

## Discharge Analysis of SMBF Flumes in Free and Submerged Flow Conditions

YOUNES AMINPOUR<sup>1</sup>, ALIREZA VATANKHAH<sup>2\*</sup>, JAVAD FARHOUDI<sup>3</sup>

1. PhD Candidate of Water Structures, Department of Irrigation and Reclamation Engineering, Faculty of Agricultural Engineering and Technology, University College of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran.

2. Associate Professor, Department of Irrigation and Reclamation Engineering, Faculty of Agricultural Engineering and Technology, University College of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran, Karaj

3. Professor, Department of Irrigation and Reclamation Engineering, Faculty of Agricultural Engineering and Technology, University College of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran.

(Received: Jan. 26, 2019- Revised: March. 6, 2019- Accepted: March. 9, 2019)

### ABSTRACT

One of the most commonly used devices for flow measurements in open channels is the flume, in which the flow velocity increases due to the lateral contraction, raising the bottom of the channel, or a combination of both them. SMBF is a flume with the above mentioned properties, having two semi-cylinders on the side walls of the channel that contract the cross-sectional area of the flow. In this study, the SMBF flume has been studied for measuring the flow in free and submerged flow conditions. Using the experimental data (575 runs) of two rectangular channels, and using eight SMBF flumes, the proposed discharge equations were examined for the wide ranges of flow discharge, upstream depth, and contraction ratio. In the present study, based on the numerical and experimental analysis, and by measuring the velocity distribution at the throat section, non-uniformity of velocity distribution and depth in the contracted section, as well as the two-dimensional nature of flow were studied. Then, by considering the flow correction coefficients in the throat section and applying them into the energy equation, an equation was developed for estimating the flow discharge under free flow conditions. Also, two equations were developed to determine the submergence threshold (as a function of upstream depth and throat width) and for the discharge estimation under submerged conditions. The mean absolute relative error of the estimated flow discharge of the SMBF flumes in free flow conditions and based on three experimental data series (channel 1, channel 2, and other researcher's data) were respectively estimated to be 2.82, 3.19 and 1.52%. Additionally, the mean absolute relative error of the estimating flow discharge in the submerged conditions was 5.51%. The results showed a feasible application of SMBF structure, as a portable measuring instrument under free and submerged conditions.

**Keywords:** Flow Measurement, Flume, Free Flow, Submerged Flow, Submergence Threshold.

## تحلیل آبگذری فلوم‌های نوع SMBF در شرایط جریان آزاد و مستغرق

یونس امین پور<sup>۱</sup>، علیرضا وطن خواه<sup>۲\*</sup>، جواد فرهودی<sup>۳</sup>

۱. دانشجوی دکتری، گروه مهندسی آبیاری و آبادانی، دانشکده مهندسی و فناوری کشاورزی، دانشگاه تهران، کرج، ایران.

۲. دانشیار، گروه مهندسی آبیاری و آبادانی دانشکده مهندسی و فناوری کشاورزی، دانشگاه تهران، کرج، ایران.

۳. استاد، گروه مهندسی آبیاری و آبادانی، دانشکده مهندسی و فناوری کشاورزی، دانشگاه تهران، کرج، ایران.

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۱۱/۶ - تاریخ بازنگری: ۱۳۹۷/۱۲/۱۵ - تاریخ تصویب: ۱۳۹۷/۱۲/۱۸)

## چکیده

از رایج‌ترین وسیله‌های اندازه‌گیری جریان در مجاری روباز، فلوم‌ها می‌باشند که در آن سرعت جریان، بر اثر تنگ‌شدگی عرضی، برآمدگی کف و یا ترکیبی از این دو، افزایش می‌یابد. یکی از فلوم‌های با ویژگی فوق، فلوم SMBF است که با داشتن دو نیم‌استوانه در طرفین کانال، باعث تنگ‌شدگی عرضی می‌شود. در تحقیق حاضر سازه SMBF جهت اندازه‌گیری بده در شرایط جریان آزاد و مستغرق مورد مطالعه قرار گرفته است. بر اساس ۵۷۵ سری داده آزمایشگاهی بر روی دو کانال با ابعاد مختلف و استفاده از هشت نمونه فلوم SMBF، در محدوده وسیعی از بده، عمق بالادست، و نسبت تنگ‌شدگی عرضی، معادلات بده پیشنهادی مختلف، مورد مقایسه و ارزیابی قرار گرفتند. بر مبنای تحلیل‌های آزمایشگاهی، عددی و برداشت توزیع سرعت در مقطع گلوگاه، غیریکنواختی توزیع سرعت و عمق در مقطع تنگ‌شدگی و ماهیت دو بدهی جریان، تبیین گردید. سپس با در نظر گرفتن ضرایب تصحیح جریان در مقطع گلوگاه و اعمال آن در رابطه انرژی، معادله‌ای جهت تحلیل آبگذری این نوع فلوم‌ها در شرایط جریان آزاد استخراج شد. همچنین روابطی جهت تعیین آستانه استغراق (به صورت تابعی از عمق بالادست و عرض گلوگاه) و تحلیل آبگذری در شرایط جریان مستغرق استخراج گردید. میانگین قدر مطلق خطای نسبی بده تخمینی از رابطه پیشنهادی در شرایط جریان آزاد بر اساس سه مجموعه داده آزمایشگاهی (کانال ۱، کانال ۲ و داده‌های سایر محققین)، به ترتیب ۲/۸۲، ۳/۱۹ و ۱/۵۲ درصد است. همچنین میانگین خطای برآورد بده در شرایط جریان مستغرق، ۵/۵۱ درصد به دست آمد. نتایج نشان داد کاربرد سازه SMBF به‌عنوان یک ابزار اندازه‌گیری قابل حمل، در شرایط جریان آزاد و مستغرق امکان‌پذیر می‌باشد.

واژه‌های کلیدی: اندازه‌گیری جریان، فلوم، جریان آزاد، جریان مستغرق، آستانه استغراق.

## مقدمه

جریان توسعه داده شده و بر اساس داده‌های آزمایشگاهی واسنجی گردید. (Samani and Magallanez (1993) فلوم ساده‌ای را جهت تخمین بده جریان بر اساس اصل انرژی پیشنهاد کردند که در آن یک استوانه که نسبت قطر آن به کف کانال حدود ۰.۹۰٪ یا بیشتر می‌باشد، در وسط یک کانال دوزنقه‌ای قرار می‌گیرد. Samani and Magallanez (2000) فلوم ساده‌ای را با در نظر گرفتن دو نیم‌استوانه در طرفین یک کانال مستطیلی و ایجاد یک تنگ‌شدگی عرضی، جهت اندازه‌گیری بده جریان پیشنهاد نمودند. این فلوم با عنوان فلوم SMBF<sup>۴</sup> معرفی شده است که برای اندازه‌گیری دبی در کانال‌های با جریان زیر بحرانی در بالادست استفاده می‌شود. آن‌ها با فرض تشکیل عمق بحرانی در مقطع تنگ‌شدگی و در نظر گرفتن معادله انرژی بین بالادست و مقطع گلوگاه،

از رایج‌ترین وسیله‌های اندازه‌گیری جریان در مجاری روباز، فلوم‌های روباز می‌باشند که در آن سرعت جریان، بر اثر تنگ‌شدگی عرضی، برآمدگی کف و یا ترکیبی از این دو، افزایش می‌یابد. تاکنون فلوم‌های زیادی طراحی و توسط محققین متعددی مورد بررسی قرار گرفته‌اند که می‌توان به فلوم‌های با گلوگاه طولانی<sup>۱</sup>، فلوم‌های با گلوگاه کوتاه (فلوم‌های گلو بریده<sup>۲</sup>)، پارشال فلوم‌ها<sup>۳</sup>، و نتوری‌ها و غیره اشاره نمود. Samani et al. (1991) مشخصات جریان در یک فلوم دایره‌ای را با در نظر گرفتن استوانه‌ای در محور مرکزی فلوم مورد مطالعه قرار دادند. در مطالعه مذکور، با فرض تشکیل عمق بحرانی در مقطع استوانه و بر اساس معادله انرژی، یک مدل نرم‌افزاری جهت تخمین بده

\* نویسنده مسئول: arvatan@ut.ac.ir

1. Long-throat Flumes

2. Cut-throat Flumes

3. Parshall Flumes

4. Samani-Magallanez- Baiamonte- Ferro

هدف تحقیق حاضر مطالعه و بررسی ویژگی‌های آبگذری فلوم SMBF می‌باشد که در ادامه تشریح خواهد شد. Baiamonte and Ferro (2007) بر اساس اصل خود تشابهی ناقص و نظریه باکینگهام رابطه زیر را جهت برآورد بده فلوم SMBF در شرایط جریان آزاد ارائه نمودند:

$$\frac{y_c}{B_c} = a \left( \frac{h}{B_c} \right)^n \quad (\text{رابطه ۱})$$

که در آن،  $y_c$ ، عمق بحرانی؛  $h$ ، عمق بالادست سازه SMBF و  $B_c$ ، عرض گلوگاه می‌باشد. هم‌چنین  $a$  و  $n$ ، پارامترهای وابسته به نسبت تنگ‌شدگی،  $r$ ، و شیب کف کانال،  $i$ ، می‌باشند. برای دامنه  $0.17 \leq r \leq 0.33$  ضرایب عبارت‌اند از  $n = -0.0064i^2 + 0.0043i + 1.1481$  و  $a = 0.0030i^2 + 0.0057i + 0.7290$  همچنین برای  $0.48 \leq r \leq 0.81$  ضرایب پیشنهادی توسط مؤلفین به صورت  $a = -0.0288i + 0.6405$  و  $n = -0.1140i + 0.9660$  هستند. طبق نظر مؤلفین، رابطه فوق در محدوده  $0.17 \leq r = B_c / B \leq 0.85$  معتبر می‌باشد. Di Stefano et al. (2008) رابطه پیشنهادی توسط Baiamonte and Ferro (2007) را بر اساس اندازه‌گیری‌های صحرایی مورد ارزیابی قرار دادند. در این تحقیق واسنجی سازه مذکور با استفاده از یک فلوم ونتوری-خافاقی<sup>۲</sup> انجام شده است. نتایج نشان داد معادله پیشنهادی مذکور از دقت مناسبی برخوردار است.

