

Flow Measurement in Canals using Trapezoidal Flumes with Cylindrical Piers

EBRAHIM VALIZADEGAN^{*}, NEGAR AGHDASI¹

1. Department of Water Engineering, Faculty of Agriculture, Islamic Azad University, Khoy Branch, Khoy, Iran.
(Received: Dec. 19, 2020- Revised: Apr. 16, 2021- Accepted: Apr. 24, 2021)

ABSTRACT

Due to the high cost and the need for Experts to use advanced flow measuring equipment in canals, the use of simple, inexpensive and low-cost methods has always been considered by researchers and operating companies of irrigation and drainage networks. In this study, flow measurement in canals has been investigated experimentally using trapezoidal flumes with cylindrical pier in four side slopes. By measuring the flow depth at upstream and downstream of the flume throat, separate relationships and graphs were obtained to calculate the discharge at each studied side slopes on the base of functional relationships (both in free and submerged flow conditions). Also for the studied side slopes, one relation for free flow conditions and two relations for submerged flow conditions were obtained. Mean absolute relative error (MARE) for calculation of dimensionless discharge using the obtained relationships under free flow conditions was obtained 6.2, 4.6, 8.1 and 9.4%, and under submerged flow conditions was obtained 25.17, 22.9, 19 and 14% respectively in side slopes (z) of 1, 0.7, 0.4663 and 0.268. The value of MARE for calculation of dimensionless discharge using the obtained relation for all studied side slopes was obtained 8.2% under free flow conditions and 35.9 and 34.3% under submerged flow conditions (using two related equations). The maximum root mean square error (RMSE) for calculation of dimensionless discharge for the all studied side slopes, was obtained 0.078 under free flow conditions and 0.34 and 0.38 under submerged flow conditions (using two related equations). Then, using the related relation to each side slope (separately) has less error compared to using a relation for all side slopes.

Keywords: Free Flow, Submerged Flow, Trapezoidal Canals, Cylindrical Piers, Dimensional Analysis.

* Corresponding Author's Email: ebrahim.valizadegan@iaukhoy.ac.ir

اندازه‌گیری جریان در کانال‌ها با استفاده از فلوم‌های دوزنقه‌ای با پایه‌های استوانه‌ای

ابراهیم ولیزادگان^{*}، نگار اقدسی^۱

۱. گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، واحد خوی، دانشگاه آزاد اسلامی، خوی، ایران.

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۹/۲۹ - تاریخ بازنگری: ۱۴۰۰/۱/۲۷ - تاریخ تصویب: ۱۴۰۰/۲/۴)

چکیده

بدلیل هزینه‌بر بودن و احتیاج به نیروی متخصص جهت بهره‌برداری از تجهیزات پیشرفته اندازه‌گیری جریان در کانال‌ها، استفاده از روش‌های ساده، ارزان و کم‌هزینه همواره مورد توجه محققین و شرکت‌های بهره‌برداری از شبکه‌های آبیاری و زهکشی بوده است. در این پژوهش اندازه‌گیری جریان در کانال‌ها با استفاده از فلوم‌های دوزنقه‌ای با پایه‌های استوانه‌ای، به صورت آزمایشگاهی در چهار شیب جانبی بررسی شده است. با اندازه‌گیری عمق جریان در بالادست و پایین دست گلوگاه فلوم و بر اساس روابط تابعی، یک رابطه و نمودار جداگانه برای محاسبه دبی جریان در هر شیب‌های جانبی بررسی شده بدست آمد (هم در شرایط جریان آزاد و هم در شرایط جریان مستغرق). همچنین برای تمام شیب‌های جانبی بررسی شده یک رابطه برای شرایط جریان آزاد و دو رابطه برای شرایط جریان مستغرق بدست آمد. میانگین قدرمطلق خطای نسبی (MARE) برای محاسبه دبی بی‌بعد در شرایط جریان آزاد در شیب‌های جانبی (z) ۱، ۰/۷، ۰/۴۶۶۳ و ۰/۲۶۸ به ترتیب ۶/۲، ۴/۶، ۸/۱ و ۹/۴ و در شرایط جریان مستغرق در شیب‌های جانبی مذکور به ترتیب ۲۵/۱۷، ۲۲/۹، ۱۹ و ۱۴/۹ درصد برآورد شده است. مقدار این پارامتر آماری برای محاسبه دبی بی‌بعد بر اساس رابطه بدست آمده در شرایط جریان آزاد (یک رابطه برای تمام شیب‌های جانبی بررسی شده) برابر با ۸/۲ درصد و در شرایط جریان مستغرق (با استفاده از دو رابطه در نظر گرفته شده)، ۳۵/۹ و ۳۴/۳ درصد محاسبه شدند. در بین شیب‌های جانبی بررسی شده حداکثر مقدار خطای جذر میانگین مربعات (RMSE) برای محاسبه دبی بی‌بعد در شرایط جریان آزاد ۰/۰۷۸ و در شرایط جریان مستغرق (با استفاده از دو رابطه در نظر گرفته شده)، ۰/۳۴ و ۰/۳۸ است. بنابراین استفاده از رابطه مربوط به هر شیب جانبی (رابطه‌ای که بطور جداگانه برای هر شیب جانبی بدست آمده است) دارای خطای کمتری نسبت به استفاده از یک رابطه برای تمام شیب‌های جانبی بررسی شده است.

واژه‌های کلیدی: جریان آزاد، جریان مستغرق، کانال‌های دوزنقه‌ای، پایه‌های استوانه‌ای، آنالیز ابعادی.

