

Experimental Investigation of the Effect of Submergence and Entrance Transition on Stage-Discharge Relations for Lopac Gates

FATEMEH YOUSOFVAND¹, MOHAMMAD JAVAD MONEM^{2*}, MOHAMMAD REZA KAVIANPOUR³

1. Ph.D. Student, Department of Hydraulic Structures, Faculty of Agriculture, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran

2. Associate Professor, Department of Hydraulic Structures, Faculty of Agriculture, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran

3. Associate Professor, Department of Civil Engineering, K.N. Toosi University of Technology, Tehran, Iran

(Received: Oct. 9, 2017- Revised: Feb. 3, 2018- Accepted: Feb. 18, 2018)

ABSTRACT

Lopac gates, controlling and regulating water level in irrigation canals, have recently been considered due to their practical advantages. So far, a few researches have been conducted on Lopac gate. In this study, the stage-discharge relationships of Lopac gate with different structures including no transition, sudden and gradual transition, in free and submerged condition were investigated. The experiments were performed to provide a wide range of effective non-dimensional parameters including gate angle and relative submergence. It was found that there is a relationship between the non-dimensional form of discharge ($Q^* = \frac{Q/B}{\sqrt{g b_g^3}}$) and the

ratio of upstream water depth to gate opening for free condition and between the Q^* and the submergence ratio for submerged conditions. In each of the above mentioned circumstances, using dimensional analysis and regression methods between the effective non-dimensional parameters, some explicit equations were presented for stage-discharge relationship of Lopac gates, with no transition, gradual and sudden transitions under free and submerged condition.

Key Words: Gradual and sudden transition, Lopac gate, Stage-discharge relationship, Submerged and free flow condition.

* Corresponding Author's Email: monem_mj@modares.ac.ir

بررسی آزمایشگاهی تأثیر استغراق و تبدیل ورودی بر روابط دبی-اشل دریاچه سالونی

فاطمه یوسفوند^۱، محمدجواد منعم^{۲*}، محمدرضا کاویانپور^۳

۱. دانشجوی دکتری، گروه سازه‌های آبی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران
۲. دانشیار، گروه سازه‌های آبی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران
۳. دانشیار، گروه آب، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی خواجه‌نصیرالدین طوسی، تهران، ایران
(تاریخ دریافت: ۱۳۹۶/۷/۱۷ - تاریخ بازنگری: ۱۳۹۶/۱۱/۱۴ - تاریخ تصویب: ۱۳۹۶/۱۱/۲۹)

چکیده

دریاچه‌های سالونی، سازه‌های کنترل و تنظیم آب در کانال‌ها می‌باشند که به دلیل مزایای کاربردی اخیراً مورد توجه قرار گرفته‌اند. تاکنون تحقیقات محدودی در مورد این سازه انجام شده است. در این مطالعه روابط دبی - اشل دریاچه سالونی هم‌عرض کانال و همراه با تبدیل‌های ورودی ناگهانی و تدریجی در بالادست، در شرایط جریان آزاد و مستغرق بررسی شده است. آزمایش‌ها در محدوده وسیعی از پارامترهای بدون بعد، از جمله زاویه بازشدگی و استغراق نسبی دریاچه صورت گرفته است. مشاهدات نشان داد که در شرایط جریان آزاد، پارامتر بدون بعد دبی $(Q/B) = Q^*$ با نسبت عمق آب بالادست به عرض بازشدگی دریاچه و در شرایط جریان مستغرق با استغراق نسبی دریاچه رابطه دارد. در هر یک از شرایط ذکر شده، با استفاده از تحلیل ابعادی و رگرسیون‌گیری بین پارامترهای بی‌بعد مؤثر، روابطی صریح برای دبی - اشل دریاچه‌های سالونی هم‌عرض کانال و همراه با فشرده‌گی جانبی در شرایط جریان آزاد و مستغرق ارائه شد.

واژه‌های کلیدی: تبدیل تدریجی و ناگهانی، جریان آزاد و مستغرق، دریاچه سالونی، روابط دبی-اشل

مقدمه

عملکرد ضعیف شبکه‌های آبیاری و تأثیر آن در کاهش بهره‌وری آب کشاورزی، ضرورت ارائه‌ی روش‌های مؤثر در بهره‌برداری مناسب از شبکه‌های آبیاری را موجب شده است (Gomez *et al.*, 2002). یکی از اقدامات ضروری و لازم در بهسازی شبکه‌های آبیاری، تجهیز آنها با استفاده از سازه‌های کنترل و تنظیم آب کارآمد و قابل اطمینان است. دریاچه‌ی سالونی^۱، یکی از سازه‌های کنترل و تنظیم جریان آب در کانال‌ها است. این سازه به صورت دو دروازه به دیواره‌ی مستطیلی در امتداد کانال لولا می‌شود و با تغییر باز شدگی، امکان تنظیم ارتفاع آب برای دبی‌های متفاوت در بالادست دریاچه فراهم می‌شود. با توجه به مزایای این سازه از جمله، درون‌گذر بودن جریان و امکان کنترل بهتر سطح آب، امکان عبور اجسام شناور و رسوبات به صورت هم‌زمان و قابلیت خودکار سازی، دریاچه‌ی سالونی به عنوان یک سازه کنترل و تنظیم سطح آب در کانال‌ها مورد توجه قرار گرفته است. این سازه در دهه‌ی ۱۹۸۰ توسط Langeman *et al.*, (2006) جهت مدیریت نوسانات سطح آب در کانال‌های

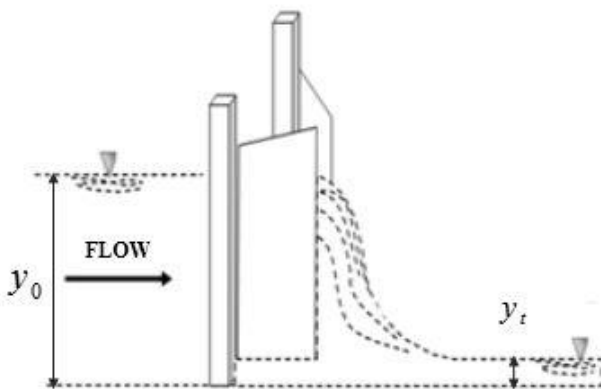
آبیاری ابداع شد. از جمله کاربردهای موفقیت‌آمیز این سازه می‌توان به استفاده از آن در پروژه Middle Rio Grand در نیومکزیکو در سال ۲۰۰۶ اشاره کرد. در این پروژه، به‌جای استفاده از سازه‌های انحراف آب فرسوده، از سازه دریاچه‌های سالونی استفاده شد و سازه‌های آب‌بند مرسوم، توسط دریاچه‌ها-ی سالونی جایگزین شدند (Oad and Kinzli, 2006). نمای شماتیک دریاچه سالونی در شکل (۱) نشان داده شده است. در این شکل θ زاویه بازشدگی دریاچه، l_0 عمق آب در بالادست و l_1 عمق آب در پایین دست دریاچه می‌باشد.

