [25]، مقادیر k را ۰/۰۶۲ برای جریان آزاد و ۰/۰۸۸ برای شرایط جریان مستغرق بدست آوردند. برای آبیگرهای کانال که در آن از دریاچه کشویی استفاده می‌شود، تخمین افت انرژی بین بالادست و پایین‌دست آبیگرها مهم است. افت انرژی بر رقوم بستر کانال تأثیر می‌گذارد و بنابراین در طراحی خط پروژه کانال ضروری است.

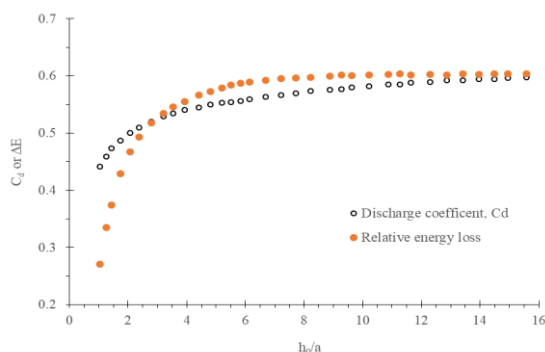
۲-۲- روابط ریاضی مبتنی بر رگرسیون غیرخطی چند متغیره (MNR)

بخشی از تحقیق حاضر به کاربرد تکنیک MNR برای بررسی همبستگی ریاضی پارامترهای بدون بعد h_2/a و h_0/a با عوامل C_d و ΔE اختصاص دارد. هدف به حداقل رساندن مجموع خطاهای مربع^۱ (SSE) است. علاوه بر SSE، ضریب تعیین^۲ (R^2) نیز به عنوان شاخصی برای همبستگی بین متغیرهای وابسته C_d یا ΔE و متغیرهای مستقل (h_2/a و h_0/a) استفاده می‌شود. بدین ترتیب که تعدادی از معادلات ریاضی غیرخطی برای پیش‌بینی C_d یا ΔE به گونه‌ای بررسی می‌شوند که کمترین SSE و بیشترین R^2 به دست آید. برای روشن شدن بیشتر، نمودار پراکندگی برای نشان دادن توزیع نقاط داده حول خط نیمساز ربع اول مختصات دکارتی ($y=x$) ترسیم شده است. مزیت معادلات رگرسیون این است که به کاربر اجازه می‌دهد تا به راحتی مقدار متغیر وابسته را بدون اتکا به ابزارهای گرافیکی که مستعد خطای درونیابی هستند محاسبه کند. برخی از کاربردهای معادلات غیرخطی در مباحث مهندسی در موارد زیر با تأکید بر کاربردهای مهندسی آب ارائه شده است:

سوامی [11] معادلات غیرخطی را برای پیش‌بینی C_d برای دریاچه‌های کشویی توصیه کرد. سلماسی و همکاران (۲۰۱۹) با موفقیت از روابط ریاضی رگرسیون برای پیش‌بینی ضرایب دبی برای دریاچه‌های قطاعی مجهز به آستانه در زیر دریاچه‌ها استفاده کردند [26]. در مطالعه دیگری، سلماسی و آبراهام [27] معادلات

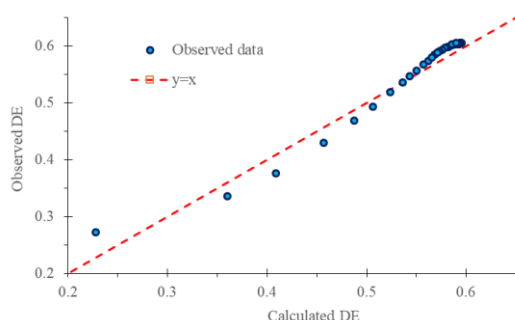
¹ Sum of square errors

² Determination coefficient



شکل ۳. تغییرات ضریب دبی (C_d) و افت انرژی نسبی (ΔE) با h_0/a برای شرایط جریان آزاد

Fig. 3. Variation of h_0/a vs. discharge coefficient (C_d) and relative energy loss (ΔE) for free flow conditions



شکل ۴. مقایسه مقادیر مشاهده شده و پیش بینی شده افت انرژی (توسط معادله ۹) برای شرایط جریان آزاد.

Fig. 4. Comparison of observed and prediction values of energy loss for free flow conditions.

شکل (۴) پراکندگی افت انرژی نسبی (ΔE) حاصل نقاط مشاهداتی و با استفاده از معادله (۹) را نشان می‌دهد. ملاحظه می‌شود که برای شرایط جریان آزاد، بیشتر نقاط داده در اطراف خط ۴۵ درجه ($y=x$) قرار دارند و توافق منطقی بین نقاط داده و معادله ریاضی (معادله ۹) قابل مشاهده است.

همان‌گونه که پیشتر ذکر شد، در شرایط جریان مستغرق، C_d تابعی از هر دو عامل h_0/a و h_2/a است که در آن h_2 عمق آب پایین‌دست است. این نوع جریان از زیر دریاچه، پیچیده‌تر از نوع جریان آزاد است و در مطالعات قبلی تعیین افت انرژی گزارش نشده است [29]. شکل (۵) تغییر ضریب دبی (C_d) در برابر h_0/a را برای شرایط جریان مستغرق نشان می‌دهد. محور افقی یک پارامتر بدون بعد است که با حاصل ضرب h_0/a و h_2/a تعریف می‌شود. این نمودار بسیار شبیه به نمودار هنری [8] است اما در آن محور x متفاوت است. هنری (۱۹۵۰) نموداری ارائه کرد که در آن برای محور x از عامل h_0/a استفاده شد. شاید مزیت شکل (۵) با

و سپس از حوضچه دارای آشغالگیر به درون حوضچه اندازه‌گیری دبی که در دیواره آن سرریز مثلی و اسنجی شده با زاویه راس ۵۳ درجه نصب شده است هدایت می‌شود. اندازه‌گیری دبی جریان به وسیله قرائت سطح آب درون چاهک توسط سطح سنجی که در کنار حوضچه اندازه‌گیری دبی قرار دارد و دارای دقت ± 0.1 میلی متر است، به دست می‌آید.