مقدمه

اندازه‌گیری جریان در کانال‌ها، به عنوان بخشی از برنامه‌های مدیریت منابع آب، همواره از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. در شبکه‌های آبیاری، زمانی که میزان آب در دسترس برای کشاورزی محدود باشد و کشاورزان هزینه آب مصرفی را پرداخت کنند و همچنین برای جلوگیری از بروز هرگونه اختلاف بین کشاورزان، مجریان و مدیران شبکه ملزم به نصب و راه‌اندازی سازه‌های اندازه‌گیری جریان می‌شوند. عمدتاً در شبکه‌های آبیاری بسته به دقت مورد نیاز، امکانات موجود، هزینه‌ها و ... رقوم آب و دبی عبوری با استفاده از روش‌های مختلف اندازه‌گیری می‌شود. تاکنون روش‌ها و تجهیزات مختلفی برای محاسبه و اندازه‌گیری جریان در کانال‌ها ابداع شده‌اند. بطور کلی بر اساس طبقه‌بندی ذکر شده در تحقیقات مختلف، روش‌های اندازه‌گیری دبی جریان عبارتند از روش سرعت-سطح مقطع جریان (جسم شناور،

مولینه، تجهیزات الکترومغناطیس و اولتراسونیک‌ها) و روش دبی-اشل (سرریزها، فلوم‌ها، دریچه‌ها و روزه‌ها). روش‌های مبتنی بر سرعت-سطح مقطع جریان دارای دقتی مناسب می‌باشند و علاوه بر اینکه استفاده از این روش‌ها نیاز به تخصص بالا دارد، به مرور زمان از دقت تجهیزات مربوطه کاسته می‌شود ولی با صحت سنجی‌ها و سنجش مرتب می‌توان از کاهش دقت اندازه‌گیری آن‌ها جلوگیری کرد. در روش دبی-عمق جریان با اندازه‌گیری عمق جریان در یک یا دو مقطع مشخص می‌توان با استفاده از نمودارها و روابط مربوطه دبی جریان را بدست آورد. یکی از روش‌های مبتنی بر رابطه دبی-اشل استفاده از فلوم‌ها می‌باشد. اساس اندازه‌گیری جریان در فلوم‌ها ایجاد شرایطی در جریان می‌باشد که بتوان با اندازه‌گیری عمق جریان در نقاط مشخص، دبی جریان را با استفاده از رابطه و یا نمودار مربوطه بدست آورد. این شرایط با استفاده از تنگ کردن مقطع جریان، برآمدگی و یا

پایه‌ای استوانه‌ای شکل در محور مرکزی کف کانال دوزنقه‌ای، مقطع تنگ شده (گلوگاه) ایجاد می‌شود. این محققین پس از انجام آزمایش‌های متعدد، رابطه‌ای برای محاسبه جریان بدست آوردند و اعلام نمودند که این رابطه را تا درجه استغراق ۸۰ درصد می‌توان بکار برد رابطه مذکور ارتباط بین عمق جریان بی‌بعد و دبی جریان بی‌بعد می‌باشد. در رابطه ارائه شده توسط این محققین تاثیر درجه استغراق در نظر گرفته نشده است.

Peruginelli and Bonacci (1997) با ایجاد یک مقطع کنترل با نصب کردن پایه منشوری در محور مرکزی کف کانال مستطیلی رابطه‌ای بین دبی و عمق جریان را با استفاده از رابطه عدد فرود در شرایط جریان آزاد و مستغرق بدست آوردند. آن‌ها خطای محاسبه دبی جریان را با استفاده از رابطه بدست آمده سه درصد اعلام کردند.

Samani and Magallanez (2000) فلوم موسوم به فلوم S- M را برای اندازه‌گیری جریان در کانال‌ها معرفی نمودند. در این فلوم‌ها با نصب دو نیم استوانه روبروی هم در دو طرف مقطع مستطیلی، مقطع کنترل جریان ایجاد شده است. آن‌ها معادله محاسبه دبی جریان را بر اساس آنالیز ابعادی بدست آوردند. Baiamonte and Ferro (2007) نیز با انجام آزمایش‌های متعدد روی این فلوم توانستند معادله محاسبه دبی جریان را با استفاده از آنالیز ابعادی و نظریه خود تشابه ناقص^۱ بدست آورند. به همین دلیل این فلوم به فلوم SMBF^۲ معروف شد.

در تحقیقات Matter et al. (2017) فلوم قابل حمل نیم دایره‌ای^۳ معرفی شد. در این فلوم مقطع کنترل جریان (گلوگاه) با نصب پایه استوانه‌ای شکل در محور مرکزی کف کانال نیم دایره‌ای ایجاد شده و عمق بحرانی در این مقطع تشکیل می‌گردد. این محققین با استفاده از معادلات انرژی مخصوص و عدد فرود، بر اساس نتایج آزمایش‌ها رابطه محاسبه دبی جریان و رابطه محاسبه ضریب دبی جریان را بدست آورده و مقدار خطا در محاسبه دبی جریان را حداکثر ۸/۷ درصد گزارش نمودند (شکل ۱ الف).

تنگ‌شدگی مقطع جریان با نصب دو نیم پایه منشوری به صورت روبرو در دو طرف کانال مستطیلی توسط Goel (2006) مورد آزمایش قرارگرفت (شکل ۱ ب). عرض مقطع تنگ شده نصف عرض کف کانال در نظر گرفته شده است. تحقیقات ایشان منجر به ارائه رابطه‌ای شد که برای محاسبه دبی جریان هم برای شرایط جریان آزاد و هم برای شرایط جریان مستغرق بکار می‌رود. وی در جریان مستغرق منحنی تغییرات ضریب دبی جریان در

پایین افتادگی کف مجرای جریان و یا ترکیبی از آن‌ها بوجود می‌آید. تحقیقات وسیعی در رابطه با چگونگی ایجاد تنگ‌شدگی مقطع جریان، برآمدگی و پایین افتادگی کف مجرا و ترکیبی از آن‌ها توسط محققین انجام گرفته که منجر به ارائه انواع فلوم‌ها و روابط و نمودارهای مربوطه شده است. از اولین تحقیقات انجام گرفته در رابطه با فلوم‌ها می‌توان به تحقیقات بلانگر (Belanger, 1849)، بازین (Bazin, 1896)، پارشال (Parshal 1900) و بالوفت (Balloffet 1951) اشاره نمود (Boss 1985). در سال‌های اخیر مطالعات متعددی درباره ایجاد مقطع کنترل جریان صرفاً با تنگ کردن مقطع جریان و در نتیجه ایجاد گلوگاه صورت گرفته است. Hager (1985) برای ایجاد تنگ‌شدگی (گلوگاه) در کانال‌های مستطیلی، پایه‌های استوانه‌ای را در محور مرکزی کف این کانال‌ها نصب و پس از انجام آزمایش‌هایی رابطه محاسبه دبی جریان را بدست آورد و خطای محاسبه دبی جریان با استفاده از رابطه ارائه شده را ۵ درصد اعلام نمود. همچنین وی از این روش برای ایجاد گلوگاه در کانال‌های دوزنقه‌ای استفاده نمود و منحنی تعیین دبی جریان را ارائه کرد. این منحنی رابطه بین عمق جریان بی‌بعد $(zy/(B-d))$ و دبی جریان بدون بعد $(Qz^{1.5}/(g^{0.5}(B-d)^{2.5}))$ می‌باشد که z شیب وجه جانبی کانال، y عمق جریان بالادست گلوگاه، B عرض کف کانال، d قطر پایه استوانه‌ای، g شتاب ثقل زمین و Q دبی جریان است.