مطالعات محدودی بر روی دریاچه سالونی گزارش شده که آن‌ها را می‌توان به دو دسته مطالعات انجام شده در شرایط جریان آزاد و مستغرق تقسیم نمود. عمده مطالعات قبلی در شرایط جریان آزاد انجام شده است. شرکت آکواسیستم در سال ۲۰۱۲، (Aqua System 2000 Inc (AS2I)) به منظور کنترل جریان در کانال‌های کوچک و متوسط، مدل سازه‌ی دریاچه‌ی سالونی را با یک سیستم محرک هیدرولیکی ترکیب کرد. آکواسیستم با انجام آزمایش‌هایی بر روی دریاچه‌های سالونی، ضمن ارائه‌ی معادلات دبی دریاچه سالونی در شرایط جریان آزاد و مستغرق، آستانه استغراق این سازه را ۰/۳ معرفی کرد. طبق تعریف، نسبت عمق آب پایین دست دریاچه به عمق آب بالادست

* نویسنده مسئول: monem_mj@modares.ac.ir

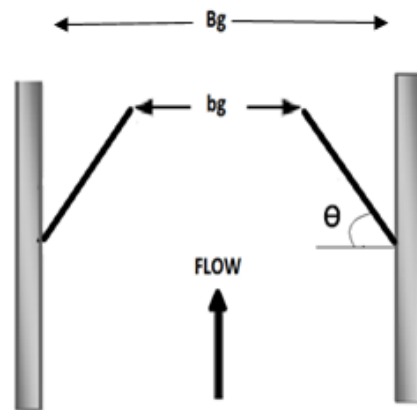
1. Lopac Gates

کانال‌های آبیاری معرفی و روابط دبی در زوایای مختلف بازشدگی دریاچه‌های سالونی هم‌عرض کانال در شرایط جریان آزاد را ارائه نمودند. Naghaei and Monem (2014) به معرفی شرایط مختلف هیدرولیکی و بهره‌برداری دریاچه سالونی در کانال‌های آبیاری پرداختند. بررسی‌های به عمل آمده در این مقاله نشان داد سازه دریاچه سالونی می‌تواند با ۱۸ وضعیت مختلف هیدرولیکی و بهره‌برداری مواجه باشد. برای بررسی عملکرد سازه و اشاعه کاربرد آن در شبکه‌های آبیاری باید این ۱۸ حالت شناسایی شده و روابط هیدرولیکی آن استخراج شود و کارکرد سازه در شرایط مختلف مورد آزمون قرار بگیرد.



(ب)

$(\frac{y_t}{y_0})$ ، درجه استغراق دریاچه می‌باشد. بر طبق نظر آکواسیستم، چنانچه درجه استغراق دریاچه کمتر از ۰/۳ باشد، جریان عبوری از دریاچه آزاد و در غیر این صورت جریان مستغرق می‌باشد. Naghaei and Monem (2013) با استفاده از نمودارهای ارائه شده توسط AS2I، روابط دبی-اشل دریاچه‌های سالونی با عرض‌های ۳، ۴، ۵، ۶ و ۸ فوت و به ترتیب با بازشدگی ۲/۷، ۳/۶، ۴/۵، ۵/۴ و ۷/۳ فوت را در درجه استغراق‌های ۴۰، ۷۰، ۹۰ و ۹۵ درصد ارائه کردند. نسبت بازشدگی این دریاچه‌ها، ثابت و برابر ۰/۹ می‌باشد (زاویه‌ی بازشدگی ۷۰ درجه). Yousofvand and Monem (2014 a) دریاچه‌ی سالونی را به‌عنوان سازه کنترل و تنظیم آب در



(الف)

شکل ۱. الف) پلان دریاچه‌ی سالونی ب) پروفیل جریان عبوری از دریاچه‌ی سالونی

تغییرات دبی ورودی به آبیگرها می‌شود. Yousofvand et al (2016) با بهره‌گیری از معادله مومنتم، رابطه‌ای تحلیلی برای محاسبه‌ی دبی دریاچه سالونی هم‌عرض کانال در شرایط جریان مستغرق ارائه نمودند. سپس با استفاده از معادله‌ی ارائه شده برای دبی و با استفاده از نتایج آزمایشگاهی رابطه‌ای برای ضریب دبی دریاچه سالونی در شرایط جریان مستغرق ارائه شد.

با توجه به مطالعات اندک انجام شده بر روی سازه دریاچه سالونی در شرایط هیدرولیکی مختلف، در این تحقیق سعی بر آن است تا روابطی صریح جهت تخمین دبی در شرایط جریان آزاد و مستغرق ارائه شود. بدین منظور، ابتدا پارامترهای بی‌بعد مؤثر بر دبی سازه با استفاده از تحلیل ابعادی تعیین گردید. سپس روابط دبی-اشل دریاچه در سه وضعیت مختلف دریاچه و در شرایط جریان آزاد و مستغرق، با استفاده از پارامترهای بی‌بعد مؤثر و نتایج آزمایشگاهی ارائه شد. در نهایت کارایی روابط دبی-اشل پیشنهادی در مقایسه با روابط پیشین بررسی - گردید.

Yousofvand and Monem (2014 b) رابطه هیدرولیکی دبی عبوری از دریاچه‌های سالونی با فشردگی جانبی را در شرایط جریان آزاد، با استفاده از رابطه انرژی استخراج نمودند. Yousofvand et al., (2015) در تحقیقی دیگر، به ارزیابی آزمایشگاهی و تحلیلی ضریب دبی دریاچه سالونی در شرایط جریان مستغرق پرداختند. در این تحقیق با استفاده از معادله دبی دریاچه سالونی، روشی نیمه تحلیلی جهت برآورد ضریب دبی دریاچه‌های سالونی در شرایط جریان مستغرق ارائه گردیده است که می‌تواند در برآورد دبی دریاچه‌های سالونی در شرایط مختلف جریان مستغرق مورد استفاده قرار گیرد.

Sadeghi and Monem (2015) به بررسی و مقایسه عملکرد دریاچه سالونی و کشویی در کانال آبیاری، با استفاده از مدل هیدرودینامیک ICSS پرداختند. نتایج نشان داد که دریاچه سالونی در مقایسه با دریاچه کشویی، در شرایط تغییرات ملایم جریان چه در حالت افزایشی و چه در حالت کاهش، عملکرد بهتری در کنترل و تنظیم تراز سطح آب دارد و موجب کاهش

تحلیل ابعادی

دبی عبوری از دریچه‌ی سالونی، تابعی از عمق آب در بالادست (y_0) و پایین‌دست (y_t) دریچه، عرض بازشدگی دریچه (b_g)، عرض دریچه (B_g)، عرض کانال (B)، زاویه بازشدگی دریچه (θ) و خصوصیات جریان (g, ρ, μ) است. با توجه به ثابت بودن عرض دریچه و وابسته بودن دو پارامتر عرض دریچه و عرض کانال در این تحقیق (در حالت دریچه هم عرض کانال $B = B_g$ و در حالت دریچه با تبدیل $B = 2B_g$ می‌باشد)، عرض کانال در تحلیل ابعادی در نظر گرفته شده است. بنابراین می‌توان گفت:

$$F(Q, y_0, y_t, b_g, B, g, \rho, \mu, \theta) = 0 \quad (\text{رابطه ۱})$$

با استفاده از تحلیل ابعادی و اصول باکینگهام، رابطه (۱)