۳- نتایج و بحث

۳-۱- افت انرژی و ضریب دبی برای دریاچه‌های کشویی

انرژی ویژه در مقاطع بالادست (مقطع صفر) و پایین دست (مقطع ۱) دریاچه را می‌توان به ترتیب با معادلات (۶) و (۷) محاسبه کرد [2].

$$E_0 = h_0 + \frac{v_0^2}{2g} = h_0 + \frac{q^2}{2gh_0^2} \quad (6)$$

$$E_1 = h_1 + \frac{v_1^2}{2g} = h_1 + \frac{q^2}{2gh_1^2} \quad (7)$$

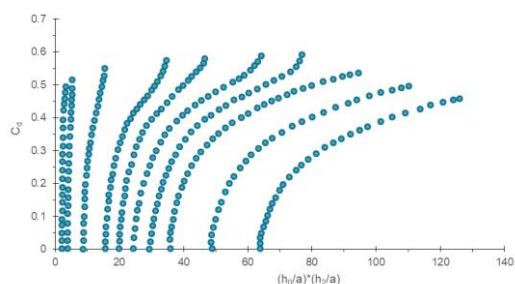
سپس افت نسبی انرژی را می‌توان از معادله (۸) بدست آورد.

$$\Delta E = \frac{E_0 - E_1}{E_0} \quad (8)$$

شکل (۳) تغییرات h_0/a در مقابل ضریب دبی (C_d) و افت انرژی نسبی (ΔE) در شرایط جریان آزاد را نشان می‌دهد. بر اساس شکل (۳)، ΔE دارای کمترین مقدار ۰/۲۷۱ و بیشترین مقدار ۰/۶۰۴ است. همانطور که مشاهده می‌شود، نمی‌توان این افت انرژی زیاد را در طراحی کانال‌ها و سازه‌های آبگیر نادیده گرفت. همبستگی بین افت انرژی نسبی با h_0 و a در معادله (۹) با ضریب تعیین $R^2=0.97$ بدست آمد.

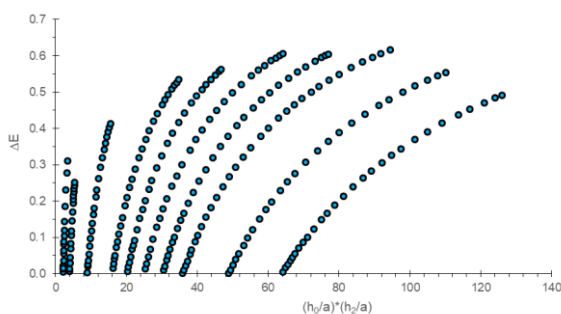
$$\Delta E = 0.604 \left(\frac{h_0 - a}{h_0 + 0.174a} \right)^{0.303} \quad (9)$$

در معادله (۹)، هنگامی که بازشدگی دریاچه (a) به h_0 نزدیک می‌شود، یعنی هیچ تفاوتی بین هد بالادست و پایین دست وجود ندارد، ΔE به صفر نزدیک می‌شود. از طرف دیگر، هنگامی که بازشدگی دریاچه (a) به صفر نزدیک می‌شود، ΔE کمترین مقدار آن ۰/۶۰۴ است. معادله (۹) از نقاط داده در شکل (۳) به دست آمده است. برای بدست آوردن رابطه ریاضی رگرسیونی از نرم افزار مایکروسافت آفیس اکسل استفاده شد.



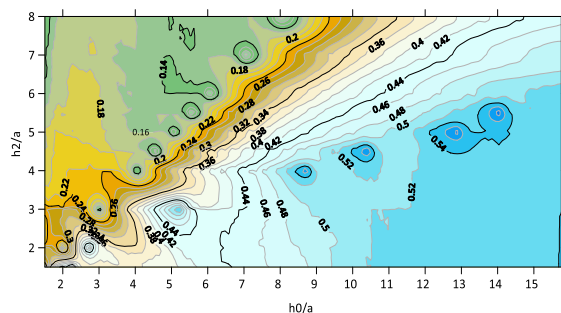
شکل ۵. تغییر ضریب دبی (C_d) با حاصل ضرب h_0/a و h_2/a برای شرایط جریان مستغرق

Fig. 5. Variation of discharge coefficient (C_d) with the product of h_0/a and h_2/a for submerged flow conditions



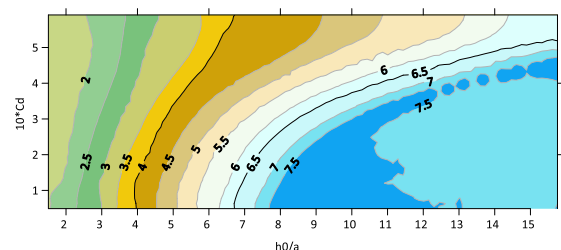
شکل ۶. تغییر اتلاف انرژی نسبی (ΔE) با حاصل ضرب h_0/a و h_2/a برای شرایط جریان مستغرق

Fig. 6. Variation of relative energy loss (ΔE) with the product of h_0/a and h_2/a for submerged flow conditions



شکل ۷. منحنی‌های کنتور ضریب دبی (C_d) در مقابل h_0/a و h_2/a

Fig. 7. Contours of discharge coefficient (C_d) vs. h_0/a and h_2/a



شکل ۸. منحنی‌های کنتور h_2/a در مقابل ضریب دبی (C_d) و h_0/a

Fig. 8. Contours of h_2/a vs. discharge coefficient (C_d) and h_0/a

توجه به نمودار هنری (۱۹۵۰) این باشد که نمودار هنری (۱۹۵۰) یک نمودار سه بعدی شامل: C_d ، h_0/a و h_2/a است اما در قالب ۲ بعدی نمایش داده شده است (C_d به عنوان محور h_0/a ، h_2/a به عنوان محور x و h_2/a به عنوان منحنی‌های کنتور). در همین حال، شکل (۵) یک نمودار دو بعدی واقعی با C_d به عنوان محور y و $h_0 \times h_2/a^2$ به عنوان محور x است. بنابراین، استفاده از شکل (۵) برای پیش‌بینی C_d آسان‌تر از نمودار هنری (۱۹۵۰) است. شکل (۶) تغییر افت انرژی نسبی (ΔE) در برابر $h_0 \times h_2/a^2$ را برای جریان مستغرق نشان می‌دهد. سوامی (۱۹۹۲) شرایط جریان مستغرق را با استفاده از معیار نشان داده شده در معادله (۱۰) تعریف کرد.