رابطه‌ای را جهت تخمین بده در شرایط جریان آزاد پیشنهاد نمودند. هزینه کم و سادگی در ساخت، از مزایای فلوم مذکور نسبت به سایر فلوم‌ها می‌باشد. (Lotfi Kolavani et al. (2018) با رویکرد تحلیل ابعادی و نظریه خود تشابهی ناقص، روابطی را جهت تخمین بده در شرایط جریان آزاد با استفاده از یک فلوم دایره‌ای قابل حمل ارائه کردند. در مطالعه مذکور، تأثیر پارامترهای نسبت تنگ‌شدگی و شیب طولی کانال بر آبگذری فلوم‌های دایره‌ای مورد مطالعه قرار گرفت. (Lotfi Kolavani et al. (2019) یک فلوم آزمایشگاهی موسوم به CBF<sup>۱</sup> را در شرایط جریان آزاد و مستغرق مورد مطالعه قرار دادند. در این مطالعه دو روش مختلف تحلیل ابعادی توأم با نظریه خود تشابهی ناقص و اصل انرژی جهت تخمین بده در شرایط جریان آزاد مورد مطالعه قرار گرفت. نتایج نشان داد که روش تحلیل ابعادی دقت بیشتری نسبت به استفاده از رویکرد انرژی دارد. هم‌چنین یکی دیگر از محدودیت‌های استفاده از معادله انرژی نسبت به روش تحلیل ابعادی، ضمنی بودن آن عنوان گردید. آن‌ها هم‌چنین آستانه استغراق فلوم‌های CBF را مورد ارزیابی قرار داده و در این راستا، روابطی را با رویکرد تحلیل ابعادی و اصل اندازه حرکت ارائه کردند. در شکل ۱ تصاویری از فلوم‌های استوانه‌ای مورد استفاده در کانال‌های دایره‌ای و دوزنقه‌ای جهت اندازه‌گیری بده جریان نشان داده شده است.

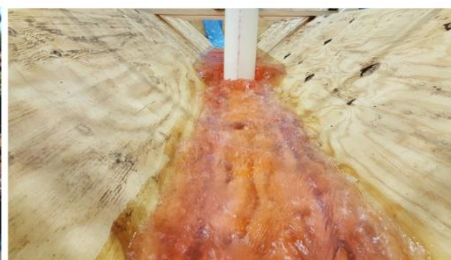
فلوم استوانه‌ای مورد استفاده در یک کانال دایره‌ای جهت اندازه‌گیری بده جریان - استرالیا



فلوم SMBF نصب شده در یک نهر آبیاری - نیومکزیکو - ساننافه



فلوم استوانه‌ای مورد استفاده در یک کانال دوزنقه‌ای جهت اندازه‌گیری بده جریان - آزمایشگاه آبیاری



فلوم SMBF نصب شده در یک کانال جهت اندازه‌گیری بده جریان - نیومکزیکو جنوبی



شکل ۱- تصاویری از فلوم‌های استوانه‌ای مورد استفاده در کانال‌های دایره‌ای و دوزنقه‌ای در شرایط آزمایشگاهی و میدانی (Samani, 2017)

تشکیل عمق بحرانی در مقطع تنگ‌شدگی به ازای یک بده و عرض تنگ‌شدگی مشخص و بر اساس اصل انرژی (بین بالادست و گلوگاه)، رابطه پیشنهادی توسط Carollo et al. (2016) را به صورت زیر اصلاح نمود:

$$\frac{Q}{B_c \sqrt{gh^3}} = \frac{0.826 \left[ 1 + 0.214 \left( \frac{h}{B_c} \right)^{0.76} \right]^{1.5}}{\left\{ \frac{1}{2} + \cos \left[ \frac{1}{3} \arccos (1 - 2r^2) \right] \right\}^{1.5}} \quad (\text{رابطه ۳})$$

Samani (2017) سه نوع فلوم (فلوم استوانه‌ای در کانال‌های دایره‌ای و دوزنقه‌ای و فلوم SMBF) را در شرایط صحرائی مورد مطالعه قرار داد و با در نظر گرفتن پارامترهای مؤثر بر جریان، رابطه‌ای رگرسیونی جهت تخمین بده جریان ارائه نمود. مطالعات مختلف انجام شده در ارتباط با فلوم SMBF همراه با رابطه بده-اشل پیشنهادی برای این سازه در جدول ۱ ارائه شده است.

Carollo et al. (2016) روش نظری نوینی را با استفاده از معادله انرژی جهت اندازه‌گیری بده از سازه SMBF ارائه و کارایی این روش با نتایج حاصل از نظریه خود تشابهی ناقص را با نتایج برداشت‌های صحرائی مقایسه کردند. آن‌ها با فرض تشکیل عمق بحرانی در فاصله کمی از گلوگاه و در پایین دست آن، رابطه‌ای درجه سه جهت تخمین بده جریان ارائه نموده و با حل تحلیلی آن، رابطه زیر را استخراج کردند.

$$Q = \frac{(B_c + \beta h) \sqrt{gh^{1.5}}}{\left\{ \frac{\alpha}{2} + \alpha \cos \left[ \frac{1}{3} \arccos \left( 1 - 2 \frac{(B_c + \beta h)^2}{B^2 \alpha^3} \right) \right] \right\}^{1.5}} \quad (\text{رابطه ۲})$$

که در آن،  $Q$ ، بده جریان؛  $B_c$ ، عرض گلوگاه؛  $B$ ، عرض کانال؛  $h$ ، عمق بالادست؛  $\alpha$  و  $\beta$ ، ضرایب ثابت می‌باشند ( $\alpha = 1.085, \beta = 0.243$ ). Vatankhah (2017) با اعمال تأثیر پس‌زدگی جریان و اصلاح عمق بالادست در تخمین بده، با فرض

جدول ۱- مشخصات مطالعات انجام شده در ارتباط با فلوم SMBF، توسط محققین مختلف

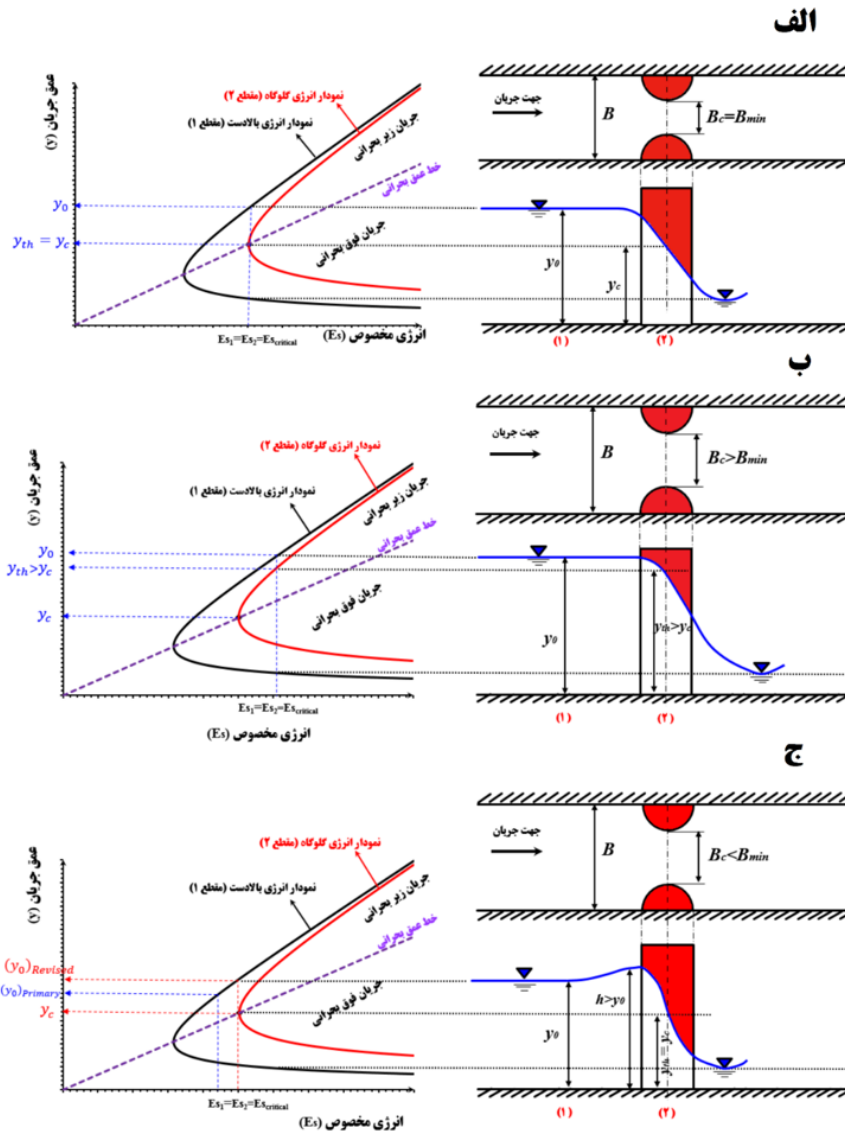
ردیف	نام محقق - سال	معادله پیشنهادی	نوع رویکرد	پارامترهای مؤثر
۱	Samani and Magallanez (2000)	$Q = C_d B_c \sqrt{g \left( \frac{2H}{3} \right)^3}$ $C_d = 1.33 - 0.44 \frac{d}{B} + \sin \left( 0.21 \frac{H}{B_c} \right)$	فرض تشکیل عمق بحرانی در مقطع تنگ‌شدگی و در نظر گرفتن معادله انرژی	$Q$ ، بده جریان، $C_d$ ، ضریب بده $B_c$ ، عرض گلوگاه، $g$ ، شتاب ثقل، $H$ ، انرژی بالادست، $d$ ، قطر لوله، $B$ ، عرض کانال
۲	Baiamonte and Ferro (2007)	$\frac{y_c}{B_c} = a \left( \frac{h}{B_c} \right)^n$ $a, n = f \left( i, r = \frac{B_c}{B} \right)$	استفاده از اصل خود تشابهی ناقص	$y_c$ ، عمق بحرانی، $B_c$ ، عرض گلوگاه، $h$ ، عمق بالادست، $a, n$ ، پارامترهای ثابت، $i$ ، شیب طولی کانال
۳	Di Stefano et al. (2008)	---	واسنجی رابطه ارائه شده توسط Baiamonte and Ferro (2007) در شرایط صحرائی	---
۴	Carollo et al. (2016)	$Q = \frac{(B_c + \beta h) \sqrt{gh^{1.5}}}{\left\{ \frac{\alpha}{2} + \alpha \cos \left[ \frac{1}{3} \arccos \left( 1 - 2 \frac{(B_c + \beta h)^2}{B^2 \alpha^3} \right) \right] \right\}^{1.5}}$	فرض تشکیل عمق بحرانی در فاصله کمی بعد از گلوگاه با در نظر گرفتن اصل انرژی	در معادله ۲ تعریف شده‌اند.
۵	Vatankhah (2017)	$\frac{Q}{B_c \sqrt{gh^3}} = \frac{0.826 \left[ 1 + 0.214 \left( \frac{h}{B_c} \right)^{0.76} \right]^{1.5}}{\left\{ \frac{1}{2} + \cos \left[ \frac{1}{3} \arccos (1 - 2r^2) \right] \right\}^{1.5}}$	اعمال اثر پس‌زدگی جریان بر تغییرات عمق بالادست و اصلاح رابطه Carollo et al. (2016)	در معادله ۳ تعریف شده‌اند.