برای ایجاد گلوگاه، Hager (1986) پایه‌های مخروطی را در محور مرکزی کف کانال‌های مستطیلی نصب و آزمایش‌هایی را انجام داد. وی بسته به اینکه مقدار انرژی مخصوص بی‌بعد $(E^*=zE/(B-d))$ بزرگتر مساوی یک و مابین صفر و یک باشد دو رابطه برای محاسبه دبی بدست آورد.

Hager (1988) در کانال‌های دایره‌ای نیز برای ایجاد گلوگاه، از پایه‌های استوانه‌ای استفاده نمود و با استفاده از مفهوم انرژی مخصوص و رابطه عدد فرود، رابطه محاسبه دبی جریان را ارائه کرد.

فلوم قابل حمل دایره‌ای که در آن برای ایجاد تنگ‌شدگی از نصب پایه‌ای استوانه‌ای در وسط مقطع دایره‌ای استفاده شده، توسط Samani and Magallanez (1992) برای اندازه‌گیری دبی جریان در کانال‌ها استفاده شد. معادله بدست آمده در تحقیق این محققین با استفاده از مفهوم اصل انرژی و آنالیز ابعادی بدست آمده است.

Samani and Magallanez (1993) فلوم‌های دوزنقه‌ای با پایه‌های استوانه‌ای را معرفی نمودند. در این فلوم‌ها با قرار دادن

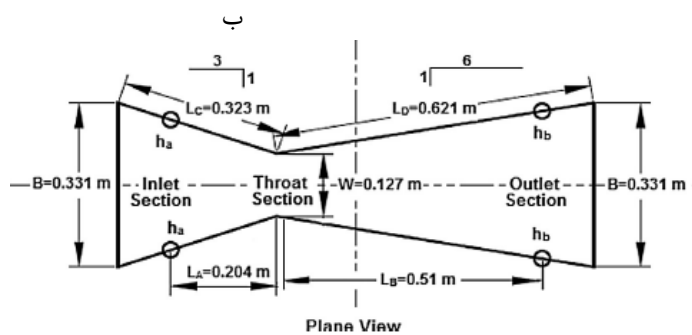
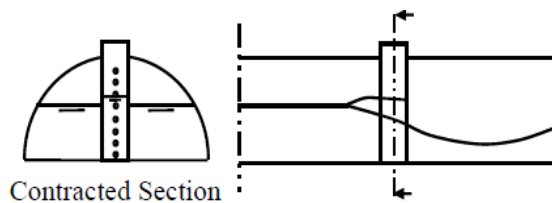
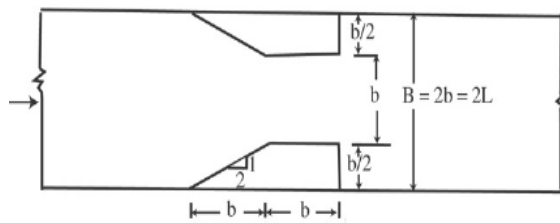
^۱ Semicircular Mobile Flume^۲ Incomplete Self-Similarity^۳ Samani, Magallanez, Baiamonte, Ferro

برابر درجه استغراق و در جریان آزاد تغییرات ضریب دبی جریان در برابر نسبت عمق جریان در بالادست گلوگاه به طول گلوگاه را ارائه نمود.

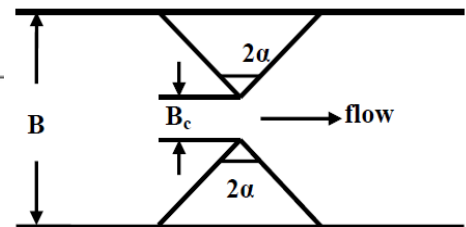
Das et al. (2017) با انجام آزمایش‌هایی روی فلوم گلوکوتاه (گلو بریده^۱) با عرض ۰/۱۲۷ متر (۵ اینچ) که طبق اظهارات آن ها فلوم گلو کوتاه با این عرض کمتر مورد توجه قرار گرفته، معادلات جدیدی را برای محاسبه دبی جریان در شرایط جریان آزاد و مستغرق بدست آوردند. خطای محاسبه دبی با استفاده از معادله مربوطه حداکثر ۵ درصد گزارش شده است (شکل ۱ ج). معادله محاسبه دبی جریان در شرایط جریان آزاد $Q=0.344h^{1.695}$ است که h عمق جریان در بالادست گلوگاه است که توسط چاهکی که در فاصله‌ای مشخص از گلوگاه قرار دارد اندازه‌گیری

می‌شود.

Hayawi et al. (2013) با نصب دو مثلث با زاویه راس 2α به صورت روبرو در طرفین یک مجرای مستطیلی و در نتیجه ایجاد تنگ‌شدگی، مقطع کنترل جهت اندازه‌گیری دبی جریان را ایجاد و رابطه محاسبه دبی جریان را بدست آورد (شکل ۱ د). در تحقیقات آنها پارامترهای زاویه راس مثلث‌ها (α)، نسبت تنگ‌شدگی (B/B_c) و شیب کف به عنوان متغیر در نظر گرفته شدند. نتایج تحقیقاتشان نشان داد که ضریب دبی جریان با شیب طولی کانال و نسبت تنگ‌شدگی رابطه مستقیم دارد. همچنین در یک نسبت تنگ‌شدگی ثابت، ضریب دبی جریان با زاویه α نیز متناسب است.