شکل‌های (۷ و ۸) به ترتیب خطوط کنتور برای ضریب دبی (C_d) و h_2/a را نشان می‌دهد. اگرچه به نظر می‌رسد شکل (۸) بسیار شبیه به نمودار هنری (۱۹۵۰) است، ولی استفاده از شکل (۷) آسان‌تر است. با دانستن h_0/a و h_2/a می‌توان به راحتی C_d را مستقیماً از شکل (۷) بدون هیچ گونه درونیابی تعیین کرد. در همین حال، استفاده از شکل (۸) نیاز به درونیابی بین منحنی‌های h_2/a دارد. لازم به ذکر است که برای نمایش بهتر، مقادیر مربوط به محور عمودی در شکل (۸) در عدد ۱۰ ضرب شده است.

شکل (۹) منحنی‌های کنتور افت انرژی نسبی (ΔE) در مقابل h_0/a و h_2/a را نشان می‌دهد. برای مقادیر ثابت عمق آب پایاب و بازشدگی دریچه ($h_0 = \text{ثابت}$)، افزایش هد بالادست (h_0) منجر به افزایش ΔE می‌شود (قسمت پایین سمت راست در شکل ۹). در همین حال، دریچه کشویی ممکن است با افت انرژی نسبتاً بالایی مواجه شود، حتی زمانی که h_0/a مقدار کمی دارد. این می‌تواند زمانی رخ دهد که h_2/a کوچک باشد. هر گونه افزایش در h_0 یا کاهش در a ، شدت جت خروجی را از دریچه بهبود می‌بخشد. این جت خروجی به آب پایین دست ضربه می‌زند که باعث افت انرژی می‌شود. عمق زیاد آب در پایاب دریچه، تلاطم جت خروجی را کنترل می‌کند و نرخ افت انرژی را کاهش می‌دهد.

تحقیق حاضر نشان داد که افت انرژی یک متغیر است و به h_0/a و h_2/a بستگی دارد (شکل ۹). اندازه‌گیری h_0 ، h_2 و a آسان‌تر از محاسبه V_2 است که توسط حبیب‌زاده و همکاران [24] مشخص شده است. شکل (۹) منحنی‌های کنتور افت انرژی نسبی (ΔE) در مقابل h_0/a و h_2/a را نشان می‌دهد و این نمودار در مطالعات قبلی دیده نشده است.

شکل (۹)، منطقه‌ای که نیاز به بررسی بیشتر دارد، منطقه‌ای را بدون نقاط معرف کافی نشان می‌دهد. چنین کمبودی از داده‌ها بین $h_2/a=4.3$ و $h_0/a=5.9$ تا $h_2/a=4$ وجود دارد. به نظر می‌رسد که داده‌های آزمایشگاهی بیشتری برای شناسایی دقیق مرز بین شرایط جریان آزاد و مستغرق مورد نیاز است.

$$\frac{h_2}{a} > 1.725 \left(\frac{h_0}{a} \right)^{0.437} \quad (12)$$

۳-۲- استخراج معادله ریاضی با استفاده از رگرسیون غیرخطی

چندگانه (MNR)

الف- معادله ریاضی ضریب دبی

مدل MNR برای تخمین ضرایب دبی در شرایط جریان مستغرق استفاده شد. نرم افزار انتخاب شده برای این تحلیل، Microsoft Office Excel بود. سلول هدف در اکسل طوری تنظیم شده است که مجموع مربع خطاها (SSE) را به حداقل برساند. SSE به صورت معادله (۱۳) تعریف می‌شود.

$$SSE = \sum_{i=1}^n (O_i - P_i)^2 \quad (13)$$

که در آن O_i مقدار مشاهده شده به دست آمده از آزمایش‌ها، P_i مقدار پیش‌بینی شده از MNR و n تعداد مشاهدات است.

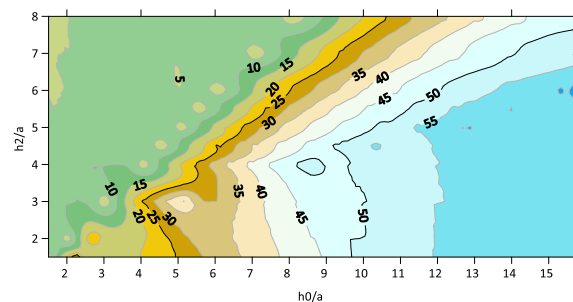
هیچ روش استاندارد برای تخمین اولیه مدل MNR وجود ندارد. برای شروع رویکرد فعلی، یک تابع کسری به صورت معادله (۱۴) استفاده شد که دقت آن با افزودن عبارت‌های بیشتر در معادله پیشنهادی بهبود یافته است. برای اولین تلاش، معادله (۱۴) با هشت ثابت مجهول پیشنهاد شده است.

$$C_d = \frac{A \left(\frac{h_0}{a} \right)^B + C \left(\frac{h_2}{a} \right)^D}{E \left(\frac{h_0}{a} \right)^F + G \left(\frac{h_2}{a} \right)^H} \quad (14)$$

با به حداقل رساندن SSE، ثابت‌های مجهول معادله (۱۴) تعیین می‌شوند و معادله (۱۵) تخمینی از ضریب دبی را بر اساس مدل MNR ارائه می‌دهد. ضریب تعیین $R^2=0.941$ و مجموع مربع خطاها (SSE) برای معادله (۱۵) برابر ۰/۴۹۱ است.