موسوم به بد طراحی ( $Q = Q_{Design}, B_c = B_{min}$ ) رخ خواهد داد (شکل ۲- الف). در صورتی که مقدار بده جریان بیشتر از بده مذکور شود ( $Q > Q_{Design}, B_c < B_{min}$ )، بحرانی شدن شرایط

بر اساس اصول هیدرولیک، در یک مقطع مستطیلی شرایط جریان بحرانی در مقطع تنگ‌شدگی، بدون تغییر در مقدار انرژی بالادست و پس‌زدگی جریان، فقط و فقط به ازای یک بده معین

گلوگاه، رژیم جریان به صورت زیر بحرانی می‌باشد (شکل ۲-ج) (در شکل ۲،  $B_c$ ، عرض گلوگاه و  $B_{min}$ ، کمترین عرض است که به ازای آن جریان بدون پس‌زدگی، بحرانی خواهد شد).

جریان در گلوگاه، با پس‌زدگی جریان و تغییر عمق بالادست همراه خواهد بود (شکل ۲-ب). اما در شرایط بدون تشکیل عمق بحرانی در



شکل ۲- شرایط مختلف جریان عبوری از سازه SMBF الف- وقوع شرایط جریان بحرانی در گلوگاه، بدون پس‌زدگی جریان ( $Q = Q_{Design}, B_c = B_{min}$ ) ب) عدم تشکیل عمق بحرانی در گلوگاه ( $Q < Q_{Design}, B_c > B_{min}$ ) ج- تشکیل جریان بحرانی در گلوگاه در شرایط پس‌زدگی جریان و تغییر عمق بالادست ( $Q > Q_{Design}, B_c < B_{min}$ )

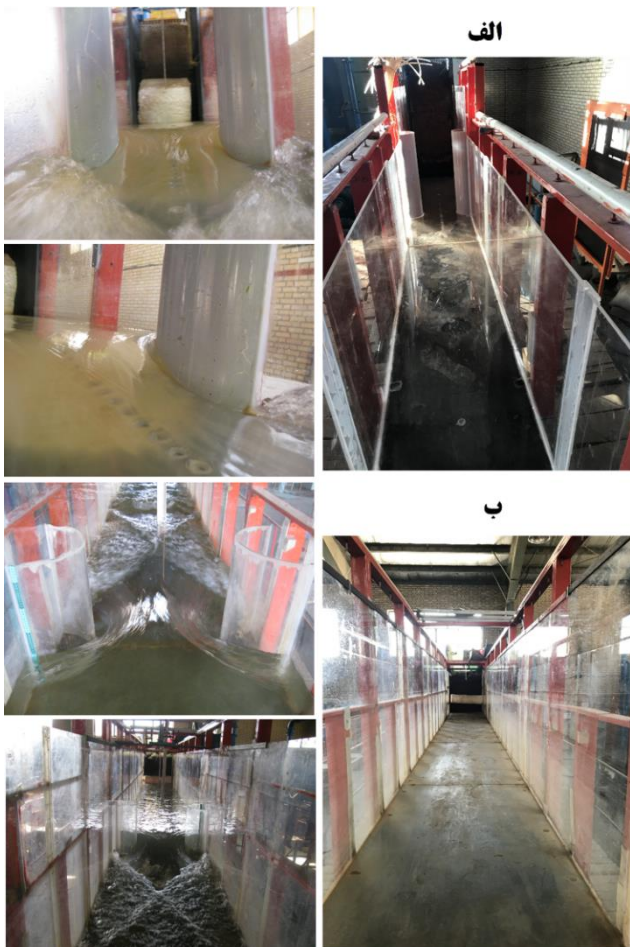
دو بُعدی و توزیع غیر یکنواخت سرعت و فشار در مقطع گلوگاه متأثر از شدت انحنای سطح آب در این مقطع است. در این تحقیق، مشابه با روش پیشنهادی توسط Carollo et al. (2016) و Vatankhah (2017)، با رویکرد استفاده از رابطه انرژی، آبگذری فلوم SMBF مورد مطالعه قرار گرفته است. همچنین شرایط جریان در مقطع تنگ‌شدگی بر اساس داده‌های آزمایشگاهی و شبیه‌سازی عددی جریان به صورت کامل تشریح شده است. تحلیل آبگذری فلوم‌های SMBF در شرایط جریان مستغرق

هر دو دیدگاه ارائه شده توسط Carollo et al. (2016) و Vatankhah (2017) مبتنی بر فرض اولیه تشکیل عمق بحرانی در مقطع گلوگاه، به ازای بده طراحی و سپس استفاده از رابطه انرژی، به ترتیب مبتنی بر اصلاح موقعیت تشکیل عمق بحرانی و اصلاح عمق بالادست استوار می‌باشند. از سوی دیگر، توسعه معادلات مذکور مبتنی بر فرض یکنواختی توزیع سرعت و فشار در مقطع تنگ‌شدگی یا مقطع رخداد عمق بحرانی و فرض جریان یک‌بُعدی است. یافته‌های اولیه تحقیق حاضر نشان‌دهنده جریان



انجام شد.

محدوده داده‌های آزمایشگاهی مورد استفاده و همچنین مشخصات هندسی کانال‌های آزمایشگاهی در جدول (۲) گزارش شده است. در مطالعه حاضر، از ۸۳ سری داده آزمایشگاهی (Baianonte and Ferro (2007) در شرایط جریان آزاد نیز استفاده شده است که مشخصات آن در جدول (۲) ذکر گردیده است. با توجه به جدول (۲)، محدوده پارامترهای مؤثر بدون بعد ( $h/B_c$ ،  $h/B$  و  $Q^* = Q/B\sqrt{gh^3}$ )، برای سه مجموعه داده آزمایشگاهی مورد استفاده هم‌پوشانی بسیار بالایی با یکدیگر داشته و از لحاظ محدودیت در استفاده از روابط پیشنهادی قبلی، مشکلی وجود نخواهد داشت. کمیت  $Q/B\sqrt{gh^3}$  بیانگر عدد فرود در کانال بالادست سازه می‌باشد که برای مجموعه داده‌های مختلف در حالت جریان آزاد، دامنه تغییرات آن مطابق جدول (۲) می‌باشد. همان‌طور که ملاحظه می‌گردد جریان در کانال بالادست زیر بحرانی می‌باشد.



شکل ۳- تصاویری از فلوم‌های آزمایشگاهی مورد استفاده در تحقیق حاضر  
الف- فلوم آزمایشگاهی شماره ۱، به عرض ۴۶/۳ سانتی‌متر ب- فلوم  
آزمایشگاهی شماره ۲، به عرض ۹۷/۳ سانتی‌متر

تاکنون مورد مطالعه قرار نگرفته است. بررسی آستانه استغراق و تحلیل آبگذری در شرایط جریان مستغرق، از اهداف تحقیق حاضر می‌باشد. علاوه بر آن، بر اساس داده‌های آزمایشگاهی در محدوده وسیعی از پارامترهای هندسی و هیدرولیکی، کارایی روش‌های پیشنهادی پیشین در تحلیل آبگذری مورد بررسی قرار گرفته است.

## مواد و روش‌ها

به منظور تحلیل مشخصات آبگذری فلوم‌های نوع SMBF در شرایط جریان آزاد و مستغرق، از هشت فلوم SMBF با نسبت تنگ‌شدگی‌های مختلف بر روی دو مدل آزمایشگاهی مستقر در آزمایشگاه تحقیقات مرکزی آب گروه مهندسی آبیاری و آبادانی پردیس کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران استفاده شد. کانال‌های آزمایشگاهی مورد استفاده به ترتیب دارای ۴۶/۳ سانتی‌متر و ۹۷/۳ سانتی‌متر عرض، ۶۰ سانتی‌متر و ۱۵۰ سانتی‌متر ارتفاع، ۵ متر و ۱۸ متر طول می‌باشند. نمای کلی مدل‌های آزمایشگاهی مورد استفاده در شکل ۳ نشان داده شده است. بده جریان در هر دو کانال با استفاده از فلومترهای الکترومغناطیس با مقدار خطای  $\pm 0.2\%$  درصد حداکثر مقدار قابل قبول مقیاس کامل<sup>۱</sup> (بده حداکثر) اندازه‌گیری شد. در شرایط جریان آزاد، بعد از به تعادل رسیدن شرایط جریان، عمق بالادست در کانال‌های شماره ۱ و ۲ به ترتیب، در فاصله ۱/۵ و ۵ متری بالادست مقطع گلوگاه اندازه‌گیری می‌شد. همچنین در شرایط جریان مستغرق، عمق پایاب با استفاده از یک دریچه کشویی (برای کانال‌های شماره ۱ و ۲، به ترتیب، در فاصله ۵ و ۱۸ متری انتهای پایین‌دست کانال) تنظیم شده و در کانال‌های شماره ۱ و ۲، به ترتیب در فواصل ۳/۳ و ۶ متری پایین‌دست مقطع گلوگاه، برداشت می‌گردید. لازم به ذکر است اندازه‌گیری اعماق بالادست و پایین‌دست با استفاده از عمق سنج با دقت  $\pm 0.1\%$  میلی‌متر انجام شد. پس از برداشت شرایط جریان آزاد، دریچه کشویی پایین‌دست به تدریج بسته می‌شد؛ به گونه‌ای که عمق بالادست به صورت جزئی افزایش یابد. این حالت به عنوان آستانه استغراق در آزمایشات در نظر گرفته شد و به ازای یک بده معین، اندازه‌گیری اعماق بالادست و پایین‌دست تا جایی که تقریباً با یکدیگر برابر می‌شدند (استغراق تقریبی ۱۰۰ درصد)، انجام می‌گرفت. همچنین جهت بررسی توزیع سرعت در مقطع گلوگاه، اندازه‌گیری مقادیر سرعت با استفاده از یک دستگاه ADV<sup>۲</sup> صورت گرفت. شبیه‌سازی عددی جریان جهت بررسی شرایط جریان در مقطع تنگ‌شدگی، با استفاده از نرم‌افزار Flow 3D, Ver. 11.2