الف



د

ج

شکل ۱- تنگ‌شدگی مقطع جریان، الف. Mattar et al (2017) ب. Goel (2006) ج. Das et al. (2017) د. Hayawi et al. (2013)

رابطه‌ای برای محاسبه دبی جریان در کانال‌های دوزنقه‌ای با شیب جانبی ۱:۱ (بجز رابطه ارائه شده توسط محقق مربوطه) را بدست آوردند. این محققین متوسط خطا و خطای استاندارد محاسبه دبی جریان با استفاده از رابطه بدست آمده را به ترتیب ۴/۷ و ۵/۳۴ درصد و با استفاده از رابطه بدست آمده توسط Samani and Magallanez (1993) را ۵/۱ و ۱۴/۶۸ درصد اعلام نمودند.

Ghare and Badar (2014) با نصب پایه‌های استوانه‌ای در محور مرکزی کف کانال‌های مستطیلی، با ایجاد مقطع تنگ شده، آزمایش‌هایی را در شرایط جریان آزاد جهت بدست آوردن رابطه

Rashwan and Idress (2013) اندازه‌گیری جریان در کانال‌های دایره‌ای نیمه‌پر (partially filled) با استفاده از فلوم‌های دایره‌ای قابل حمل را بررسی نموده و رابطه محاسبه ضریب دبی جریان را که به نسبت تنگ‌شدگی و انرژی مخصوص بی‌بعد وابسته است، بدست آوردند.

Badar and Ghare (2012) با استفاده از داده‌های آزمایشگاهی بدست آمده از تحقیقات Samani and Magallanez (1993) (که فلوم‌های دوزنقه‌ای با پایه‌های استوانه‌ای را بررسی کرده‌اند)، گروه‌های مختلف بدون بعد دبی و اشل را بررسی و

^۱ Cutthroat flume

شیب وجه جانبی ۱:۱ هم برای شرایط جریان آزاد و هم برای شرایط جریان مستغرق ارائه شده بدون اینکه تاثیر درجه استغراق در رابطه مذکور در نظر گرفته شود. همچنین در رابطه ارائه شده توسط Ghare and Badar (2012) که بر اساس داده‌های آزمایشگاهی محققین دیگر از جمله Samani and Magallanez (1993) استخراج شده نیز اثر درجه استغراق دیده نمی‌شود و این رابطه صرفاً برای شیب جانبی ۴۵ درجه بدست آمده است. در این تحقیق سعی شده با نصب پایه‌های استوانه‌ای در محور مرکزی کف کانال‌های دوزنقه‌ای و در نتیجه ایجاد مقطع تنگ شده (گلوگاه)، روابط محاسبه دبی جریان هم در شرایط جریان آزاد و هم در شرایط جریان مستغرق با در نظر گرفتن تاثیر درجه استغراق پس از انجام آزمایش‌های متعدد به صورت جداگانه بدست آیند.

مواد و روش‌ها

آنالیز ابعادی

در صورتی که متغیرهای مؤثر در یک پدیده فیزیکی شناخته شده باشند اما ارتباط بین آن‌ها معلوم نباشد، با استفاده از آنالیز ابعادی می‌توان پدیده را به صورت رابطه‌ای بین چند گروه بی‌بعد که تعدادشان کمتر از تعداد متغیرها است فرموله کرد. به این ترتیب تعداد آزمایش‌های لازم برای تعیین رابطه بین متغیرها کمتر شده و غالباً نوع آزمایش‌ها نیز ساده‌تر می‌شود. پارامترهای مؤثر در اندازه‌گیری دبی جریان در این پژوهش به صورت روابط تابعی زیر می‌باشند.

الف: جریان آزاد

در این شرایط عوامل مؤثر در جریان در رابطه تابعی (۱) ارائه شده‌اند.

(رابطه ۱)

$$f(Q, y_1, g, B, d, z, \rho, \mu, \sigma) = 0$$

که در آن Q دبی جریان، y_1 عمق جریان در بالادست پایه، g شتاب ثقل زمین، B عرض کف کانال، d قطر پایه استوانه‌ای، z شیب وجه جانبی کانال، ρ جرم حجمی آب، μ ویسکوزیته دینامیک آب و σ ضریب نیروی کشش سطحی است.

با در نظر گرفتن $B_c = B - d + 2zy_1$ رابطه تابعی (۱) را به صورت رابطه تابعی (۲) نیز می‌توان نوشت.

$$f(Q, y_1, g, B_c, \rho, \mu, \sigma) = 0 \quad (\text{رابطه ۲})$$

بر اساس تئوری باکینگهام، با در نظر گرفتن متغیرهای B_c ، g و ρ به عنوان متغیرهای تکرار شونده، پارامترهای بی‌بعد زیر بدست می‌آیند.

اندازه‌گیری دبی جریان انجام و دو رابطه برای محاسبه دبی جریان را بدست آوردند. رابطه اول نسبت دبی تئوریک به دبی واقعی (همان ضریب دبی جریان) است و رابطه دوم با استفاده از آنالیز رگرسیونی بین دو پارامتر بدون بعد دبی بی‌بعد و عمق جریان بی‌بعد بدست آمده است. این محققین حداکثر خطای محاسبه دبی با استفاده از این دو رابطه را به ترتیب ۵ و ۲۰ درصد اعلام نمودند.

قابلیت فلوم‌های گلوکوتاه در بدست آوردن دبی جریان فوق بحرانی توسط Tekade et al. (2016) بررسی شد. آن‌ها با توجه به وجود همبستگی بالا بین دبی جریان و عمق جریان در بالادست گلوگاه فلوم، رابطه بدست آمده برای محاسبه دبی جریان را مناسب دانستند. Kapoor et al. (2019) بر اساس مفهوم انرژی، جریان اطراف پایه‌های مخروطی نصب شده در محور مرکزی کف کانال مستطیلی را بررسی نموده و رابطه ارائه شده برای محاسبه دبی جریان را در چندین فلوم آزمایشگاهی مورد ارزیابی قرار دادند. حداکثر خطا در محاسبه دبی جریان را ۹ درصد گزارش نمودند.