به شکل بدون بعد رابطه (۳) توسعه داده می‌شود:

$$\frac{Q}{\sqrt{g b_g^3}} = f\left(\frac{B}{b_g}, \frac{y_0}{b_g}, \frac{y_t}{y_0}, \text{Re}_1, \theta\right) \quad (\text{رابطه ۲})$$

$$\frac{Q/B}{\sqrt{g b_g^3}} = f\left(\frac{y_0}{b_g}, \frac{y_t}{y_0}, \text{Re}_1, \theta\right) \quad (\text{رابطه ۳})$$

در این روابط، پارامتر بدون بعد دبی است که

با Q^* نشان داده می‌شود. همچنین $\frac{y_t}{y_0}$ استغراق نسبی دریچه،

$\frac{y_0}{b_g}$ نسبت عمق آب بالادست به عرض بازشدگی دریچه، θ

زاویه بازشدگی دریچه و Re_1 عدد رینولدز جریان بالادست است. عدد رینولدز جریان بیان‌کننده تأثیر نیروهای لزجت می‌باشد و در زوایای بزرگ بازشدگی که عمق آب در بالادست دریچه کاهش می‌یابد تأثیر تعیین‌کننده‌ای ندارد. با توجه به انجام آزمایش‌ها در محدوده‌ی جریان متلاطم و برای زوایای بازشدگی ۴۵ تا ۷۰ درجه، تأثیر عدد رینولدز بر دبی جریان ناچیز است. بنابراین رابطه‌ی دبی دریچه‌ی سالونی برحسب پارامترهای بدون بعد به صورت رابطه (۴) خواهد بود:

$$Q^* = f\left(\frac{y_0}{b_g}, \frac{y_t}{y_0}, \theta\right) \quad (\text{رابطه ۴})$$

همچنین با داشتن سرعت جریان، عدد فرود در تمام

آزمایش‌ها محاسبه شد. مشاهده گردید که عدد فرود در محدوده‌ی ۰/۰۵ تا ۰/۴۹۸ قرار دارد. همان‌طور که مشاهده می‌شود در همه‌ی آزمایش‌ها عدد فرود، عددی زیر یک بوده و جریان زیر بحرانی است. از طرفی پارامتر بدون بعد دبی مشابهت نزدیکی به عدد فرود دارد و

می‌توان اظهار داشت که تأثیر عدد فرود به نوعی در این پارامتر دیده شده است.

مواد و روش‌ها

به منظور مطالعه روابط دبی-اشل دریچه‌های سالونی از یک مدل آزمایشگاهی در موسسه تحقیقات آب وزارت نیرو استفاده شد. دریچه ممکن است هم عرض کانال باشد که در این صورت نیازی به استفاده از تبدیل نیست و یا اینکه عرض کمتری نسبت به عرض کانال داشته باشد که در این حالت برای نصب دریچه روی کانال به تبدیل نیاز است. بنابراین دریچه سالونی در سه وضعیت مختلف، دریچه سالونی هم‌عرض کانال و نیز دریچه سالونی با عرضی کمتر از عرض کانال، همراه با استفاده از تبدیل‌های ناگهانی و تدریجی در بالادست طراحی و ساخته شد. در این تحقیق از تبدیل تدریجی با زاویه ۳۰ درجه استفاده شد. طول تبدیل تدریجی ۴۳/۳ سانتیمتر و طول تبدیل ناگهانی نیز ۱۰ سانتیمتر می‌باشد. نمای کلی مدل‌های مورد استفاده در شکل (۲) ارائه شده‌اند. کانال آزمایشگاهی مورد استفاده دارای طول، عرض و ارتفاعی به ترتیب برابر با ۱، ۱ و ۱ متر است. در بالادست کانال، یک مخزن به ابعاد ۱۰×۱۰×۰/۵ متر وجود دارد که آب را از طریق یک سرریز اوجی کالیبره شده وارد کانال می‌کند. با استفاده از منحنی دبی - اشل سرریز اوجی، دبی وارده به کانال قبل از انجام آزمایش‌ها تنظیم می‌شود. پلان و مقطع جانبی کانال آزمایشگاهی در شکل (۳) نمایش داده شده است.

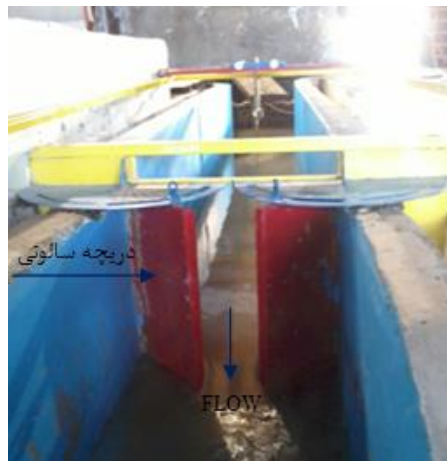
آزمایش‌ها بر روی این سازه در دو شرایط جریان آزاد و مستغرق (با ۳ درجه استغراق ۰/۵، ۰/۷ و ۰/۹) انجام شد. عرض و ارتفاع دریچه به ترتیب ۵۰ و ۶۰ سانتیمتر بود. برای تنظیم درجه استغراق سازه، از یک دریچه کشویی به ابعاد ۱×۲ متر واقع در انتهای کانال استفاده شد. منظور از درجه استغراق صفر، شرایط جریان آزاد است. دریچه در ۵ زاویه بازشدگی و با ۳ دبی مختلف مورد آزمایش قرار گرفت. در هر وضعیت دریچه سالونی، ۱۵ آزمایش در شرایط جریان آزاد و ۴۵ آزمایش در شرایط مستغرق انجام شد. بدین ترتیب جمعاً ۱۸۰ آزمایش در ۳ وضعیت انجام شد. عمق جریان توسط عمق‌سنج^۱ با دقت $\pm 0/1$ میلی‌متر ثبت و زاویه دریچه توسط زاویه‌سنج بزرگ دستی با دقت بالا تنظیم می‌شد. y_0 در فاصله‌ی ۱/۸ متری از بالادست دریچه و y_t در فاصله‌ی ۲/۹ متری از پایین‌دست دریچه اندازه‌گیری شده است. مشخصات کلی مربوط به آزمایش‌ها در جدول (۱) ذکر شده است.