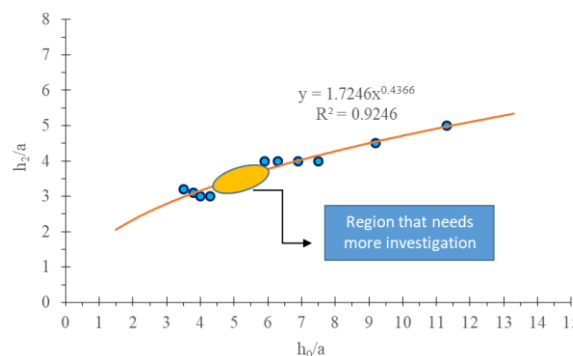
$$C_d = \frac{1.359 \left(\frac{h_0}{a} \right)^{7.986}}{2.245 \left(\frac{h_0}{a} \right)^{8.068} + 4.427 \left(\frac{h_2}{a} \right)^{8.625}} \quad (15)$$

معادله ۱۵ شامل شرایط جریان آزاد و مستغرق است و برای



شکل ۹. کنتورهای افت انرژی نسبی (ΔE) در مقابل h_0/a و h_2/a

Fig. 9. Contours of relative energy loss (ΔE) vs. h_0/a and h_2/a



شکل ۱۰. داده‌های مورد استفاده برای شناسایی جریان آزاد (زیر منحنی) و

جریان مستغرق (بالای منحنی) بر اساس دو متغیر h_0/a و h_2/a

Fig. 10. Data used to identify free flow (below curve) and submerged flow (above curve) based on two variables of h_0/a and h_2/a

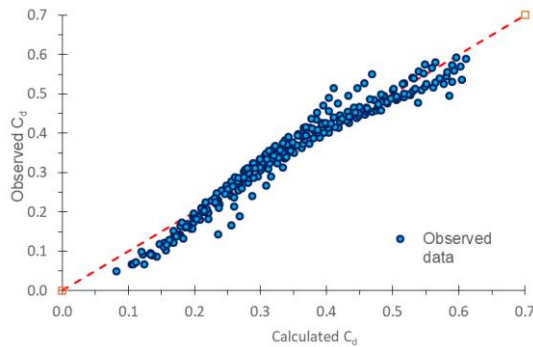
در شکل (۹)، منحنی‌های کنتور افت انرژی (ΔE)، تشخیص جریان آزاد از شرایط جریان مستغرق را ممکن می‌سازد. این ایده از معادله (۱۰) بدست می‌آید که برای اولین بار توسط سوامی [11] استفاده شد.

$$h_2 < h_0 < 0.81 h_2 \left(\frac{h_2}{a} \right)^{0.72} \quad (10)$$

بازآرایی معادله (۱۰)، معادله (۱۱) را به دست می‌دهد.

$$\frac{h_2}{a} > 1.13 \left(\frac{h_0}{a} \right)^{0.581} \quad (11)$$

با انتخاب نقاطی که منحنی‌های ΔE تغییر جهت می‌دهند (شکل ۹) و با برازش منحنی در این نقاط، معادله (۱۲) به دست می‌آید و با رابطه سوامی [11] (معادله ۱۰ یا ۱۱) قابل مقایسه است. شکل (۱۰) این نقاط انتخاب شده را نشان می‌دهد که برای تمایز بین جریان آزاد و مستغرق استفاده می‌شود. رابطه (۱۲) با ضریب تعیین $R^2=0.9246$ رابطه ارجح است. هر نقطه بالاتر از منحنی ارائه شده در شکل (۱۰)، شرایط مستغرق بودن را نشان می‌دهد و هر نقطه زیر منحنی، بیانگر شرایط جریان آزاد است. در



شکل ۱۲. نمودار پراکندگی برای ضریب دبی (C_d) در شرایط جریان مستغرق با استفاده از مدل MNR (معادله ۱۶)

Fig. 12. Scatter plot for discharge coefficient (C_d) under submerged flow condition using the MNR model (Eq. 16)

$$C_d = \frac{0.015 \left(\frac{h_0}{a}\right)^{0.017}}{0.036 \left(\frac{h_2}{a}\right)^{1.283}} + 0.217 \left(\frac{h_0}{a} - \frac{h_2}{a}\right)^{0.403} \quad (17)$$

$$+ 0.001 \times \frac{h_0}{a} \times \frac{h_2}{a}$$

معیارهای دقت در معادله (۱۷) برابر $R^2=0.903$ و $SSE=0.544$

هستند. گنجاندن ترم حاصل ضرب در معادله (۱۷) دقت را بهبود نداد. ضریب بسیار کوچک (۰،۰۰۱) و همچنین مقادیر R^2 و SSE این را را تأیید می کند. شکل (۱۳) نمودار پراکندگی ضریب دبی در شرایط جریان مستغرق را با استفاده از مدل MNR ارائه می دهد (معادله ۱۷). تلاش چهارم برای نادیده گرفتن عبارت حاصل ضرب، یعنی $(h_0/a)(h_2/a)$ در معادله (۱۷) انجام شد. اما شامل جمله دوم گویا/کسری با $(h_0/a) - (h_2/a)$ در صورت کسر و h_0/a در مخرج است. رابطه نهایی به صورت معادله (۱۸) به دست آمد.

$$C_d = \frac{0.312 \left(\frac{h_0}{a}\right)^{1.220}}{1.569 \left(\frac{h_2}{a}\right)^{2.387}} + \frac{0.729 \left(\frac{h_0}{a} - \frac{h_2}{a}\right)^{0.570}}{\left(\frac{h_0}{a}\right)^{0.635}} \quad (18)$$

دقت معادله (۱۸) برابر $R^2=0.992$ و $SSE=0.048$ بدست آمد.