Mohammadi and Vatankhah (2020) شکل جدیدی از فلوم‌های اندازه‌گیری جریان را که دارای دیواره‌های مخروطی و استوانه‌ای هستند و تاج آن‌ها منطبق بر کف کانال مستطیلی است معرفی نمودند. این محققین ضمن اعلام اینکه که در این سازه میزان افت انرژی و پس‌زدگی جریان ناچیز است، معادلاتی را برای تخمین دبی در شرایط جریان آزاد با استفاده از آنالیز ابعادی بدست آوردند. خطای محاسبه دبی جریان با استفاده از رابطه مربوط به فلوم با دیواره‌های استوانه‌ای $2/72$ و برای فلوم با دیواره‌های مخروطی $1/85$ درصد گزارش شده است. آن‌ها همچنین یک رابطه کلی که هم برای فلوم با دیواره‌های مخروطی و هم برای فلوم با دیواره‌های استوانه‌ای استفاده می‌شود بدست آوردند. مقدار خطای این رابطه در برآورد دبی جریان $3/09$ درصد اعلام شده است.

با توجه به بررسی‌های صورت گرفته در رابطه با تحقیقات محققین مختلف، مشخص می‌شود که اکثر محققین سعی در بدست آوردن رابطه محاسبه دبی جریان با استفاده از ایجاد تنگ‌شدگی عرضی در کانال‌هایی با مقاطع عرضی مختلف نموده‌اند. اما با توجه به اینکه مقطع اکثر کانال‌های آبیاری و آبرسانی به شکل دوزنقه‌ای طراحی و ساخته می‌شوند لذا اندازه‌گیری جریان در این کانال‌ها با استفاده از روش‌های ساده و ارزان قیمت از اهمیت بالایی برخوردار است. رابطه ارائه شده توسط Samani and Magallanez (1993) همانطوریکه پیشتر بیان گردید برای محاسبه دبی جریان در فلوم‌های دوزنقه‌ای با

کف قابل تنظیم) به عرض کف ۴۶ سانتیمتر و طول ۶ متر و ارتفاع ۷۰ سانتیمتر طراحی و ساخته شد و آزمایش‌ها در این کانال آزمایشگاهی انجام گردید. کف کانال از جنس ورق آهن گالوانیزه و دیواره‌های آن از شیشه با چارچوب آهنی ساخته شده است. کنترل سطح آب در کانال توسط یک دریچه که در انتهای کانال نصب شده صورت می‌گرفت. برای اندازه‌گیری عمق جریان از عمق سنجی با دقت ± 0.1 میلی‌متر استفاده شد. شیب کف فلوم توسط یک جک مکانیکی که در زیر آن قرار دارد قابل تنظیم بوده و دبی جریان به روش حجمی توسط مخزنی که در انتهای فلوم قرار داده شده قابل اندازه‌گیری است. شکل (۲) این فلوم را حین انجام آزمایش نشان می‌دهد. در این تحقیق از چهار پایه استوانه‌ای با قطرهای ۴۲، ۴۰، ۳۸ و ۳۶ سانتیمتر از جنس ورق آهن گالوانیزه، استفاده شده است.

نحوه انجام آزمایش‌ها

آزمایش‌ها در چهار شیب جانبی صورت گرفتند ($z=0.268$ زاویه α که $(\alpha=75^\circ)$, 0.466 ($\alpha=65^\circ$), 0.7 ($\alpha=55^\circ$), 1 ($\alpha=45^\circ$)) وجه جانبی کانال با افق می‌باشد. پس از تنظیم کانال در شیب جانبی مورد نظر و نصب یکی از پایه‌های استوانه‌ای در محور مرکزی کف کانال و برقراری جریان در کانال، پارامترهای مهم و مورد نیاز یعنی عمق جریان در بالادست و پایین دست پایه (y_1 و y_t) و دبی جریان (Q) در شرایطی که دریچه کنترل سطح آب کاملاً باز است اندازه‌گیری شدند. سپس بدون تغییر دبی جریان حداقل دو و حداکثر سه درجه استغراق (y_t/y_1) (بسته به دبی جریان) با تنظیم دریچه انتهایی ایجاد و پارامترهای مورد نیاز در هر درجه استغراق اندازه‌گیری شدند. آزمایش‌های فوق برای شش دبی جریان انجام شدند. پس در یک شیب جانبی معین ۲۴ آزمایش در شرایط جریان آزاد (۶ آزمایش برای یک پایه استوانه‌ای) و ۴۸ آزمایش (حداقل) در شرایط جریان مستغرق انجام شد. پس از اتمام آزمایش‌های فوق، شیب جانبی کانال روی مقدار مورد نظر بعدی تنظیم و تمامی آزمایش‌های مذکور، در شیب جانبی جدید تکرار شدند.

برای بررسی دقت نمودارها و روابط بدست آمده، از پارامترهای آماری میانگین قدرمطلق خطای نسبی (MARE) و خطای جذر میانگین مربعات (RMSE) استفاده شده است. پارامتر مذکور در روابط (۱۲) و (۱۳) نشان داده شده‌اند.

$$MARE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{x_i - y_i}{x_i} \right| \quad (\text{رابطه } 12)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - y_i)^2}{n}} \quad (\text{رابطه } 13)$$

$$\pi_1 = \frac{Q}{\sqrt{gB_c^5}}, \quad \pi_2 = \frac{y_1}{B_c}, \quad \pi_3 = R_e, \quad \pi_4 = W_e \quad (3)$$

پس از حذف پارامترهای بی‌بعد بدون تاثیر عدد رینولدز (R_e) و عدد وبر (W_e)، رابطه تابعی بدون بعد (۴) بدست می‌آید.

$$\frac{Q}{\sqrt{gB_c^5}} = f\left(\frac{y_1}{B_c}\right) \quad (\text{رابطه } 4)$$

رابطه (۵) مبنای محاسبات در شرایط جریان آزاد در نظر گرفته شد.

$$\frac{Q}{\sqrt{gB_c^5}} = a\left(\frac{y_1}{B_c}\right)^b \quad (\text{رابطه } 5)$$

ب: جریان مستغرق

عوامل موثر در شرایط جریان مستغرق به صورت رابطه (۶) می‌باشند.

$$f(Q, y_1, y_t, g, B, d, z, \rho, \mu, \sigma) = 0 \quad (\text{رابطه } 6)$$

و یا

$$f(Q, y_1, y_t, g, B_c, \rho, \mu, \sigma) = 0 \quad (\text{رابطه } 7)$$

که y_t عمق پایاب است.

طبق تئوری باکینگهام پارامترهای بی‌بعد زیر بدست می‌آیند.