(ب)

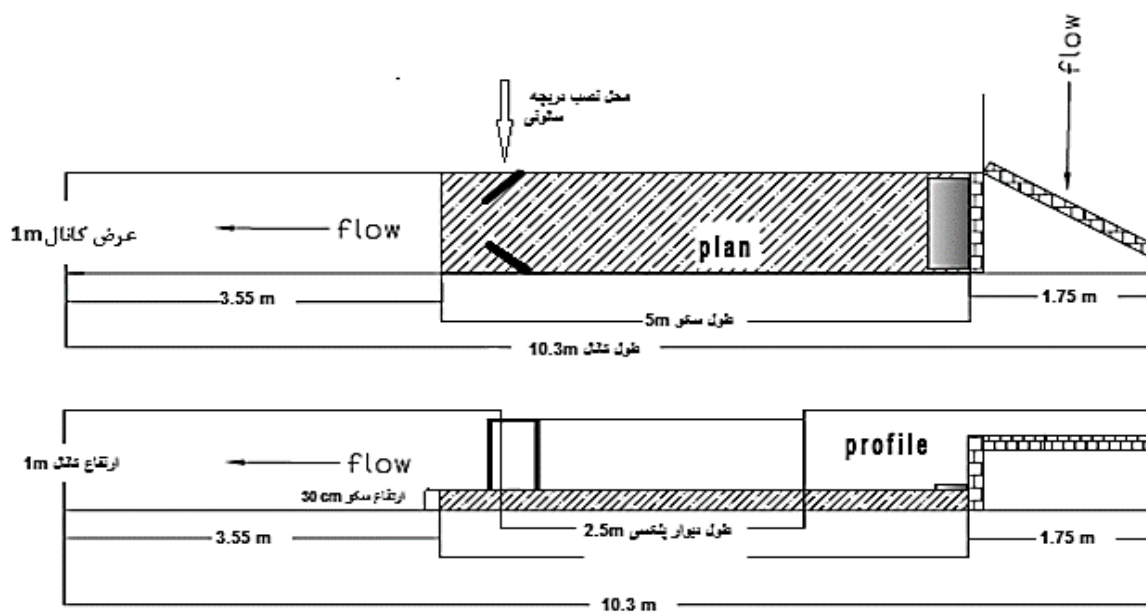


(الف)



(ج)

شکل ۲. الف - دریچه سالونی با تبدیل ناگهانی ب- دریچه سالونی با تبدیل تدریجی ج- دریچه سالونی هم عرض کانال



شکل ۳. پلان و مقطع جانبی کانال آزمایشگاهی

جدول ۱. آزمایش‌های انجام‌شده با دبی، زاویه بازشدگی و درجه استغراق‌های مختلف

| دریچه سالونی | عرض دریچه (سانتیمتر) | عرض کانال (سانتیمتر) | درجه استغراق دریچه | زاویه بازشدگی دریچه (θ) (درجه) | دبی (لیتر بر ثانیه بر متر) |
|-------------------------------|----------------------|----------------------|--------------------|---|----------------------------|
| دریچه سالونی بدون تبدیل | ۵۰ | ۵۰ | ۰-۰/۵-۰/۷-۰/۹ | ۶۰-۶۷/۵-۷۰ ۴۵-۵۲/۵ | ۴۰ ۵۰ ۶۰ |
| دریچه سالونی با تبدیل ناگهانی | ۵۰ | ۱۰۰ | ۰-۰/۵-۰/۷-۰/۹ | ۶۰-۶۷/۵-۷۰ ۴۵-۵۲/۵ | ۴۰ ۵۰ ۶۰ |
| دریچه سالونی با تبدیل تدریجی | ۵۰ | ۱۰۰ | ۰-۰/۵-۰/۷-۰/۹ | ۶۰-۶۷/۵-۷۰ ۴۵-۵۲/۵ | ۴۰ ۵۰ ۶۰ |

در مقالات دیگر تشریح شده است (Yosofvand et al. 2015, Yosofvand et al. 2016). در ادامه نتایج حاصل در هر دو شرایط جریان آزاد و مستغرق به تفکیک آورده شده است.

جریان آزاد

در شرایط جریان آزاد، Q^* تابعی از نسبت عمق آب بالادست به عرض بازشدگی دریچه ($\frac{y_0}{b_g}$) و زاویه بازشدگی دریچه خواهد بود.

در شکل (۴) مقادیر Q^* ، در مقابل $\frac{y_0}{b_g}$ برای دریچه سالونی بدون تبدیل و نیز دریچه با تبدیل‌های ناگهانی و تدریجی در شرایط جریان آزاد نشان داده شده است. بر اساس تحلیل ابعادی انجام شده (رابطه ۴) و با توجه به نمودارهای شکل (۴)، می‌توان رابطه کلی (۸) را برای دبی دریچه سالونی در شرایط جریان آزاد در هر سه وضعیت، متصور شد:

$$Q^* = \alpha \left(\frac{y_0}{b_g}\right)^\beta \quad (\text{رابطه ۸})$$

در این رابطه ضریب α و نیز توان β تابعی از زاویه بازشدگی دریچه (θ) می‌باشند:

$$\begin{cases} \alpha = f_1(\theta) \\ \beta = f_2(\theta) \end{cases} \quad \theta = \text{Arccos}\left(1 - \frac{b_g}{B_g}\right) \quad (\text{رابطه ۹})$$

در شکل (۵)، پارامتر بدون بعد دبی ($Q^* = \frac{Q}{\sqrt{gb_g^3}}$) از

رابطه دبی-اشل پیشنهادی (رابطه ۸)، در مقایسه با نتایج آزمایشگاهی نشان داده شده است. با توجه به این نمودارها حداکثر خطای نسبی محاسبه دبی در شرایط جریان آزاد با استفاده از روابط پیشنهادی، $\pm 5\%$ می‌باشد.

پس از انجام آزمایش‌ها و حصول داده‌ها، با استفاده از نتایج آزمایشگاهی و رگرسیون‌گیری بین پارامترهای بی‌بعد مؤثر، روابط دبی-اشل جهت تخمین دبی در شرایط جریان آزاد و مستغرق در سه وضعیت مختلف دریچه ارائه گردید.

در نهایت به منظور ارزیابی روابط دبی-اشل پیشنهادی در این تحقیق، از پارامترهای مختلف آماری شامل جذر میانگین مربعات خطا^۱ RMSE، میانگین خطای نسبی^۲ MAPE و خطای نسبی^۳ RE که به ترتیب به صورت روابط (۵) تا (۷) تعریف شده‌اند، استفاده گردید:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum (x_{measured} - x_{calculated})^2}{N}} \quad (\text{رابطه ۵})$$

$$MAPE = \frac{\sum \left| 1 - \frac{x_{calculated}}{x_{measured}} \right|}{N} \times 100 \quad (\text{رابطه ۶})$$

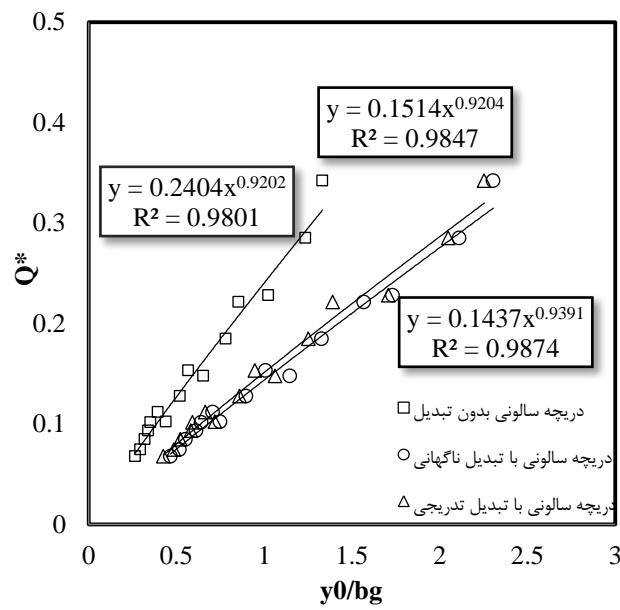
$$RE = \frac{x_{measured} - x_{calculated}}{x_{measured}} \times 100 \quad (\text{رابطه ۷})$$

در این روابط، $x_{measured}$ مقدار اندازه‌گیری شده و $x_{calculated}$ مقدار محاسبه شده است.