با استفاده از این رویکرد، بهبود عالی در ترم R^2 و SSE مشاهده می شود. شکل (۱۵) تغییرات باقیمانده برای محاسبه ضریب دبی در مقابل داده های جریان مستغرق را با استفاده از مدل MNR نشان می دهد. در اینجا باقیمانده ها با تفاوت مقادیر دبی محاسبه شده و اندازه گیری شده تعریف می شوند. میانگین باقیمانده ها $-۰/۰۰۴$ بود. بیشترین و کمترین باقیمانده برای ضریب دبی به ترتیب $-۰/۰۸۴$ و $۰/۱۱۶$ است. شکل (۱۴) نمودار پراکندگی ضرایب دبی در شرایط جریان مستغرق با استفاده از معادله (۱۸) را نشان

محدوده $1 < h_0/a < 16$ و $1 < h_2/a < 8$ معتبر است. شکل (۱۱) نمودار پراکندگی ضرایب دبی در شرایط جریان مستغرق با استفاده از مدل MNR را نشان می دهد (معادله ۱۵). شکل یک منحنی شکل S را با نقاط داده حول خط ۴۵ درجه ($y=x$) را نشان می دهد. وسط این منحنی S شکل با خط ۴۵ درجه منطبق است، اما دو دم از خط جدا می شوند. بنابراین، برخی بهبودها برای آزمایش معادله رگرسیون دیگری مورد نیاز است.

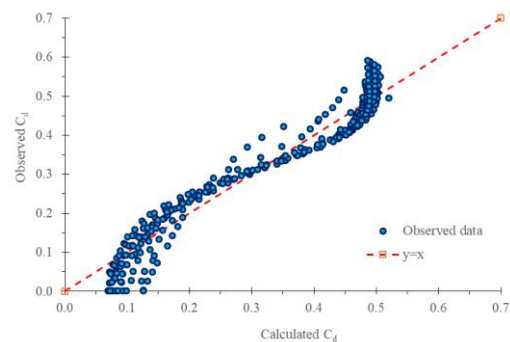
برای تلاش دوم، معادله (۱۵) با اضافه کردن اختلاف هد بین مقاطع بالادست و پایین دست (h_0-h_2)، بهبود داده شد. همانطور که در اینجا نشان داده شده است معادله ۱۶ تخمین C_d را بر اساس مدل MNR ارائه می دهد. ضریب تعیین معادله (۱۶) برابر $R^2=0.952$ و مجموع مربعات خطا (SSE) برابر $۰/۲۵۵$ بدست آمد.

$$C_d = \frac{0.525 \left(\frac{h_0}{a}\right)^{1.701}}{1.566 \left(\frac{h_2}{a}\right)^{2.999}} + 0.202 \left(\frac{h_0}{a} - \frac{h_2}{a}\right)^{0.337} \quad (16)$$

شرایط دقت بهبود یافته R^2 و SSE برای معادله (۱۶) در مقایسه

با معادله (۱۵) واضح است. شکل (۱۲) نمودار پراکندگی ضرایب دبی در شرایط جریان مستغرق با استفاده از مدل MNR را نشان می دهد (معادله ۱۶). افزودن عبارت اختلاف هدها ($h_0/a-h_2/a$) دقت رابطه ریاضی (مدل MNR) را افزایش داد. داده های به دست آمده در مقایسه با شکل (۱۱) به خط ۴۵ درجه نزدیک تر است، اما یک اختلاف باقی مانده در دو انتهای شکل (۱۲) وجود دارد.

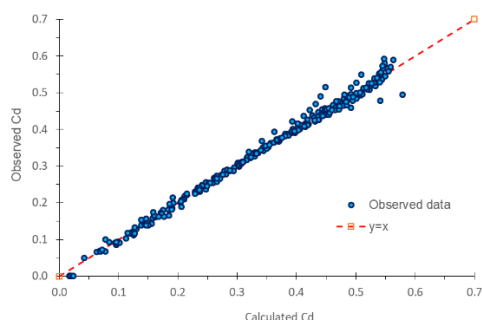
تلاش سوم برای گنجاندن حاصل ضرب دو پارامتر بدون بعد یعنی $(h_0/a) \times (h_2/a)$ انجام شد. رابطه نهایی به صورت معادله (۱۷) به دست آمد.



شکل ۱۱. نمودار پراکندگی برای ضریب دبی (C_d) در شرایط جریان مستغرق

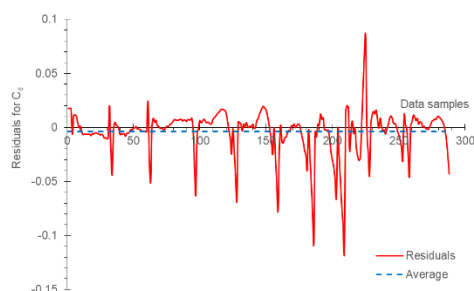
با استفاده از مدل MNR (معادله ۱۵)

Fig. 11. Scatter plot for discharge coefficient (C_d) in submerged flow condition using the MNR model (Eq. 15)



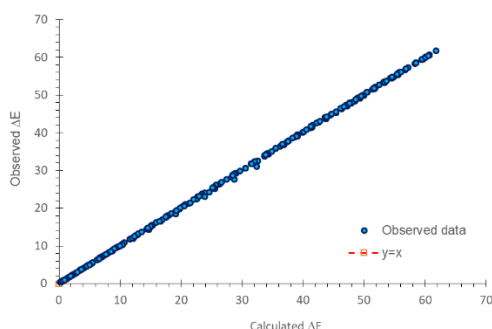
شکل ۱۴. نمودار پراکندگی برای ضریب دبی (C_d) تحت شرایط جریان مستغرق با استفاده از مدل MNR (معادله ۱۸)

Fig. 14. Scatter plot for discharge coefficient (C_d) under submerged flow conditions using the MNR model of Eq. (18)



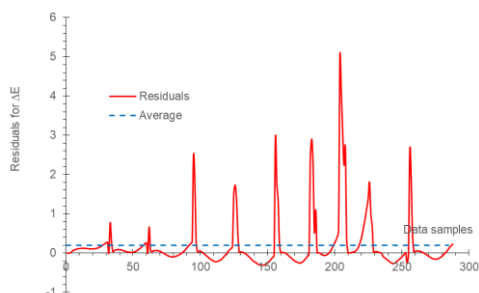
شکل ۱۵. باقیمانده برای C_d با استفاده از مدل MNR