(رابطه ۸)

$$\pi_1 = \frac{Q}{\sqrt{gB_c^5}}, \quad \pi_2 = \frac{y_1}{B_c}, \quad \pi_3 = \frac{y_t}{B_c}, \quad \pi_4 = R_e, \quad \pi_5 = W_e$$

پس از حذف پارامترهای بی‌بعد بدون تاثیر (R_e , W_e) و پس از تقسیم y_1/B_c به y_t/B_c رابطه تابعی (۹) برای این شرایط در نظر گرفته شد.

$$\frac{Q}{\sqrt{gy_t^5}} = f\left(\frac{B_c}{y_t}, \frac{y_1}{y_t}\right) \quad (\text{رابطه } 9)$$

پس از بررسی‌های متعدد روی روابط غیر خطی و گروه‌های بدون بعد مختلف، رابطه (۱۰) بر اساس رابطه (۹)، به عنوان مبنای انجام محاسبات در شرایط جریان مستغرق مد نظر قرار گرفت.

$$\frac{Q}{\sqrt{gy_t^5}} = a\left(\frac{B_c}{y_t} \frac{y_1}{y_t}\right)^2 + b\left(\frac{B_c}{y_t} \frac{y_1}{y_t}\right) + c \quad (\text{رابطه } 10)$$

همچنین در این شرایط علاوه بر رابطه (۱۰)، تغییرات بین دو پارامتر بی‌بعد نسبت استغراق (y_t/y_1) در برابر دبی بی‌بعد در هر شیب جانبی طبق رابطه (۱۱) نیز بررسی شد.

$$\frac{Q}{\sqrt{gy_t^5}} = a\left(\frac{y_t}{y_1}\right)^b \quad (\text{رابطه } 11)$$

تجهیزات آزمایشگاهی

برای انجام این تحقیق، کانال آزمایشگاهی (با شیب جانبی و شیب

که در آن x_i و y_i به ترتیب مقادیر آزمایشگاهی و محاسباتی آزمایش‌ها در جدول (۱) و داده‌های آزمایشگاهی در جدول‌های متغیر مورد نظر است. (۲) و (۳) ارائه شده است. در این جدول اندیس‌های ۱ و ۲ بر اساس داده‌های اندازه‌گیری شده، محدوده متغیرهای موثر در ترتیب مربوط به مقاطع بالادست و پایین‌دست گلوگاه است.

جدول ۱- محدوده متغیرهای موثر در آزمایش‌ها

B_c/y_1	B_c/y_t	z	d/B	Fr_1	Fr_2	$V_1(m/s)$	$V_2(m/s)$	محدوده	شرایط جریان
۴/۰۵	۸/۵	۱	۰/۹۱	۰/۱۷	۰/۷۵	۰/۱۳	۰/۴	حداکثر	مستغرق
۰/۸۷	۰/۹۴	۰/۲۶۸	۰/۷۸	۰/۰۳۵	۰/۰۴۲	۰/۰۲	۰/۰۲	حداقل	
۴/۸	۱۸/۱	۱	۰/۹۱	۰/۱۷۲	۱/۱	۰/۱۲۳	۰/۴۸	حداکثر	آزاد
۰/۹۱	۳/۱	۰/۲۶۸	۰/۷۸	۰/۰۳۳	۰/۱۲	۰/۰۲۴	۰/۰۴۹	حداقل	

جدول ۲- داده‌های آزمایشگاهی در شرایط جریان آزاد در شیب‌های جانبی مختلف

$z=1$				$z=0.7$			
B(m)	d(m)	$y_1(m)$	Q (m ³ /s)	B(m)	d(m)	$y_1(m)$	Q (m ³ /s)
0.46	0.36	0.045	0.0016777	0.46	0.42	0.037	0.00084516
0.46	0.36	0.05	0.00232518	0.46	0.42	0.052	0.001737
0.46	0.36	0.055	0.0025945	0.46	0.42	0.06	0.002359
0.46	0.36	0.06	0.002953	0.46	0.42	0.07	0.003265
0.46	0.36	0.065	0.003747	0.46	0.42	0.078	0.00397
0.46	0.36	0.07	0.0048425	0.46	0.42	0.085	0.00479556
0.46	0.38	0.045	0.0015496	0.46	0.4	0.044	0.001428296
0.46	0.38	0.05	0.002000464	0.46	0.4	0.053	0.002250489
0.46	0.38	0.055	0.002505861	0.46	0.4	0.059	0.0026308
0.46	0.38	0.06	0.0031779	0.46	0.4	0.068	0.003622642
0.46	0.38	0.065	0.00363598	0.46	0.4	0.077	0.004682927
0.46	0.38	0.075	0.00516463	0.46	0.38	0.039	0.001259322
0.46	0.4	0.05	0.002260794	0.46	0.38	0.05	0.002142591
0.46	0.4	0.056	0.002791224	0.46	0.38	0.055	0.0024148
0.46	0.4	0.061	0.00349738	0.46	0.38	0.062	0.00322388
0.46	0.4	0.066	0.0044317	0.46	0.38	0.069	0.00387588
0.46	0.4	0.07	0.0043654	0.46	0.38	0.074	0.00451666
0.46	0.4	0.075	0.0050848	0.46	0.36	0.045	0.00161659
0.46	0.42	0.05	0.0017249	0.46	0.36	0.054	0.002192198
0.46	0.42	0.057	0.00221184	0.46	0.36	0.061	0.00318777
0.46	0.42	0.064	0.0030462	0.46	0.36	0.068	0.0041882
0.46	0.42	0.07	0.003724	0.46	0.36	0.074	0.005104874
0.46	0.42	0.074	0.00439974				
0.46	0.42	0.08	0.00495839				