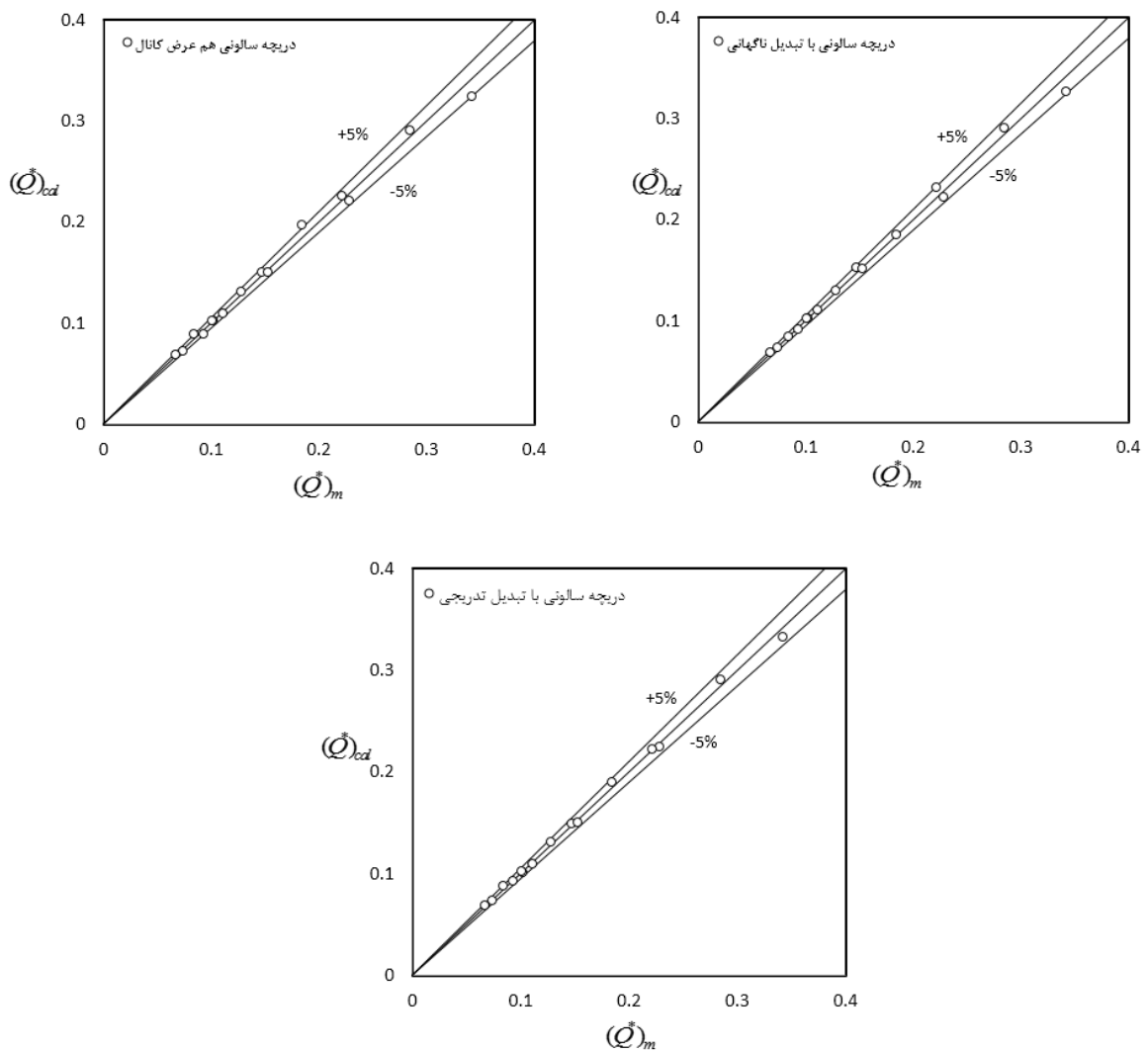
ارائه و تفسیر نتایج

در این پژوهش منظور از جریان آزاد جریانی است که افزایش سطح آب در پایین‌دست دریچه باعث تغییر سطح آب در بالادست نشود. همچنین از جایی که عمق آب در پایین‌دست سطح آب در بالادست را تغییر داده و بر آن تأثیر می‌گذارد جریان مستغرق در نظر گرفته شده است. مرز استغراق دریچه

1. Root Mean Square Error
2. Mean Absolute Percentage Error
3. Relative Error



شکل ۴. مقادیر آزمایشگاهی Q^* در مقابل y_0/b_g برای وضعیت‌های مختلف دریچه سالونی در شرایط جریان آزاد



شکل ۵. مقایسه دبی به دست آمده از روابط پیشنهادی با نتایج آزمایشگاهی در شرایط جریان آزاد

جریان مستغرق

در شرایط جریان مستغرق، دبی جریان علاوه بر زاویه بازشدگی دریاچه و پارامتر $\frac{y_0}{b_g}$ ، تابعی از استغراق نسبی دریاچه $(\frac{y_t}{y_0})$ نیز می‌باشد. بنابراین می‌توان نسبت پارامتر بدون بعد دبی در شرایط استغراق به شرایط جریان آزاد $(\frac{Q_{Submerged}^*}{Q_{free}^*})$ را به صورت تابعی از استغراق نسبی دریاچه مطابق شکل (۶) به شکل رابطه (۱۰) پیشنهاد کرد:

$$\frac{Q_{Submerged}^*}{Q_{free}^*} = (1 - (\frac{y_t}{y_0})^\lambda)^\gamma \quad \text{(رابطه ۱۰)}$$