جدول ۲- مشخصات پارامترهای مؤثر بر جریان و داده‌های مورد استفاده در مطالعه حاضر

پارامتر مورد نظر	علامت اختصاری	داده‌های آزمایشگاهی حاضر	
		کانال شماره ۱	کانال شماره ۲
بده جریان	$Q (l/s)$	۴/۵۸-۳/۱	۳/۱۰۲-۸/۳
عمق بالادست	$h (cm)$	۴/۲۸-۲/۲	۳/۲۹-۱/۶
عمق پایاب	$y_i (cm)$	۱/۳۹-۰/۰	۲/۳۸-۰/۰
عرض کانال	$B (cm)$	۴۶/۳	۹۷/۳
عرض گلوگاه	$B_c (cm)$	۱۵/۳۳-۸/۶	۳۳/۸۴-۳/۶
نسبت تنگ‌شدگی	$r = B_c / B$	۰/۰-۳۴/۷۳	۰/۰-۳۴/۸۷
تعداد فلوم‌های SMBF مورد استفاده	---	۴	۴
تعداد داده‌ها	$n$	۲۲۲	۲۷۰
محدوده پارامترهای بدون بعد	$h / B_c$	۰/۱-۱۲/۷۸	۰/۰-۰۵/۸۹
	$h / B$	۰/۰-۰۹/۶۱	۰/۰-۰۳/۳۰
	$Q^* = Q / B \sqrt{gh^3}$	۰/۰-۱۸/۵۲	۰/۰-۱۵/۵۷

## نتایج و بحث

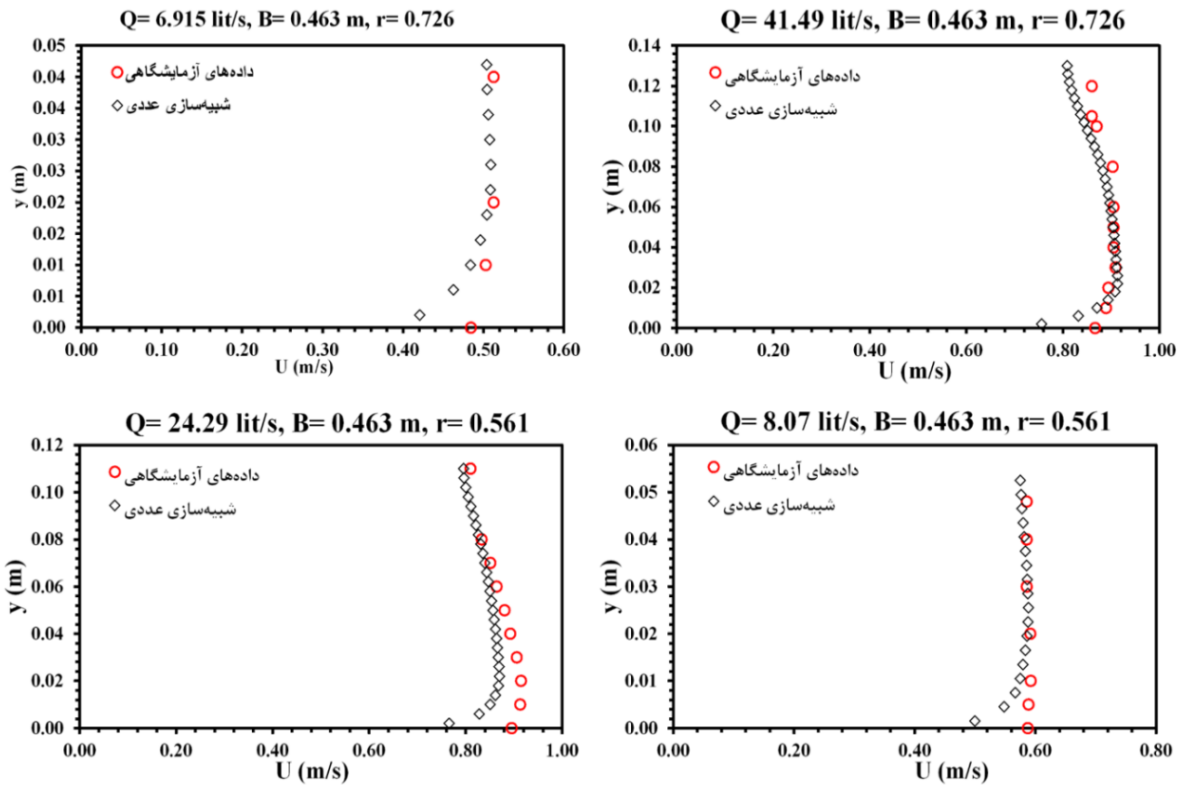
### بررسی عملکرد سازه SMBF در شرایط جریان آزاد

#### تحلیل الگوی جریان با استفاده از مدل عددی

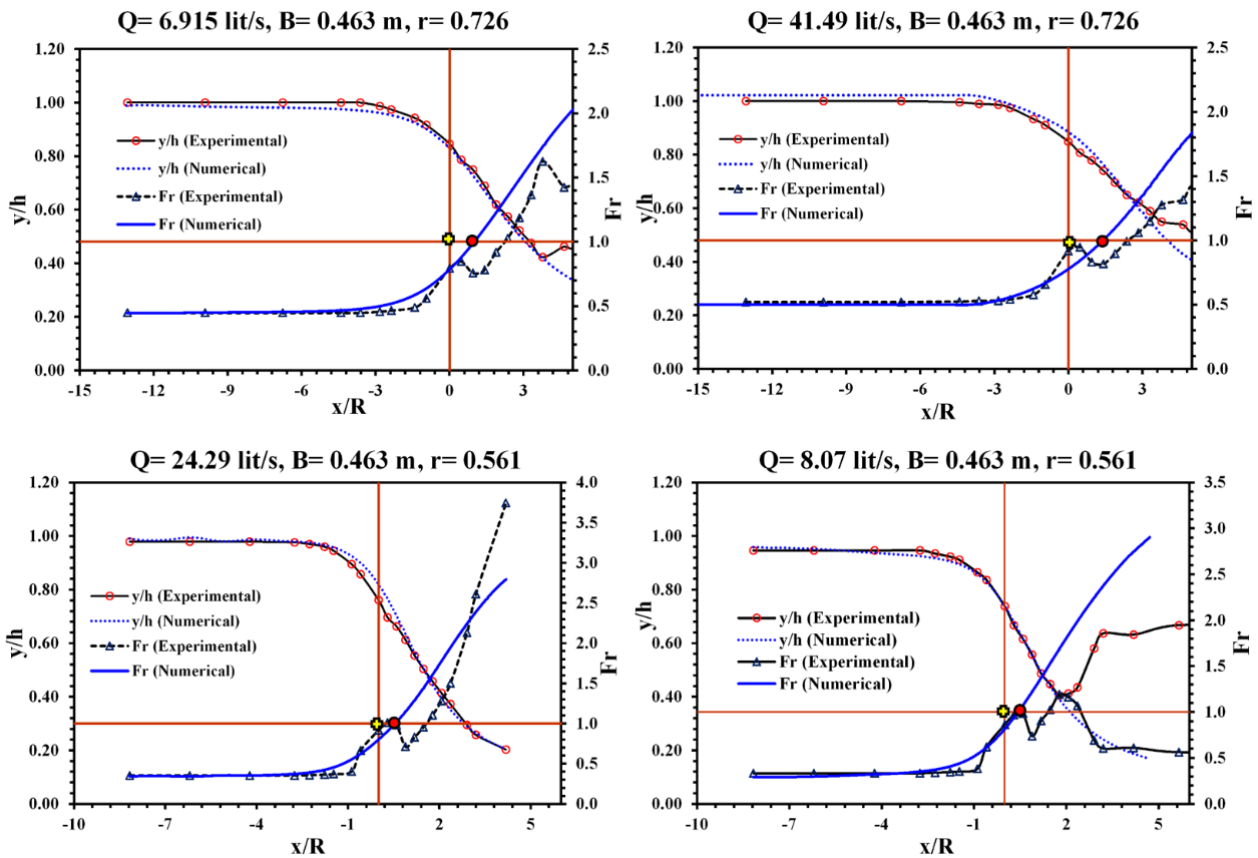
همان‌طور که قبلاً نیز اشاره گردید، روش‌های پیشنهادی پیشین توسط محققین مختلف بدون توجه به انحنای جریان در مقطع عرضی گلوگاه و با فرض یک‌بُعدی بودن جریان ارائه شده است. این در حالی است که غیریکنواخت بودن نیمرخ عرضی سطح آب باعث غیریکنواختی توزیع عرضی عدد فرود شده و محاسبه صحیح عدد فرود در مقطع گلوگاه در معادله انرژی را تحت تأثیر قرار می‌دهد. به همین منظور و در راستای بررسی وضعیت جریان در مقطع تنگ‌شدگی، از نتایج شبیه‌سازی عددی با استفاده از نرم‌افزار Flow 3D Ver. 11.2 استفاده گردید. شبیه‌سازی به ازای دو نسبت تنگ‌شدگی مختلف ( $r = 0.561, 0.726$ ) و به ازای هشت سری داده آزمایشگاهی در محدوده وسیعی از پارامترهای مؤثر بر جریان ( $0.158 \leq h/B_c \leq 0.436$ ) و ( $0.115 \leq h/B \leq 0.316$ ) انجام شد و مدل عددی بر اساس داده‌های آزمایشگاهی واسنجی گردید (مقایسه بده محاسباتی مدل عددی با بده آزمایشگاهی). در شکل ۴، مقایسه توزیع عمقی سرعت در محور مرکزی گلوگاه، در شرایط عددی و آزمایشگاهی نشان داده شده است که نشان‌دهنده صحت و دقت نتایج مستخرج از شبیه‌سازی عددی جریان می‌باشد. هم‌چنین در شکل ۵،

تغییرات نیمرخ طولی سطح آب و عدد فرود جریان در محور مرکزی کانال، در شرایط آزمایشگاهی و عددی مورد مقایسه و ارزیابی قرار گرفته است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، تطابق بسیار خوبی بین نتایج مستخرج از مدل عددی و داده‌های اندازه‌گیری شده در محیط آزمایشگاه وجود دارد. در گام اول، جهت بررسی یکنواختی یا غیر یکنواختی توزیع سرعت در گلوگاه، بر اساس داده‌های اندازه‌گیری سرعت در آزمایشگاه، ضریب تصحیح انرژی جنبشی ( $\alpha$ ) در مقطع عرضی گلوگاه به ازای شرایط مختلف آزمایشگاهی محاسبه شد که در تمامی موارد در محدوده  $0.9 - 1.1$  قرار گرفت. بنابراین بر اساس نتایج حاصل شده، مقدار ضریب تصحیح انرژی جنبشی در تحلیل‌های انجام شده، به صورت واحد در نظر گرفته خواهد شد ( $\alpha = 1$ ). در شکل ۶، نمونه‌هایی از توزیع سرعت اندازه‌گیری شده در آزمایشگاه در مقطع عرضی گلوگاه نشان داده شده است.