Fig. 15. Residuals for C_d using the MNR model



شکل ۱۶. پراکندگی افت انرژی نسبی (ΔE) در جریان مستغرق با استفاده از مدل معادله (۱۹) و داده‌های مشاهداتی

Fig. 16. Scatter plot for relative energy loss (ΔE) in submerged flow using the MNR model of Eq. (19)



شکل ۱۷. مقادیر باقیمانده‌ها برای محاسبه C_d با استفاده از مدل رگرسیونی غیرخطی معادله (۱۹)

Fig. 17. Residuals for C_d using the MNR model of Eq. (19)

می‌دهد. شکل S توزیع نقطه داده در شکل (۱۱) و برخی اختلافات در شکل‌های (۱۲ و ۱۳)، در شکل (۱۴) ناپدید شده‌اند. تقریباً تمام نقاط داده نزدیک خط $y=x$ قرار می‌گیرند و توافق خوبی بین معادله پیشنهادی (معادله ۱۸) و مقادیر مشاهده شده C_d وجود دارد.

ب- معادله ریاضی افت انرژی

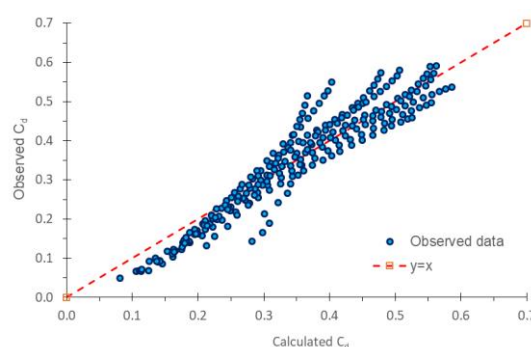
با در نظر گرفتن تجربه به دست آمده در استخراج C_d در معادله (۱۸)، دوباره مجموع دو تابع کسری در نظر گرفته شد. با به حداقل رساندن SSE، ضرایب ترم اول برابر با صفر شد. رابطه حاصل در معادله (۱۹) ارائه شده است. دقت معادله (۱۹) بر حسب R^2 و SSE به ترتیب ۰/۹۹۹ و ۱۰/۱۸۴ هستند. باید توجه داشت که ΔE به صورت درصد (%) محاسبه می‌شود. شکل (۱۶) نمودار پراکندگی افت انرژی نسبی (ΔE) در شرایط جریان مستغرق با استفاده از مدل MNR را نشان می‌دهد. تطابق عالی بین داده‌های مشاهده شده با معادله ریاضی (۱۹) دیده می‌شود.

شکل (۱۷) تغییرات باقیمانده برای ΔE در مقابل داده‌های جریان مستغرق را با استفاده از معادله (۱۹) را نشان می‌دهد. میانگین باقیمانده‌ها $-۰/۰۰۴$ بود. بیشترین و کمترین باقیمانده برای ΔE به ترتیب ۵ و $-۰/۳۱$ است.

شکل (۱۸) منحنی‌های افت انرژی نسبی (ΔE) در مقابل h_0/a و h_2/a با استفاده از معادله رگرسیون (۱۹) را ارائه می‌کند.

$$\Delta E = \frac{92.158 \left(\frac{h_0}{a} - \frac{h_2}{a} \right)^{0.985}}{\left(\frac{h_0}{a} \right)^{0.958}} \quad (19)$$

در شکل (۱۸)، ناحیه‌ای با افت انرژی کمتر از ۲۰ درصد مشخص شده است. این منطقه می‌تواند برای طراحی مهندسی مفید باشد.



شکل ۱۳. نمودار پراکندگی برای ضریب دبی (C_d) در شرایط جریان مستغرق با استفاده از مدل MNR (معادله ۱۷)

Fig. 13. Scatter plot for discharge coefficient (C_d) in submerged flow condition using the MNR model from Eq. (17)

$$.5 - \frac{19.94}{100} - 1.2 = 100.1006 \text{ m from MSL}$$

ضریب دبی دریچه کشویی (C_d) به صورت زیر محاسبه

می شود:

$$Eq. (18) \rightarrow C_d = \frac{0.312 \left(\frac{h_0}{a}\right)^{1.220} + 0.729 \left(\frac{h_0 - h_2}{a}\right)^{0.570}}{1.569 \left(\frac{h_2}{a}\right)^{2.387} + \left(\frac{h_0}{a}\right)^{0.635}}$$

$$\rightarrow C_d = \frac{0.312 \left(\frac{1.5}{0.2}\right)^{1.220} + 0.729 \left(\frac{1.5 - 1.2}{0.2}\right)^{0.570}}{1.569 \left(\frac{1.2}{0.2}\right)^{2.387} + \left(\frac{1.5}{0.2}\right)^{0.635}} = 0.288$$

در نهایت، دبی در واحد عرض کانال مطابق زیر محاسبه

می شود:

$$q = C_d a \sqrt{2gh_0} = 0.288 \times 0.2 \times \sqrt{2 \times 9.81 \times 1.5}$$

$$= 0.952 \frac{m^2}{s}$$

نمونه‌های دیگری طرح و حل شده‌اند که خلاصه آنها در

جدول (۱) دیده می‌شوند.