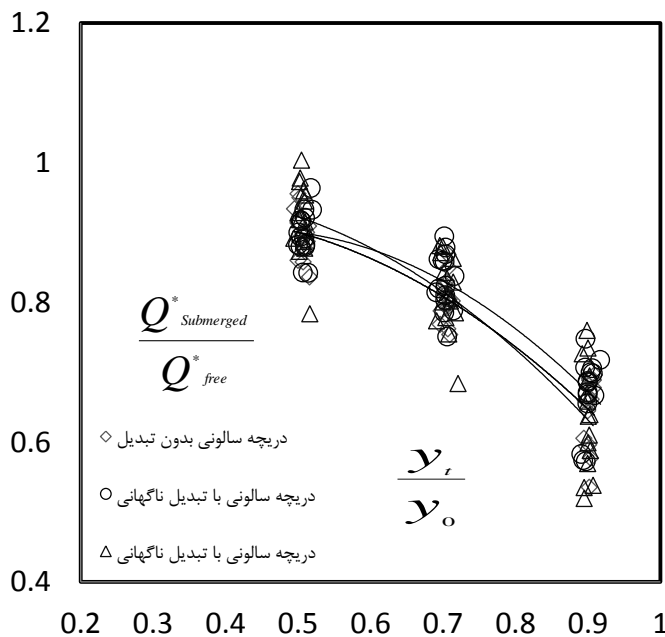
در این رابطه، λ و γ بر اساس تحلیل رگرسیونی از نتایج

آزمایشگاهی حاصل می‌شود. در این رابطه، در صورتی که جریان آزاد باشد یعنی $\mathbf{0} \rightarrow y_t$ ، دبی برابر با دبی جریان آزاد خواهد بود $(Q_{Submerged}^* = Q_{free}^*)$ که منطقی است. بر این اساس روابط (۱۱)، (۱۲) و (۱۳) به ترتیب برای دریاچه سالونی هم-عرض کانال و نیز دریاچه با تبدیل‌های ناگهانی و تدریجی در شرایط جریان مستغرق به دست می‌آید:

$$\frac{Q_{Submerged}^*}{Q_{free}^*} = (1 - (\frac{y_t}{y_0})^{1.334})^{0.214} \quad \text{(رابطه ۱۱)}$$

$$\frac{Q_{Submerged}^*}{Q_{free}^*} = (1 - (\frac{y_t}{y_0})^{1.286})^{0.191} \quad \text{(رابطه ۱۲)}$$

$$\frac{Q_{Submerged}^*}{Q_{free}^*} = (1 - (\frac{y_t}{y_0})^{1.826})^{0.266} \quad \text{(رابطه ۱۳)}$$



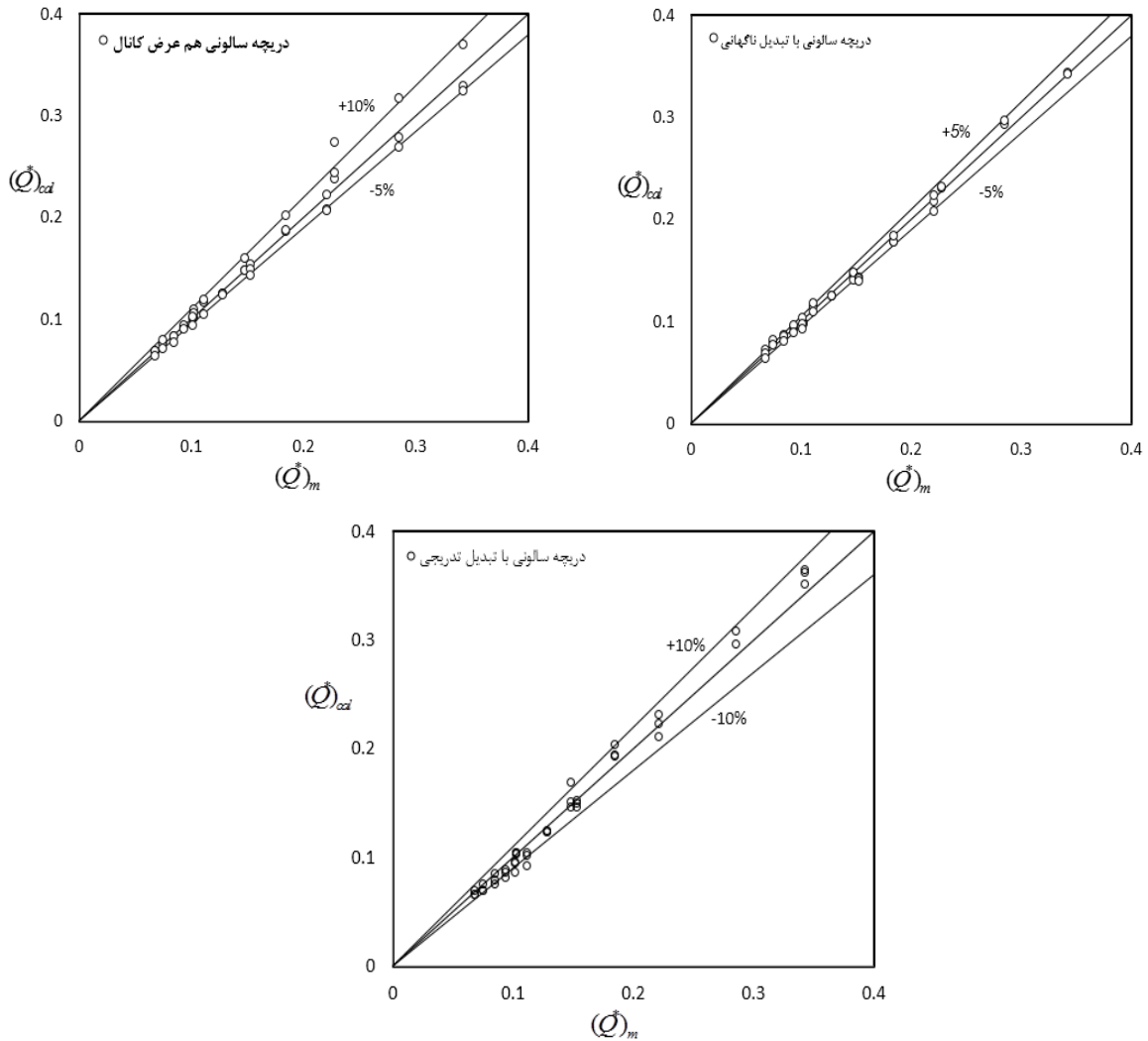
شکل ۶. پارامتر $\frac{Q_{Submerged}^*}{Q_{free}^*}$ به صورت تابعی از استغراق نسبی دریاچه $(\frac{y_t}{y_0})$

با توجه به این نمودارها حداکثر خطای نسبی محاسبه دبی در شرایط جریان مستغرق با استفاده از روابط پیشنهادی، $\pm 10\%$ می‌باشد. بنابراین با داشتن Q_{free}^* از رابطه (۸)، می‌توان دبی جریان در شرایط استغراق را با استفاده از روابط پیشنهادی (۱۱)، (۱۲) و (۱۳) به ترتیب برای دریاچه سالونی هم‌عرض کانال و نیز دریاچه سالونی با تبدیل‌های ناگهانی و تدریجی، با دقت مطلوب محاسبه نمود. جدول (۲) محدوده تغییرات پارامترهای مختلف در این مطالعه را نشان می‌دهد.