با توجه به شکل ۵، عدد فرود جریان در محور مرکزی کانال و مقطع تنگ‌شدگی ( $x/R = 0$ )، ( $R$  شعاع نیم‌استوانه چسبیده به جداره می‌باشد)، کمتر از یک بوده ( $Fr = 0.8$ ) و در صورت فرض جریان یک‌بُعدی و یکنواختی عرضی سطح آب در مقطع تنگ‌شدگی، جریان زیر بحرانی بوده و مقطع بحرانی به پایین دست منتقل خواهد شد. اما با بررسی شرایط عرضی جریان در مقطع تنگ‌شدگی، فرض یک‌بُعدی بودن جریان در گلوگاه نقض می‌شود.

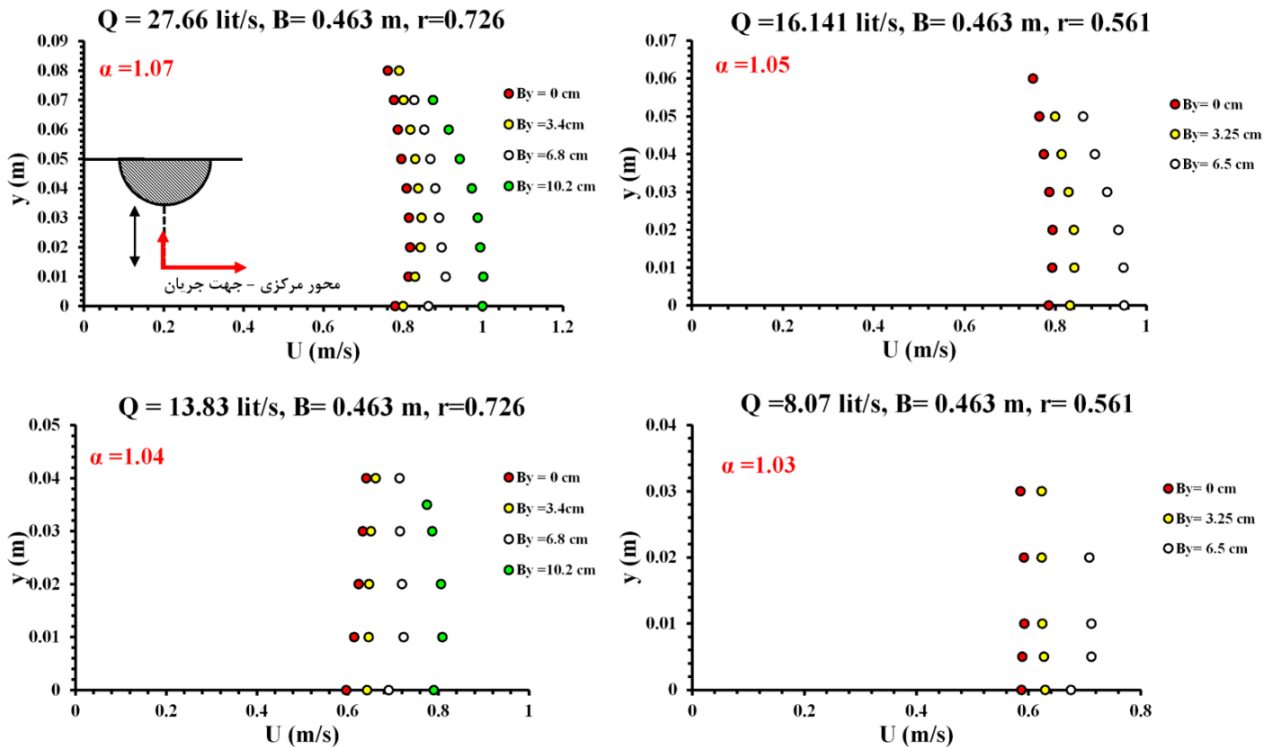


شکل ۴- مقایسه توزیع عمقی سرعت در محور مرکزی گلوگاه، در بررسی‌های عددی و آزمایشگاهی، به ازای بده و نسبت تنگ‌شدگی‌های مختلف



شکل ۵- تغییرات نیمرخ طولی سطح آب و عدد فرود جریان در محور مرکزی کانال، در بررسی‌های آزمایشگاهی و عددی





شکل ۶- نمونه‌هایی از توزیع سرعت اندازه‌گیری شده در آزمایشگاه در راستای عمقی و عرضی در مقطع تنگ‌شدگی و محاسبه ضریب تصحیح انرژی جنبشی متناظر

همچنین با در نظر گرفتن معادله انرژی بین بالادست و مقطع تنگ‌شدگی و فرض  $\alpha = 1$  می‌توان نوشت:

$$E_1 = E_2 = E_c \rightarrow h + \frac{Q^2}{2gB^2h^2} = \left(1 + \frac{K}{2}\right)y_c \quad (\text{رابطه ۵})$$

با در نظر گرفتن معادله (رابطه ۴) و با فرض  $r = B_c / B$  و  $\lambda = h / y_c$  رابطه فوق را می‌توان به صورت زیر بی‌بعد نمود:

$$\lambda^3 - \left(\frac{2+K}{2}\right)\lambda^2 + \left(\frac{K^3r^2}{2}\right) = 0 \quad (\text{رابطه ۶})$$

با در نظر گرفتن  $P = \left(\frac{2+K}{2}\right)$  و  $q = \left(\frac{K^3r^2}{2}\right)$ ، رابطه

فوق را می‌توان به صورت زیر در نظر گرفت:

$$\lambda^3 - P\lambda^2 + q = 0 \quad (\text{رابطه ۷})$$

این معادله، سه ریشه حقیقی دارد که تنها یک ریشه آن جواب قابل قبول مسئله حاضر می‌باشد. پس از حل معادله فوق، رابطه زیر جهت برآورد مقدار بده جریان به دست می‌آید: (رابطه ۸)

$$Q = \frac{B_c g^{0.5} h^{1.5}}{\left[ \left( \frac{2+K}{6K} \right) \left( 1 + 2 \cos \left\{ \frac{1}{3} \arccos \left( 1 - \frac{54K^3r^2}{(2+K)^3} \right) \right\} \right) \right]^{1.5}}$$

ضریب اصلاحی  $K$ ، تنها بر اساس داده‌های آزمایشگاهی Baiamonte and Ferro (2007) واسنجی و به صورت تابعی از نسبت  $h / B$  ارائه شده است (شکل ۹). اما اعتبارسنجی رابطه

در شکل ۷ تغییرات نیمرخ عرضی سطح آب و عدد فرود جریان در گلوگاه به ازای شرایط مختلف آزمایشگاهی ارائه شده است. با توجه به شکل ۷، در محور مرکزی گلوگاه، بیشترین عمق و کمترین عدد فرود جریان مشاهده می‌شود. هرچه از محور مرکزی فاصله گرفته و به سمت جداره حرکت می‌کنیم، از عمق جریان کاسته شده و عدد فرود افزایش می‌یابد که نشان‌دهنده غیریکنواخت بودن شرایط جریان در مقطع عرضی گلوگاه می‌باشد. از طرفی، جهت فرض تشکیل جریان بحرانی در گلوگاه، لازم است شرایط کل مقطع را در نظر گرفت و تنها به وضعیت جریان در محور مرکزی اکتفا نکرد. به همین منظور، جهت اعمال بحث مذکور در استخراج روابط تخمین بده تحت شرایط جریان آزاد، سطح مقطع جریان در گلوگاه به صورت یک مستطیل معادل با مساحت واقعی جریان فرض می‌شود که عرضی برابر با عرض گلوگاه داشته و عمق جریان به صورت ضریبی از عمق بحرانی در نظر گرفته خواهد شد (شکل ۸). با در نظر گرفتن فرض مذکور ( $A_c = KB_c y_c$ )، عمق بحرانی را می‌توان به صورت زیر محاسبه نمود:

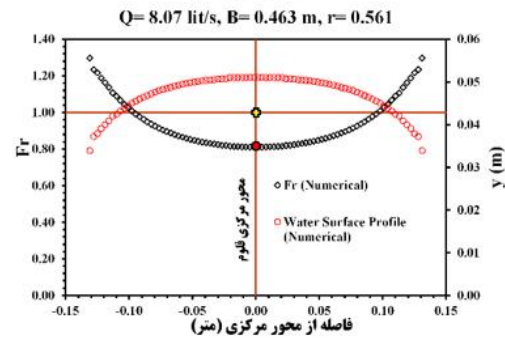
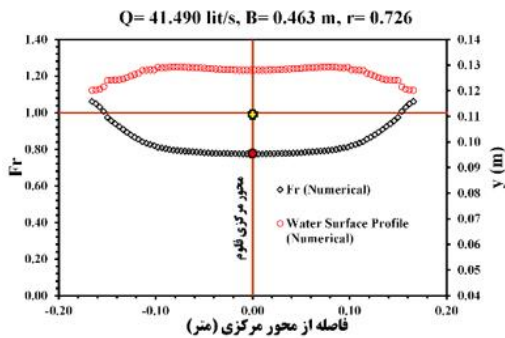
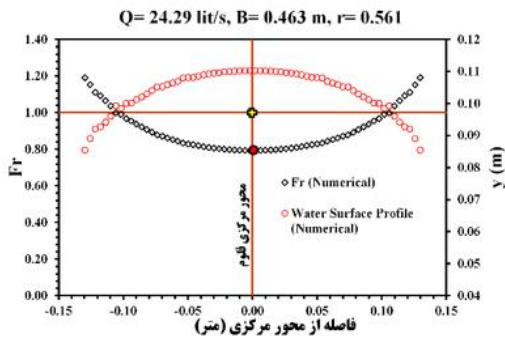
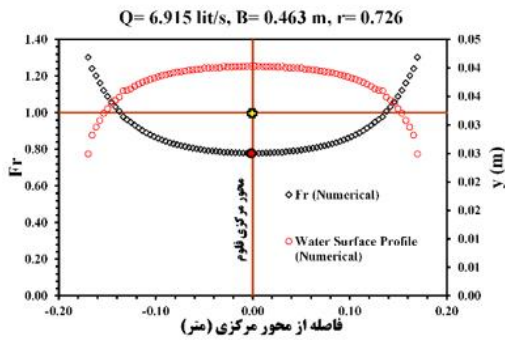
$$y_c = \frac{1}{K} \left( \frac{\alpha^2 Q^2}{B_c^2 g} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (\text{رابطه ۴})$$