جدول ۱. مثال‌های طراحی برای افت انرژی در دریچه کشویی و تعیین رقم

کف کانال فرعی آبیاری

Table 1. Design examples results

h_0 (m)	a (m)	h_2 (m)	h_0/a	h_2/a	ΔE (%), Eq. 19
1.5	0.2	1.2	7.50	6.00	19.94
1.5	0.3	1.2	5.00	4.00	19.72
1.2	0.2	1	6.00	5.00	16.56
1.2	0.3	1	4.00	3.33	16.38
1	0.2	0.8	5.00	4.00	19.72
1	0.3	0.8	3.33	2.67	19.51
0.8	0.2	0.6	4.00	3.00	24.42
0.8	0.3	0.6	2.67	2.00	24.15

ادامه جدول (۱)

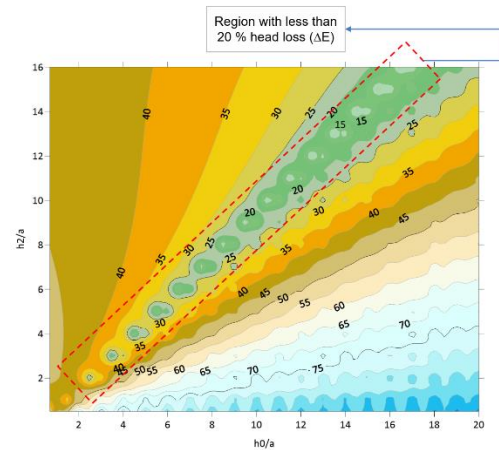
Main bed invert El. (m)	M- WS_{El} (m)	S- Bed_{El} (m)	C_d , Eq. 18	q ($m^3/s/m$)
100	101.50	100.1006	0.288	0.952
100	101.50	100.1028	0.314	1.040
100	101.20	100.0344	0.272	0.804
100	101.20	100.0362	0.301	0.890
100	101.00	100.0028	0.314	0.849
100	101.00	100.0049	0.352	0.952
100	100.80	99.95579	0.381	0.920
100	100.80	99.95845	0.436	1.054

۴- نتیجه‌گیری

از روش رگرسیون غیرخطی چندگانه (MNR) برای پیش‌بینی

ضریب دبی (C_d) و افت انرژی نسبی (ΔE) در دریچه‌های کشویی

استفاده شد. تخمین C_d برای اندازه‌گیری دبی در کانال‌ها ضروری



شکل ۱۸. منحنی‌های کنتور افت انرژی نسبی (ΔE) در مقابل h_0/a و h_2/a با

استفاده از معادله (۱۹)

Fig. 18. Contours of relative energy loss (ΔE) vs. h_0/a and h_2/a using Eq. (19)

۳-۳- نمونه طراحی

برای نشان دادن کاربرد نتایج این تحقیق برای تعیین افت انرژی

در دریچه‌های کشویی عمودی، یک نمونه طراحی ارائه می‌شود.

یک کانال اصلی، آب را به یک منطقه آبیاری می‌رساند. عمق

نرمال (h_0) در کانال ۱/۵ متر و دهانه بازشدگی دریچه ۲۰

سانتی‌متر است. یک آبگیر آب را به یک کانال ثانویه با عمق نرمال

۱/۲ متر (h_2) تحویل می‌دهد. اگر رقم بستر کانال اصلی ۱۰۰ متر

از سطح متوسط دریا^۱ (MSL) باشد، مطلوب است محاسبه رقم

کف کانال ثانویه در محل ورودی.

راه حل: افت بار آبی (هد) از بالادست به پایین دست دریچه

(ΔE) با استفاده از معادله (۱۹) محاسبه می‌شود.

$$\Delta E = \frac{92.158 \left(\frac{h_0}{a} - \frac{h_2}{a}\right)^{0.985}}{\left(\frac{h_0}{a}\right)^{0.958}} = \frac{92.158 \left(\frac{1.5}{0.2} - \frac{1.2}{0.2}\right)^{0.985}}{\left(\frac{1.5}{0.2}\right)^{0.958}} = 19.94\%$$

رقوم سطح آب در کانال اصلی ($M-WS_{El}$) برابر است با رقم

کف کانال به علاوه h_0 ، لذا می‌توان نوشت:

$$M - WS_{El} = 100 + 1.5 = 101.5 \text{ m from MSL}$$

رقوم بستر کانال ثانویه ($S-Bed_{El}$) برابر است با سطح سطح

آب در کانال اصلی ($M-WS_{El}$) منهای افت انرژی دریچه و منهای

عمق نرمال کانال ثانویه (h_2) یعنی داریم:

$$S - Bed_{El} = 101$$

¹ Mean sea level

دبی بستگی دارد. درج V_2 در تجزیه و تحلیل، یک معادله ضمنی ایجاد می‌کند و این مشکل را برای استفاده از معادله پیشنهادی افزایش می‌دهد. از سوی دیگر، پیشنهاد یک مقدار ثابت برای k برای شرایط جریان آزاد یا مستغرق نیاز به بررسی بیشتری دارد. مطالعه حاضر با بهره‌گیری از افت نسبی انرژی (ΔE) به جای استفاده از یک ضریب ثابت یعنی k ، ایده جدیدی را برای محاسبه افت انرژی ارائه کرده است. مطالعه حاضر نشان داد که اتلاف انرژی متغیر است و به h_0/a و h_2/a بستگی دارد.

قدردانی نویسندگان

نویسنده از حمایت مادی و معنوی دانشگاه تبریز و مسئول آزمایشگاه هیدرولیک گروه مهندسی آب دانشکده کشاورزی تشکر می‌کند.

تعارض منافع

هیچگونه تعارض منافع وجود ندارد.

سهم نویسندگان

چون این مقاله فقط یک نویسنده دارد، لذا سهم او ۱۰۰٪ است.

منابع مالی

آزمایشات با استفاده از بودجه اختصاصی از گرنت نویسنده تدارک دیده شدند و لذا از مدیریت پژوهشی دانشگاه تبریز تشکر می‌شود.