با توجه به شکل (۶) مشاهده می‌شود که با افزایش نسبت استغراق دریاچه به دلیل کاهش جریان‌های ثانویه، هد بالادست دریاچه افزایش یافته و در نتیجه هد سرعت کاهش می‌یابد که منجر به کاهش دبی جریان می‌شود. در شکل (۶)، پارامتر بدون بعد دبی (Q^*) از روابط پیشنهادی (روابط ۱۱، ۱۲ و ۱۳)، در مقایسه با نتایج آزمایشگاهی برای دریاچه سالونی هم‌عرض کانال و نیز دریاچه سالونی با تبدیل‌های ناگهانی و تدریجی نشان داده شده است.

ناگهانی بیشتر از تبدیل‌های تدریجی است، به همین دلیل مشاهده می‌شود که با قرار دادن تبدیل ناگهانی در مقایسه با تبدیل تدریجی، دبی به مقدار بیشتری کاهش می‌یابد و برای تبدیل تدریجی این تأثیر کمتر است.

در صورت نصب دریاچه همراه با تبدیل‌های تدریجی یا ناگهانی در کانال، جریان‌های ثانویه‌ای در بالادست دریاچه شکل گرفته و افت انرژی افزایش می‌یابد، لذا دبی جریان عبوری از دریاچه کاهش می‌یابد. از طرفی افت انرژی در تبدیل‌های



شکل ۷. مقایسه دبی به دست آمده از روابط پیشنهادی با نتایج آزمایشگاهی در شرایط جریان مستغرق

جدول ۲. محدوده تغییرات پارامترهای مختلف در این تحقیق

| $\frac{y_t}{y_0}$ | $\frac{y_0}{b_g}$ | Re_1 | Fr_1 | وضعیت استقرار دریاچه |
|-------------------|-------------------|--|---------------|--------------------------------|
| ۰/۵، ۰/۷، ۰/۹ | ۰/۲۶۴-۲/۸۳۶ | $1.0^5 \times 4/8 - 1.0^5 \times 0/9$ | ۰/۱۱۲ - ۰/۴۹۸ | دریاچه سالونی هم‌عرض کانال |
| ۰/۵، ۰/۷، ۰/۹ | ۰/۴۶۶-۲/۳۰۵ | $1.0^5 \times 11/7 - 1.0^5 \times 1/9$ | ۰/۰۵۱ - ۰/۲۱۳ | دریاچه سالونی با تبدیل ناگهانی |
| ۰/۵، ۰/۷، ۰/۹ | ۰/۴۲۶-۲/۲۵۴ | $1.0^5 \times 10/6 - 1.0^5 \times 1/6$ | ۰/۰۵ - ۰/۲۴۴ | دریاچه سالونی با تبدیل تدریجی |

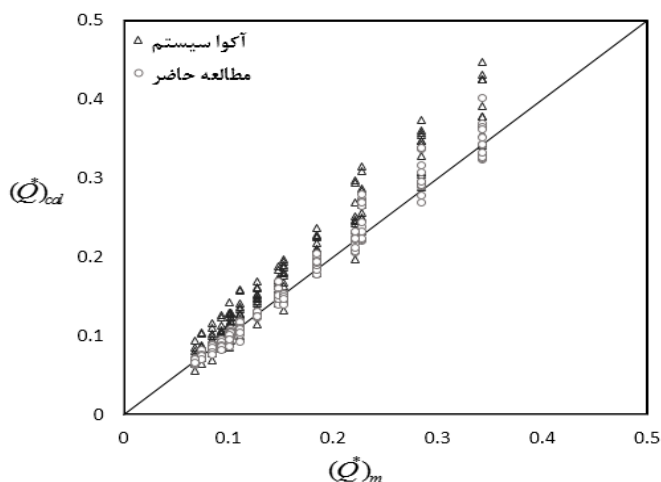
حاضر در مقایسه با نتایج آزمایشگاهی نشان داده شده است. با توجه به این نمودار، رابطه دبی - اشل پیشنهادی در این تحقیق در مقایسه با معادلات آکواسیستم، دارای تطبیق بیشتری با

مقایسه روابط پیشنهادی با مطالعات پیشین

در شکل (۸)، پارامتر بدون بعد دبی (Q^*) به دست آمده از معادله آکواسیستم و رابطه دبی - اشل پیشنهادی در مطالعه

روابط پیشنهادی است. علاوه بر این مزیت دیگر روابط دبی - اشل پیشنهادی در این تحقیق، بدون بعد بودن این روابط است.

نتایج آزمایشگاهی است که یکی از علل آن در نظر گرفتن همه-ی پارامترهای بدون بعد مؤثر بر دبی دریچه سالونی، از جمله زاویه بازشدگی و استغراق نسبی دریچه (θ) و $\frac{y_0}{b_g}$ و $\frac{y_t}{y_0}$ ، در



شکل ۸. پارامتر بدون بعد دبی به دست آمده از معادله آکوا سیستم و روابط دبی - اشل پیشنهادی در مطالعه حاضر در مقایسه با نتایج آزمایشگاهی

به علت تشکیل جریان‌های ثانویه در بالادست دریچه و افزایش افت انرژی، باعث کاهش دبی جریان عبوری از دریچه می‌شود و نیز بر اساس تحلیل آماری انجام شده، در صورت امکان استفاده از دریچه بدون تبدیل مناسب‌تر است زیرا باعث کاهش افت جریان و افزایش دبی عبوری خواهد شد. در صورت نیاز به استفاده از تبدیل همراه دریچه، توصیه می‌شود که از تبدیل تدریجی استفاده شود زیرا افت انرژی آن و نیز خطای اندازه-گیری نسبت به تبدیل ناگهانی کمتر می‌باشد.

جداول (۳) و (۴) مقادیر پارامترهای آماری را به ازای کاربرد روابط دبی - اشل مختلف در شرایط جریان آزاد و مستغرق بدست می‌دهد. با توجه به این جداول و در مقایسه با روابط ارائه شده توسط آکوا سیستم، روابط دبی - اشل پیشنهادی در این تحقیق دارای دقت مناسبی در تعیین دبی دریچه‌ی سالونی در وضعیت‌های مختلف است. حداکثر خطای نسبی محاسبه دبی با استفاده از روابط دبی - اشل پیشنهادی، در شرایط جریان آزاد $\pm 0.5\%$ و در شرایط جریان مستغرق $\pm 1.0\%$ می‌باشد. با توجه به اینکه نصب دریچه در کانال همراه با تبدیل،

جدول ۳. جذر میانگین مربعات خطا، میانگین خطای نسبی و خطای نسبی روابط دبی - اشل پیشنهادی در شرایط جریان آزاد

| RE (%) | MAPE (%) | RMSE | وضعیت استقرار دریچه |
|-------------|----------|-------|------------------------|
| $\pm 0.5\%$ | ۲/۸۷۴ | ۰/۰۰۷ | دریچه هم‌عرض کانال |
| $\pm 0.5\%$ | ۱/۶۹۴ | ۰/۰۰۵ | دریچه با تبدیل ناگهانی |
| $\pm 0.5\%$ | ۱/۶۶۳ | ۰/۰۰۴ | دریچه با تبدیل تدریجی |
| $\pm 1.0\%$ | ۵/۶۱ | ۰/۰۱۱ | رابطه آکواسیستم |