که در این رابطه،  $y_c$ ، عمق بحرانی؛  $\alpha$ ، ضریب تصحیح انرژی جنبشی؛  $Q$ ، بده جریان؛  $K$ ، ضریب تصحیح عمق جریان در گلوگاه؛  $B_c$ ، عرض گلوگاه و  $g$ ، شتاب ثقل می‌باشد.

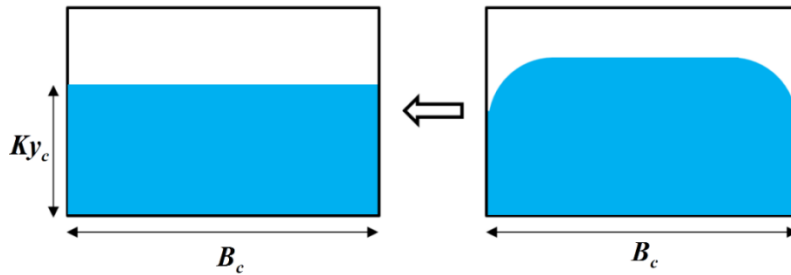
داده‌های آزمایشگاهی در جدول ۳ ارائه گردیده است. مقدار میانگین قدر مطلق خطای نسبی برای کانال‌های شماره ۱ و ۲ و همچنین داده‌های آزمایشگاهی (Baiamonte and Ferro (2007) به ترتیب ۲/۸۲، ۳/۱۹ و ۱/۵۲ درصد به دست آمد که بیانگر دقت بسیار خوب رابطه پیشنهادی می‌باشد.

پیشنهادی (معادله (رابطه ۸)) بر اساس داده‌های آزمایشگاهی کانال‌های شماره ۱ و ۲ انجام شده است.

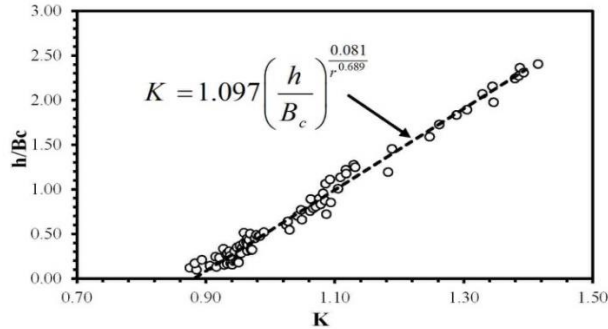
در شکل ۱۰، دقت و صحت رابطه پیشنهادی به تفکیک داده‌های آزمایشگاهی مورد استفاده نشان داده شده است. همچنین مقادیر شاخص‌های آماری مورد استفاده به تفکیک



شکل ۷- تغییرات نیمرخ عرضی سطح آب و عدد فرود جریان در گلوگاه به ازای شرایط مختلف آزمایشگاهی

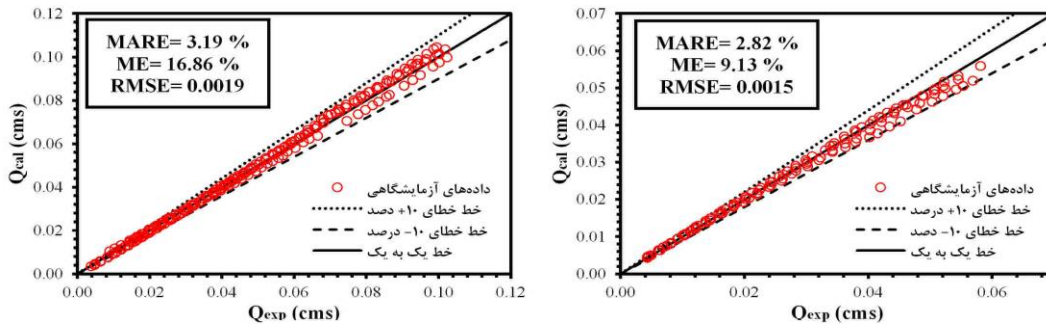


شکل ۸- در نظر گرفتن مستطیل معادل مساحت جریان در عرض گلوگاه

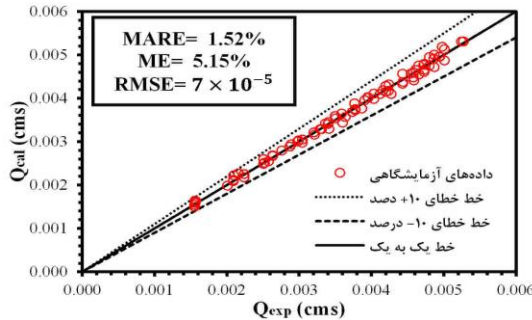


شکل ۹- تعیین ضریب اصلاحی K به صورت تابعی از h/Bc بر اساس داده‌های بیامونته و فرو (۲۰۰۷)

الف) داده‌های آزمایشگاهی برداشت شده در فلوم با عرض ۴۶/۳ سانتی متر (ب) داده‌های آزمایشگاهی برداشت شده در فلوم با عرض ۹۷/۳ سانتی متر



ج) داده‌های آزمایشگاهی برداشت شده توسط بیامونته و فرو (۲۰۰۷)



شکل ۱۰- مقادیر بده جریان محاسباتی از معادله (رابطه ۸) در مقابل مقادیر بده آزمایشگاهی

$$\%RE = \left( \frac{Q_{exp} - Q_{cal}}{Q_{exp}} \right) \times 100 \quad \text{(رابطه ۹)}$$

$$\%MARE = \frac{100}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{Q_{i(exp)} - Q_{i(cal)}}{Q_{i(exp)}} \right| \quad \text{(رابطه ۱۰)}$$

$$\%ME = \left( \text{Max} \left| \frac{Q_{i(exp)} - Q_{i(cal)}}{Q_{i(exp)}} \right| \right) \times 100 \quad \text{(رابطه ۱۱)}$$

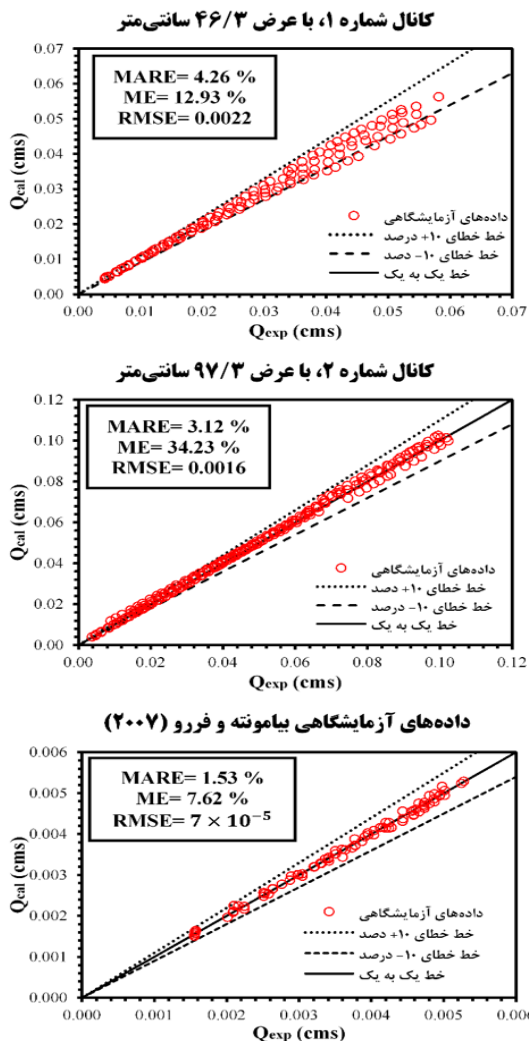
به منظور ارزیابی دقت و صحت روابط پیشنهادی پیشین جهت برآورد بده جریان در شرایط جریان آزاد با استفاده از فلوم SMBF، از شاخص‌های آماری خطای نسبی ( $\%RE$ )، میانگین قدر مطلق خطای نسبی ( $\%MARE$ )، حداکثر خطا ( $\%ME$ ) و جذر میانگین مربعات خطا ( $RMSE$ ) استفاده گردید. این شاخص‌ها به صورت زیر تعریف می‌شوند:

Baiamonte and Ferro (2007) می‌باشد. با این حال ملاحظه می‌گردد روابط پیشنهادی توسط Carollo et al. (2016) و Vatankhah (2017) که مبتنی بر معادله انرژی هستند از قابلیت مناسبی در تحلیل آبگذری فلوم SMBF در تمام سری داده‌های مورد استفاده برخوردار می‌باشند. میانگین قدر مطلق خطای نسبی در تعیین بده از رابطه پیشنهادی (Carollo et al. (2016) بر اساس داده‌های کانال ۱، ۲ و ۳ (Baiamonte and Ferro (2007) به ترتیب، معادل ۴/۳۸، ۳/۶۷ و ۱/۸۲ درصد می‌باشد (شکل ۱۱- الف). هم‌چنین میانگین قدر مطلق خطای نسبی در تعیین بده از رابطه پیشنهادی (Vatankhah (2017) بر اساس داده‌های کانال ۱، ۲ و ۳ (Baiamonte and Ferro (2007) به ترتیب معادل ۴/۲۶، ۳/۱۲ و ۱/۵۳ درصد می‌باشد (شکل ۱۱- ب). در نتیجه، استفاده از معادله انرژی در تحلیل آبگذری فلوم‌های SMBF نسبت به روش‌های رگرسیونی از عمومیت بیشتری برخوردار است.