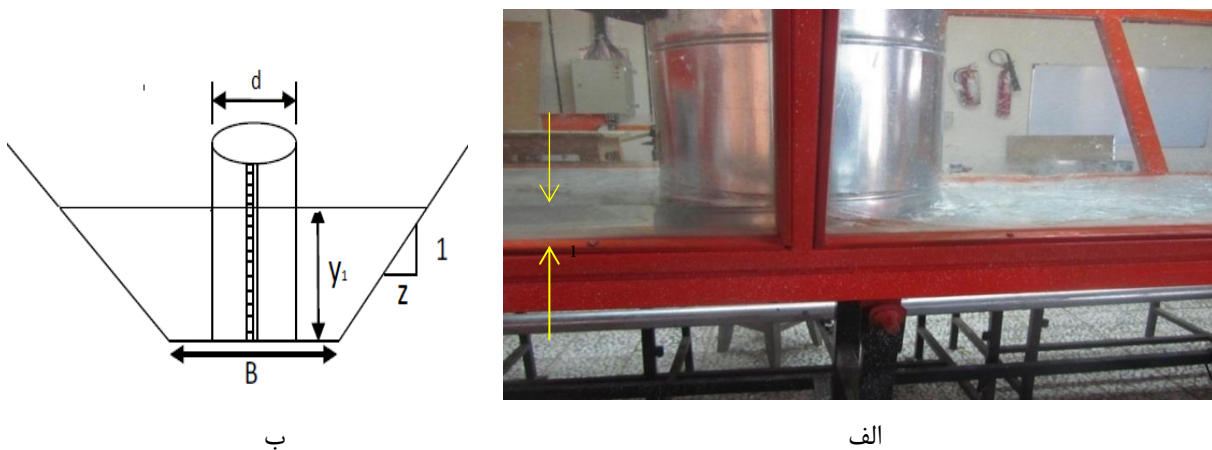
$z=0.4663$				$z=0.268$			
B(m)	d(m)	$y_1(m)$	Q	B(m)	d(m)	$y_1(m)$	Q
0.46	0.42	0.03	0.00042759	0.46	0.36	0.04	0.000498464
0.46	0.42	0.046	0.00106798	0.46	0.36	0.058	0.00247092
0.46	0.42	0.061	0.0017629	0.46	0.36	0.068	0.003392
0.46	0.42	0.075	0.0030183	0.46	0.36	0.073	0.003878063
0.46	0.42	0.085	0.003345	0.46	0.36	0.08	0.00473749
0.46	0.42	0.092	0.00432	0.46	0.36	0.087	0.00505386
0.46	0.4	0.047	0.001255282	0.46	0.38	0.05	0.00173291
0.46	0.4	0.052	0.0015481	0.46	0.38	0.056	0.00198887
0.46	0.4	0.056	0.0018868	0.46	0.38	0.07	0.00313727
0.46	0.4	0.065	0.0024609	0.46	0.38	0.075	0.003435815
0.46	0.4	0.085	0.00394295	0.46	0.38	0.085	0.0044883
0.46	0.4	0.09	0.005225805	0.46	0.4	0.033	0.000582832
0.46	0.38	0.044	0.001580006	0.46	0.4	0.058	0.0016578
0.46	0.38	0.054	0.002379346	0.46	0.4	0.065	0.0020238
0.46	0.38	0.06	0.00303113	0.46	0.4	0.08	0.00298059
0.46	0.38	0.066	0.0034263	0.46	0.4	0.095	0.0045324
0.46	0.38	0.072	0.004304753	0.46	0.4	0.1	0.0050086
0.46	0.38	0.08	0.005136486	0.46	0.42	0.032	0.000369132
0.46	0.36	0.026	0.000557269	0.46	0.42	0.063	0.001393155
0.46	0.36	0.045	0.0016786	0.46	0.42	0.079	0.002285261
0.46	0.36	0.054	0.00265539	0.46	0.42	0.091	0.003256281
0.46	0.36	0.061	0.0032598	0.46	0.42	0.1	0.004020164
0.46	0.36	0.066	0.004080283	0.46	0.42	0.105	0.0042346
0.46	0.36	0.075	0.00480445				

جدول ۳- داده‌های آزمایشگاهی در شرایط جریان مستغرق در شیب‌های جانبی $z=0.7$ و $z=1$