References

- [1] Yahyaee, A.R., Moridi, A. and Sarang, A. 2021. A new optimized model to control eutrophication in multi-purpose reservoirs. *International Journal of Environmental Science and Technology*.
- [2] Salmasi, F. 2018. Effect of downstream apron elevation and downstream submergence in discharge coefficient of Ogee weir. *ISH Journal of Hydraulic Engineering*, 27(4), pp. 375-384.
- [3] Mousavi, S.N., Farsadizadeh, D., Salmasi, F. and Hosseinzadeh Dalir, A. 2020. Evaluation of pressure fluctuations coefficient along the USBR Type II stilling basin using experimental results and AI models. *ISH Journal of Hydraulic Engineering*.
- [4] Erdbrink, C.D., Krzhizhanovskaya, V.V. and Sloot, P.M.A. 2014. Free-surface flow simulations for discharge-based operation of hydraulic structure gates. *Journal of Hydroinformatics*, 16(1), pp. 189-206.
- [5] Quang, L.X., Nakamura, K., Hung, T., Tinh, N.V., Matsuda, S., Kadota, K., Horino, H., Hai, P.T., Komatsu, H., Hasegawa, K., Fukuda, S., Hirata, J., Oura, N., Kishimoto-Mo, A.W., Yonemura, S. and Onishi, T. 2019. Effect of organizational paddy water management by a water user group on methane and nitrous oxide emissions and rice yield in the Red River Delta, Vietnam. *Agricultural Water Management*, 217, pp. 179-192.
- [6] Akbari, M., Salmasi, F., Arvanaghi, H., Karbasi, M. and Farsadizadeh, D. 2019. Application of Gaussian process regression model to predict discharge coefficient of gated piano key weir. *Water Resources Management*, 33, pp. 3929-3947.

- [7] Ghosh, M.K., Dutta, S. and Sen, D. 2014. Sediment flush out from pond of river diversion barrages by gate operation. *Water Resources Management*, 28, pp. 5335–5356.
- [8] Henry, H.R. 1950. Discussion of Diffusion of submerged jets by Albertson M.L., Dai Y.B., Jensen R.A. and Rouse H. *Transactions of the American Society of Civil Engineers*, 115, pp. 687–694.
- [9] Rajaratnam, N. and Subramanya, K. 1967a. Flow immediately below a submerged sluice gate. *Journal of the Hydraulics Division*, 93(HY4), pp. 57–77.
- [10] Ramamurthy, A.S., Submmanya, K. and Pani, B.S. 1978. Sluice Gates with High Discharge Coefficients. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, ASCE, 104(IR4), pp. 437–441.
- [11] Swamee, P.K. 1992. Sluice-gate Discharge Equations. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 118(1), pp. 56–60.
- [12] Swamee, P.K., Pathak, S.K., Talib, M. and Ojaha, C.S.P. 2000. Discharge Characteristics of Skew Sluice Gates. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, ASCE, 126(5), pp. 328–334. Available at: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9437\(2000\)126:5\(328](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9437(2000)126:5(328) (Accessed: 31 July 2025).
- [13] do Amaral, L.G.H., Righes, A.A., Souza Filho, P.D.S. and Dalla Costa, R. 2005. Automatic regulator for channel flow control on flooded rice. *Agricultural Water Management*, 75(3), pp. 184–193.
- [14] Belaud, G., Cassan, L. and Baume, J.P. 2009. Calculation of Contraction Coefficient under Sluice Gates and Application to Discharge Measurement. *Journal of Hydraulic Engineering*, 135(12). Available at: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)HY.1943-7900.0000122](https://doi.org/10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.0000122) (Accessed: 31 July 2025).
- [15] Silva, C.O. and Rijo, M. 2017. Flow Rate Measurements under Sluice Gates. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 143, p. 06017001.
- [16] Li, Y.K., He, X.L., Qiu, L.C., Chen, J. and Han, Y. 2018. Experimental investigation of discharge characteristics of float type sluice gate. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 191, p. 012094.
- [17] Nasehi Oskuyi, N. and Salmasi, F. 2012. Vertical Sluice Gate Discharge Coefficient. *Journal of Civil Engineering and Urbanism*, 2(3), pp. 108–114.
- [18] Vatankhah, A.R. and Hoseini, P. 2021. Discharge equation for round gates in turnout pipes: Dimensional analysis and theoretical approaches. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 47(1).
- [19] Khalili Shayan, H., Farhoudi, J. and Vatankhah, A.R. 2021. Experimental and field verifications of radial gates as flow measurement structures. *Water Science & Technology: Water Supply*.
- [20] Hoseini, P. and Vatankhah, A.R. 2021. Stage-discharge relationship for slide gates installed in partially full pipes. *Flow Measurement and Instrumentation*, 77, p. 101838.
- [21] Rajaratnam, N. 1977. Free-Flow Immediately below Sluice Gates. *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, 103(HY4), pp. 345–351.
- [22] Clemmens, J., Strelkoff, T.S. and Replogle, J.A. 2003. Calibration of Submerged Radial Gates. *Journal of Hydraulic Engineering*, 129(9), pp. 680–687.
- [23] Habibzadeh, A., Vatankhah, A.R. and Rajaratnam, N. 2011. Role of energy loss on discharge characteristics of sluice gates. *Journal of Hydraulic Engineering*, 137(9), pp. 1079–1084.
- [24] Rajaratnam, N. and Subramanya, K. 1967b. Flow Equation for the Sluice Gate. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 93(3), pp. 167–186.
- [25] Salmasi, F., Nouri, M. and Abraham, J. 2019. Laboratory Study of the Effect of Sills on Radial Gate Discharge Coefficient. *KSCE Journal of Civil Engineering*.
- [26] Salmasi, F. and Abraham, J. 2020. Predicting seepage from unlined earthen channels using the finite element method and multi variable nonlinear regression. *Agricultural Water Management*, 234, p. 106148.
- [27] Salmasi, F. and Abraham, J. 2020. Expert System for Determining Discharge Coefficients for Inclined Slide Gates Using Genetic Programming. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 146(12), p. 06020013–9.
- [28] Salmasi, F. and Abraham, J. 2020. Prediction of discharge coefficients for sluice gates equipped with different geometric sills under the gate using multiple non-linear regression (MNL). *Journal of Hydrology*, 597, p. 125728.

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم؟

Salmasi, F., 2025. Energy loss for sluice gates under free and submerged flow conditions. *Modares Civil Engineering journal*, 25(4), pp.83-95.

DOI: 10.22034/25.4.4