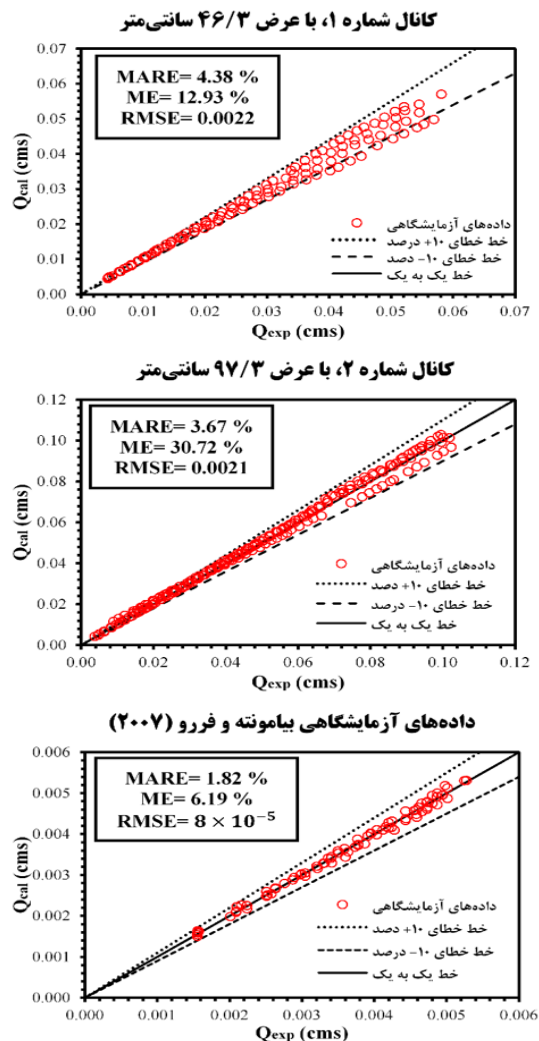
$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Q_{i(exp)} - Q_{i(cal)})^2} \quad (\text{رابطه ۱۲})$$

در این روابط،  $Q_{i(cal)}$  بده محاسباتی از معادلات پیشنهادی،  $Q_{i(exp)}$  بده آزمایشگاهی و  $n$  تعداد داده‌ها می‌باشد. رابطه پیشنهادی توسط Baiamonte and Ferro (2007) (معادله ۱) برای فلوم‌ها و داده‌های آزمایشگاهی مختلف مورد بررسی قرار گرفت. بدیهی است که این معادله برای داده‌های آزمایشگاهی (Baiamonte and Ferro (2007) که با استفاده از آن استخراج شده است، از دقت خوبی برخوردار است ( $MARE = 3.07\%$ ). با این حال، در صورت استفاده از سایر داده‌های آزمایشگاهی در محدوده نسبتاً یکسان پارامترهای مؤثر ( $Q^* = Q/B\sqrt{gh^3}$  و  $h/B$ ,  $h/B_c$ )، دقت معادله کاهش یافته و به ۹/۸۸ درصد برای کانال ۱ و ۶/۵۴ درصد برای کانال ۲ افزایش می‌یابد. دلیل این امر، شدت وابستگی روابط مبتنی بر تحلیل‌های رگرسیونی به داده‌های پایه مورد استفاده در رابطه پیشنهادی

### ب



### الف



شکل ۱۱- مقادیر بده جریان مشاهداتی در مقابل بده جریان محاسباتی از الف) معادله پیشنهادی (Carollo et al. (2016) ب) معادله پیشنهادی Vatankhah (2017)

جدول ۳- تغییرات شاخص‌های آماری برای روابط پیشنهادی مختلف جهت تخمین بده جریان با استفاده از فلوم SMBF، در شرایط جریان آزاد

داده‌های آزمایشگاهی مور استفاده									محقق/محققین
داده‌های Baiamonte and Ferro (2007)			کانال شماره ۲ (عرض ۹۷/۳ سانتی‌متر)			کانال شماره ۱ (عرض ۴۶/۳ سانتی‌متر)			
MARE	ME	RMSE	MARE	ME	RMSE	MARE	ME	RMSE	
۳/۰۷	۱۲/۳۰	۰/۰۰۰۱	۶/۵۴	۳۹/۲۱	۰/۰۰۳۰	۹/۸۸	۲۴/۹۸	۰/۰۰۵۴	Baiamonte and Ferro (2007) - معادله (۱)
۱/۸۲	۶/۱۹	۰/۰۰۰۰۸	۳/۶۷	۳۰/۷۲	۰/۰۰۲۱	۴/۳۸	۱۲/۹۲	۰/۰۰۲۲	Carollo et al. (2016) - معادله (۲)
۱/۵۳	۷/۶۲	۰/۰۰۰۰۷	۳/۱۲	۳۴/۲۳	۰/۰۰۱۶	۴/۲۶	۱۲/۹۳	۰/۰۰۲۲	Vatankhah (2017) - معادله (۳)
۱/۵۲	۵/۱۵	۰/۰۰۰۰۷	۳/۱۹	۱۶/۸۶	۰/۰۰۱۹	۲/۸۲	۹/۱۳	۰/۰۰۱۵	تحقیق حاضر - معادله (۸)

عمق پایاب برداشت‌شده و عمق پایایی که به ازای یک بده معین، باعث تغییر در عمق بالادست به صورت جزئی می‌شود، تعیین گردد. شکل ۱۳- الف) منحنی مقادیر استخراج‌شده عمق بالادست نسبی  $(h/B_c)$  و عمق پایاب نسبی  $(y_{i(L)}/B_c)$  در شرایط آستانه استغراق را نشان می‌دهد. از برآزش نقاط مذکور، رابطه زیر جهت برآورد حد تبدیل شرایط جریان آزاد به جریان مستغرق به دست می‌آید:

$$\frac{y_{i(L)}}{B_c} = 0.771 \left( \frac{h}{B_c} \right)^{0.915} \quad (\text{رابطه ۱۳})$$

با توجه به شکل ۱۳، به ازای مقادیر عمق پایاب بیش‌تر از  $y_{i(L)}$ ، جریان مستغرق و به ازای مقادیر کمتر، شرایط جریان به صورت آزاد خواهد بود. در شکل ۱۳- ب) مجموعه داده‌های آزمایشگاهی در شرایط جریان آزاد و جریان مستغرق به صورت تفکیک‌شده مشاهده می‌شود. در شرایط جریان مستغرق (۱۰۵ داده)، عمق پایین‌دست نیز بر آبگذری سازه مؤثر است. معادله پیشنهادی جهت برآورد بده در شرایط جریان مستغرق به صورت زیر است:

$$\frac{Q_s}{Q_f} = 0.96 \left[ 1 - 0.64 \left( \frac{y_t}{h} \right)^{22.32} \right] \quad (\text{رابطه ۱۴})$$

که در این رابطه،  $Q_s$  و  $Q_f$ ، به ترتیب، بده در شرایط جریان مستغرق و آزاد هستند. لازم به ذکر است مقادیر  $Q_f$ ، از معادله پیشنهادی در شرایط جریان آزاد (معادله (۸) حاصل گردیده، و تأثیر سایر پارامترها اعم از  $r = B_c/B$  و  $h/B$  در محاسبه  $Q_f$  دیده شده است. در شکل ۱۴ تغییرات  $Q_s/Q_f$  در مقابل  $(y_t/h)$  و هم‌چنین، دقت و صحت معادله پیشنهادی مذکور نشان داده شده است. میانگین قدر مطلق خطای نسبی در

با توجه به جدول ۳، ملاحظه می‌شود روش‌های مبتنی بر کاربرد معادله انرژی اعم از (Carollo et al. (2016, Vatankhah (2017) و تحقیق حاضر، در تعیین آبگذری فلوم SMBF به ازای شرایط جریان آزاد، عمومیت بیشتری داشته و خطای تعیین بده از این روش‌ها بر اساس مجموعه داده‌های مختلف آزمایشگاهی، نسبتاً ثابت است. به طوری که بر اساس ۳ سری داده‌های آزمایشگاهی مورد استفاده، خطای تعیین آبگذری از این روش‌ها، افزایش قابل توجهی نیافته است. با این حال، روش پیشنهادی (Baiamonte and Ferro (2007، مبتنی بر اصل خود تشابهی ناقص به دلیل شدت وابستگی به داده‌های آزمایشگاهی، با افزایش قابل توجه خطای تعیین بده از حدود ۳ درصد بر اساس داده‌های پایه، به ۹/۹ درصد در داده‌های کانال شماره ۱ و ۶/۵ درصد در کانال شماره ۲ افزایش یافته است. در شرایط جریان آزاد، رویکرد پیشنهادی در این تحقیق، نسبت به مطالعات (Carollo et al. (2016) و (Vatankhah (2017 مقدار خطای تخمین بده را به صورت جزئی بهبود داده است. هم‌چنین روش پیشنهادی، صحت کاربرد رابطه انرژی و توجه به غیریکنواختی سطح آب در مقطع گلوگاه را بیان می‌کند.