جدول ۴. جذر میانگین مربعات خطا، میانگین خطای نسبی و خطای نسبی روابط دبی - اشل پیشنهادی در شرایط جریان مستغرق

| RE (%) | MAPE (%) | RMSE | وضعیت استقرار دریچه |
|--------------|----------|-------|------------------------|
| -۰.۵ تا +۱.۰ | ۴/۳۱۵ | ۰/۰۱۲ | دریچه هم‌عرض کانال |
| $\pm 0.5\%$ | ۴/۵۵۸ | ۰/۰۱۵ | دریچه با تبدیل ناگهانی |
| $\pm 1.0\%$ | ۶/۴۹۶ | ۰/۰۱۷ | دریچه با تبدیل تدریجی |
| $\pm 1.0\%$ | ۱۱/۳۴ | ۰/۰۱۸ | رابطه آکواسیستم |

نتیجه گیری

پارامترهای ارائه شده در جدول (۲) می باشد. در صورت نصب دریچه همراه با تبدیل در کانال، دبی جریان به علت تشکیل جریان های ثانویه در بالادست دریچه و افزایش افت انرژی، کاهش می یابد. با قرار دادن تبدیل ناگهانی در مقایسه با تبدیل تدریجی، دبی به مقدار بیشتری کاهش می یابد، در حالی که برای تبدیل تدریجی این تأثیر کمتر است. روابط دبی- اشل پیشنهادی در این تحقیق، تطبیق مطلوبی با سایر مطالعات انجام شده و نتایج آزمایشگاهی داشت. حداکثر خطای نسبی محاسبه دبی با استفاده از روابط دبی- اشل پیشنهادی، در شرایط جریان آزاد $\pm 0.5\%$ و در شرایط جریان مستغرق $\pm 1.0\%$ می باشد.

سیاسگزاری

بدینوسیله از حمایت ها و همکاری موسسه تحقیقات آب وزارت نیرو، بالاخص پژوهشکده مهندسی هیدرولیک و محیط های آبی، جناب آقای دکتر عباس اکبرزاده، مهندس رضا روشن، مهندس علی خراسانی زاده و مهندس سهند اکبریان قدردانی می شود.

هدف از مطالعه اخیر، ارائه روابطی کارا جهت تخمین دبی در شرایط جریان آزاد و مستغرق بود. مهم ترین نتایج حاصل از این تحقیق را می توان به شرح زیر برشمرد:

مهم ترین پارامترهای بی بعد مؤثر بر دبی جریان دریچه سالونی، در شرایط جریان آزاد زاویه بازشدگی دریچه و نسبت عمق آب در بالادست به عرض بازشدگی دریچه (y_0/b_g) و در شرایط جریان مستغرق علاوه بر این دو، استغراق نسبی دریچه (y_t/y_0) است.

در شرایط جریان آزاد پارامتر بدون بعد دبی (Q^*) با نسبت y_0/b_g رابطه ای توانی دارد. ضرایب این رابطه توانی تابعی از زاویه بازشدگی دریچه است.

با داشتن روابط دبی- اشل جریان آزاد و استغراق نسبی دریچه، می توان دبی جریان مستغرق را با استفاده از روابط دبی- اشل پیشنهادی برای شرایط جریان مستغرق بدست آورد. کاربرد روابط ارائه شده در این تحقیق در شرایط جریان آزاد و مستغرق، برای زوایای ۴۵ تا ۷۰ درجه و محدوده ای

نمادها

Fr₁

MAPE

$$Q^* = \frac{Q/B}{\sqrt{gb_g^3}}$$

Q_{free}^*

$Q_{Submerged}^*$

RMSE

RE

Re₁

$$\frac{y_t}{y_0}$$

$$\frac{y_0}{b_g}$$

عدد فرود جریان بالادست

میانگین خطای نسبی

پارامتر بدون بعد دبی

پارامتر بدون بعد دبی در شرایط جریان آزاد

پارامتر بدون بعد دبی در شرایط جریان مستغرق

جذر میانگین مربعات خطا

خطای نسبی

عدد رینولدز جریان بالادست

نسبت عمق آب پایین دست دریچه به عمق آب بالادست

نسبت عمق آب بالادست به عرض بازشدگی دریچه

REFERENCES

- Aqua Systems 2000 Inc. (2012). *Leaders in Water Management and Control*, Retrieved september 10, 2016, from <http://www.as2i.net/products/control-gates/hydra-lopac-gate>.
- Gomez, M., Rodellar, J. and Mantencon, J. (2002). Predictive control method for decentralized operation of irrigation canals. *Applied Mathematical Modeling*, 26,1039-1056.

- Langeman, p., Craig, k., Elser, p. and Allen, L. (2006). Irrigation Gate System. US Patent 7,114,878 B2.
- Naghaei, R. and Monem, M.J. (2013). Introducing the lopac gate to regulation the water level in irrigation channels and presentation its Hydraulic relationships. In: *Proceeding of the 4th National Conference on Irrigation and Drainage networks*.

- 25-27 February., Chamran University, Iran. (In Farsi)
- Naghaei, R. and Monem, M.J. (2014). Introducing of different hydraulic and regulation conditions of Lopac gate in irrigation canals. In: Proceeding of *the First National Conference on Irrigation and Agricultural Water Productivity*. 30 January., Ferdowsi University, Iran. (In Farsi)
- Oad, R. and Kinzli, K. (2006). SCADA Employed in Middle Rio Grande Valley to Help Deliver Water Efficiently. *Newsletter of the water center at Colorado state university*, 25.
- Sadeghi, S. and Monem, M.J. (2015). The comparison between lopac gate and Slide gate in irrigation canal under ASCE test cases. In: Proceeding of *the First National Congress on Irans Irrigation & Drainage*, 13-14 May., Ferdowsi University of Mashhad, Iran. (In Farsi)
- Yousofvand, F. and Monem, M.J. (2014a). Introducing the lopac gate and Estimating Flow Equation In Free Condition. In: Proceeding of *the 13th Iranian Hydraulic Conference*, 12-14 Nov., University of Tabriz, Iran. (In Farsi)
- Yousofvand, F. and Monem, M.J. (2014b). Estimating Flow Equation for Lopac Gate as new check structure with side compression using Energy Equation In Free Condition. In Proceeding of *The 2th National Conference on Farm Water Management*, 21 Oct ., Soil and Water Research Institute, Karaj, Iran. (In Farsi)
- Yousofvand, F., Monem, M.J. and Kavianpour, M.R. (2015). Experimental and Theoretical Analysis of Discharge Coefficient for Submerged Lopac Gate. *Iranian Journal of Irrigation and Drainage*, 5(9), 811-819. (In Farsi).
- Yousofvand, F., Monem, M.J. and Kavianpour, M.R. (2016). Estimating Flow and Discharge Coefficient Equations for Lopac Gate in Submerged Condition. *Iranian Water Research Journal, Accepted*. (In Farsi)