#### بررسی عملکرد سازه SMBF در شرایط جریان مستغرق

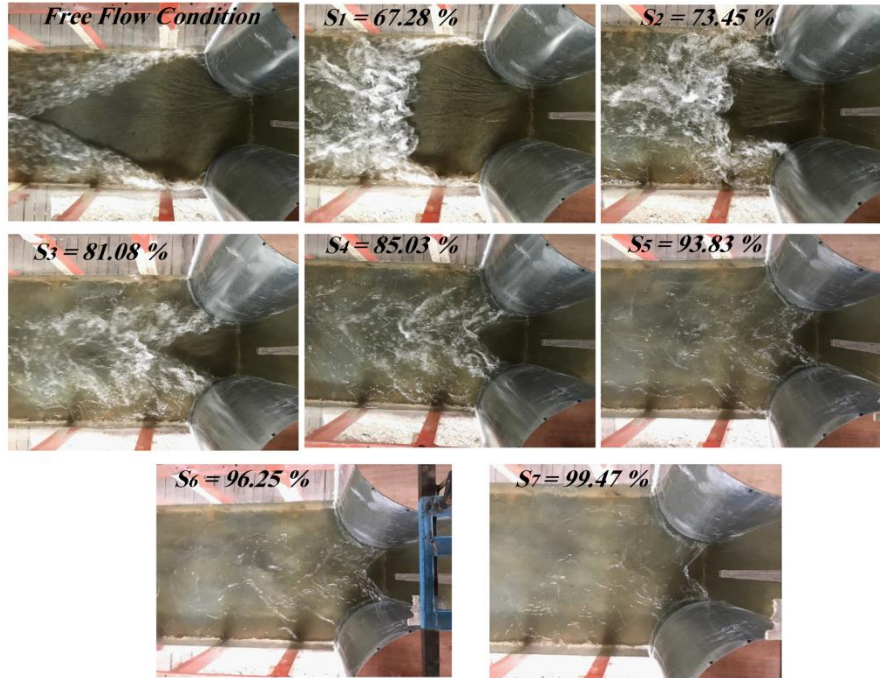
در شرایط جریان مستغرق، جریان در بالادست سازه در تمامی حالات زیر بحرانی بود و دامنه‌ی تغییرات عدد فرود بالادست سازه در محدوده ۰/۰۹ تا ۰/۵۴ و دامنه‌ی تغییرات عدد فرود در پایین‌دست سازه در محدوده ۰/۰۹۱ تا ۰/۷۰ قرار داشت.

در شکل ۱۲ نحوه تبدیل شرایط جریان آزاد به جریان مستغرق با درصد استغراق‌های مختلف، به ازای یک بده معین نشان داده شده است. جهت تعیین حد تبدیل شرایط جریان آزاد به جریان مستغرق، بایستی تغییرات عمق بالادست سازه در مقابل

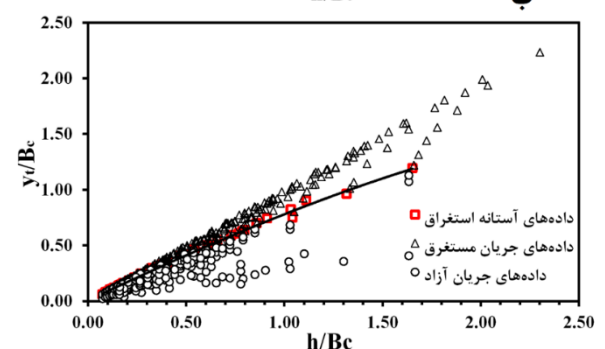
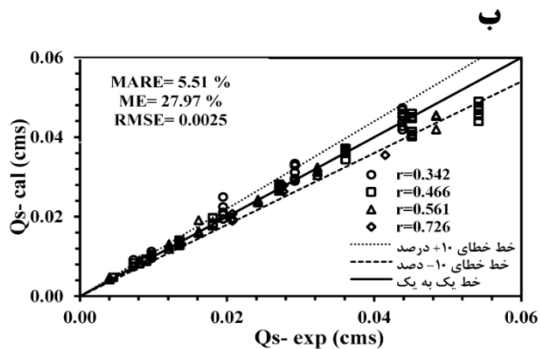
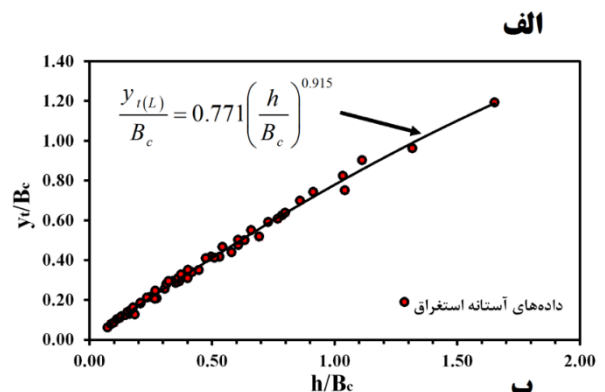
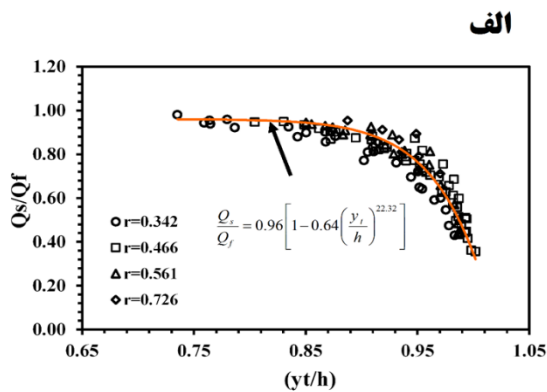


تعیین بده از رابطه پیشنهادی تحت شرایط جریان مستغرق،  $0.95 \leq y_t/h \leq 1$  و تأثیر خطای اندازه‌گیری برداشت درصد می‌باشد. افزایش خطای تعیین آبگذری در این حالت، متأثر از برداشت بخشی از داده‌ها در محدوده استغراق‌های قابل توجه

تعیین بده از رابطه پیشنهادی تحت شرایط جریان مستغرق،  $0.95 \leq y_t/h \leq 1$  و تأثیر خطای اندازه‌گیری برداشت درصد می‌باشد. افزایش خطای تعیین آبگذری در این حالت، متأثر از برداشت بخشی از داده‌ها در محدوده استغراق‌های قابل توجه



شکل ۱۲- نحوه تبدیل شرایط جریان آزاد به جریان مستغرق در  $r = 0.342$  و  $B = 0.973m$  و  $Q = 59.75l/s$



شکل ۱۴- الف) تغییرات  $\frac{Q_s}{Q_f}$  در مقابل  $\frac{y_t}{h}$  در شرایط جریان مستغرق (ب) مقایسه بده جریان مستغرق محاسباتی از معادله (۱۲) در مقابل مقادیر مشاهداتی

شکل ۱۳- الف) زوج مقادیر اعماق نسبی بالادست و پایین‌دست جهت تعیین آستانه استغراق (ب) مجموعه داده‌های آزمایشگاهی در شرایط جریان آزاد و مستغرق



## نتیجه‌گیری

مقطع گلوگاه و اِعمال آن به صورت ضریبی در رابطه انرژی، معادله‌ای جهت تخمین آبگذری فلوم‌های SMBF در شرایط جریان آزاد استخراج گردید. هم‌چنین روابطی جهت تعیین آستانه استغراق و تحلیل آبگذری در شرایط جریان مستغرق ارائه گردید. میانگین قدر مطلق خطای نسبی جهت تخمین آبگذری فلوم‌های SMBF در شرایط جریان خروجی آزاد از سازه فلوم بر اساس سه مجموعه داده آزمایشگاهی (کانال شماره ۱، کانال شماره ۲ و داده‌های آزمایشگاهی (Baiaomonte and Ferro (2007)، به ترتیب ۲/۸۲، ۳/۱۹ و ۱/۵۲ درصد برآورد گردید. هم‌چنین میانگین قدر مطلق خطای نسبی جهت برآورد بده در شرایط جریان مستغرق با لحاظ کردن اثر عمق پایاب، ۵/۵۱ درصد به دست آمد. بر اساس نتایج آزمایشگاهی و تحلیلی تحقیق حاضر، کاربرد سازه SMBF به‌عنوان یک ابزار اندازه‌گیری قابل حمل در شرایط جریان آزاد و مستغرق در کانال‌های با جریان زیر بحرانی پیشنهاد می‌گردد.

مطالعه حاضر، مشخصات آبگذری فلوم‌های SMBF را در شرایط جریان آزاد و مستغرق مورد بررسی قرار داده است. بر این اساس نتایج ۵۷۵ آزمایش بر روی ده فلوم SMBF، در محدوده گسترده‌ای از بده، عمق بالادست و نسبت تنگ‌شدگی عرضی، بر روی دو کانال آزمایشگاهی، معادلات پیشنهادی مختلف جهت برآورد بده جریان در شرایط جریان آزاد مورد مقایسه و ارزیابی (اعتبارسنجی) قرار گرفتند. با در نظر گرفتن معادله انرژی بین بالادست فلوم و مقطع تنگ‌شدگی، رابطه‌ای جهت تعیین آبگذری فلوم‌های SMBF در شرایط جریان آزاد ارائه شد. بر اساس تحلیل‌های عددی و برداشت‌های آزمایشگاهی توزیع سرعت در مقطع گلوگاه، غیر یکنواختی توزیع‌های سرعت و عمق در مقطع تنگ‌شدگی و ماهیت دو بُعدی جریان، تبیین گردید. سپس با در نظر گرفتن ضرایب تصحیح مربوط به ماهیت دو بُعدی جریان در

## REFERENCES

- Baiaomonte, G., and Ferro, V. (2007). Simple flume for flow measurement in sloping open channel. *Journal of irrigation and drainage engineering*, 133(1), 71-78.
- Carollo, F. G., Di Stefano, C., Ferro, V., and Pampalone, V. (2016). New Stage-Discharge Equation for the SMBF Flume. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 142(5), 04016005.
- Di Stefano, C., Di Piazza, G. V., and Ferro, V. (2008). Field testing of a simple flume (SMBF) for flow measurement in open channels. *Journal of irrigation and drainage engineering*, 134(2), 235-240.
- Lotfi Kolavani, F., Bijankhan, M., Di Stefano, C., Ferro, V., and Mazdeh, A. M. (2018). Flow measurement using circular portable flume. *Flow Measurement and Instrumentation*, 62, 76-83.
- Lotfi Kolavani, F., Bijankhan, M., Di Stefano, C., Ferro, V., and Mazdeh, A. M. (2019). Experimental Study of Central Baffle Flume. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 145(3), 1-14.
- Samani, Z. (2017). Three simple flumes for flow measurement in open channels. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 143(6), 04017010.
- Samani, Z., and Magallanez, H. (1993). Measuring water in trapezoidal canals. *Journal of irrigation and drainage engineering*, 119(1), 181-186.
- Samani, Z., and Magallanez, H. (2000). Simple flume for flow measurement in open channel. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 126(2), 127-129.
- Samani, Z., Jorat, S., and Yousaf, M. (1991). Hydraulic characteristics of circular flume. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 117(4), 558-566.
- Vatankhah, A. R. (2017). Discussion of "New Stage-Discharge Equation for the SMBF Flume" by Francesco Giuseppe Carollo, Costanza Di Stefano, Vito Ferro, and Vincenzo Pampalone. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 143(8), 07017011.