$z=1$					$z=0.7$				
B(m)	d(m)	y_1 (m)	y_0 (m)	Q(m ³ /s)	B(m)	d(m)	y_1 (m)	y_0 (m)	Q(m ³ /s)
0.46	0.42	0.05	0.022	0.0017249	0.46	0.42	0.037	0.02	0.000845
0.46	0.42	0.052	0.035	0.0017249	0.46	0.42	0.041	0.034	0.000845
0.46	0.42	0.058	0.045	0.0017249	0.46	0.42	0.052	0.038	0.001737
0.46	0.42	0.057	0.03	0.0022118	0.46	0.42	0.053	0.039	0.001737
0.46	0.42	0.06	0.045	0.0022118	0.46	0.42	0.056	0.048	0.001737
0.46	0.42	0.07	0.058	0.0022118	0.46	0.42	0.06	0.045	0.002359
0.46	0.42	0.069	0.045	0.0030462	0.46	0.42	0.062	0.047	0.002359
0.46	0.42	0.072	0.06	0.0030462	0.46	0.42	0.065	0.059	0.002359
0.46	0.42	0.08	0.069	0.0030462	0.46	0.42	0.07	0.056	0.003265
0.46	0.42	0.07	0.035	0.0037240	0.46	0.42	0.072	0.058	0.003265
0.46	0.42	0.072	0.05	0.0037240	0.46	0.42	0.075	0.07	0.003265
0.46	0.42	0.085	0.073	0.0037240	0.46	0.42	0.078	0.062	0.00397
0.46	0.42	0.075	0.035	0.0043997	0.46	0.42	0.079	0.064	0.00397
0.46	0.42	0.08	0.06	0.0043997	0.46	0.42	0.085	0.077	0.00397
0.46	0.42	0.095	0.084	0.0043997	0.46	0.42	0.085	0.07	0.004796
0.46	0.42	0.081	0.04	0.0049584	0.46	0.42	0.086	0.073	0.004796
0.46	0.42	0.089	0.055	0.0049584	0.46	0.42	0.087	0.081	0.004796
0.46	0.42	0.095	0.085	0.0049584	0.46	0.4	0.03	0.012	0.000774
0.46	0.4	0.051	0.027	0.0022610	0.46	0.4	0.033	0.016	0.000774
0.46	0.4	0.06	0.037	0.0022610	0.46	0.4	0.044	0.027	0.001428
0.46	0.4	0.069	0.053	0.0022610	0.46	0.4	0.045	0.028	0.001428
0.46	0.4	0.056	0.033	0.0024030	0.46	0.4	0.046	0.038	0.001428
0.46	0.4	0.07	0.049	0.0024030	0.46	0.4	0.053	0.037	0.00225
0.46	0.4	0.08	0.067	0.0024030	0.46	0.4	0.054	0.041	0.00225
0.46	0.4	0.068	0.043	0.0027910	0.46	0.4	0.06	0.053	0.00225
0.46	0.4	0.076	0.055	0.0027910	0.46	0.4	0.059	0.044	0.002631
0.46	0.4	0.085	0.07	0.0027910	0.46	0.4	0.060	0.046	0.002631
0.46	0.4	0.065	0.04	0.0033560	0.46	0.4	0.065	0.058	0.002631
0.46	0.4	0.07	0.05	0.0033560	0.46	0.4	0.068	0.054	0.003623
0.46	0.4	0.082	0.07	0.0033560	0.46	0.4	0.069	0.056	0.003623
0.46	0.4	0.066	0.04	0.0038760	0.46	0.4	0.08	0.075	0.003623
0.46	0.4	0.075	0.054	0.0038760	0.46	0.4	0.077	0.063	0.004683
0.46	0.4	0.087	0.076	0.0038760	0.46	0.4	0.078	0.064	0.004683
0.46	0.4	0.075	0.049	0.0044330	0.46	0.4	0.11	0.105	0.004683
0.46	0.4	0.08	0.059	0.0044330	0.46	0.38	0.039	0.019	0.001259322
0.46	0.4	0.1	0.089	0.0044330	0.46	0.38	0.04	0.025	0.001259322
0.46	0.38	0.07	0.048	0.0020046	0.46	0.38	0.045	0.035	0.001259322
0.46	0.38	0.08	0.061	0.0020046	0.46	0.38	0.05	0.025	0.002142591
0.46	0.38	0.085	0.065	0.0025059	0.46	0.38	0.051	0.03	0.002142591
0.46	0.38	0.065	0.04	0.0030382	0.46	0.38	0.052	0.04	0.002142591
0.46	0.38	0.075	0.053	0.0030382	0.46	0.38	0.055	0.025	0.0024148
0.46	0.38	0.087	0.069	0.0030382	0.46	0.38	0.056	0.03	0.0024148
0.46	0.38	0.066	0.04	0.0036360	0.46	0.38	0.057	0.04	0.0024148
0.46	0.38	0.07	0.047	0.0036360	0.46	0.38	0.062	0.03	0.00322388
0.46	0.38	0.082	0.065	0.0036360	0.46	0.38	0.063	0.04	0.00322388
0.46	0.38	0.075	0.044	0.0051646	0.46	0.38	0.075	0.065	0.00322388
0.46	0.38	0.08	0.057	0.0051646	0.46	0.38	0.069	0.035	0.00387588
0.46	0.38	0.1	0.085	0.0051646	0.46	0.38	0.07	0.04	0.00387588
0.46	0.36	0.055	0.045	0.0015982	0.46	0.38	0.071	0.055	0.00387588
0.46	0.36	0.065	0.059	0.0015982	0.46	0.38	0.075	0.05	0.00451666
0.46	0.36	0.06	0.042	0.0020335	0.46	0.38	0.078	0.06	0.00451666
0.46	0.36	0.07	0.059	0.0020335	0.46	0.38	0.08	0.07	0.00451666
0.46	0.36	0.084	0.078	0.0020335	0.46	0.36	0.038	0.018	0.0012257
0.46	0.36	0.055	0.039	0.0025080	0.46	0.36	0.04	0.028	0.0012257
0.46	0.36	0.073	0.06	0.0025080	0.46	0.36	0.044	0.035	0.0012257
0.46	0.36	0.085	0.079	0.0025080	0.46	0.36	0.058	0.035	0.0025016
0.46	0.36	0.06	0.048	0.0030848	0.46	0.36	0.067	0.052	0.0025016
0.46	0.36	0.071	0.06	0.0030848	0.46	0.36	0.073	0.067	0.0025016
0.46	0.36	0.085	0.081	0.0030848	0.46	0.36	0.061	0.038	0.0033412
0.46	0.36	0.065	0.053	0.0036417	0.46	0.36	0.088	0.08	0.0033412
0.46	0.36	0.068	0.062	0.0036417	0.46	0.36	0.069	0.04	0.004188
0.46	0.36	0.085	0.08	0.0036417	0.46	0.36	0.078	0.063	0.004188
0.46	0.36	0.072	0.062	0.0042535	0.46	0.36	0.095	0.088	0.004188
0.46	0.36	0.089	0.08	0.0042535	0.46	0.36	0.074	0.045	0.005139
0.46	0.36	0.115	0.11	0.0042535	0.46	0.36	0.079	0.066	0.005139
					0.46	0.36	0.1	0.094	0.005139

ادامه جدول ۳- داده‌های آزمایشگاهی در شرایط جریان مستغرق در شیب‌های جانبی $z=0.268$ و $z=0.4663$

$z=0.4663$					$z=0.268$				
B(m)	d(m)	y_1 (m)	y_t (m)	Q (m ³ /s)	B(m)	d(m)	y_1 (m)	y_t (m)	Q (m ³ /s)
0.46	0.42	0.039	0.03	0.000428	0.46	0.42	0.064	0.03	0.001393
0.46	0.42	0.041	0.036	0.000428	0.46	0.42	0.07	0.055	0.001393
0.46	0.42	0.05	0.035	0.001068	0.46	0.42	0.09	0.076	0.002285
0.46	0.42	0.055	0.048	0.001068	0.46	0.42	0.093	0.055	0.003256
0.46	0.42	0.06	0.055	0.001068	0.46	0.42	0.098	0.076	0.003256
0.46	0.42	0.062	0.048	0.001763	0.46	0.42	0.102	0.075	0.00402
0.46	0.42	0.07	0.063	0.001763	0.46	0.42	0.12	0.11	0.00402
0.46	0.42	0.087	0.081	0.001763	0.46	0.42	0.105	0.079	0.004235
0.46	0.42	0.078	0.066	0.003018	0.46	0.4	0.058	0.02	0.001658
0.46	0.42	0.08	0.072	0.003018	0.46	0.4	0.059	0.03	0.001658
0.46	0.42	0.085	0.08	0.003018	0.46	0.4	0.065	0.05	0.001658
0.46	0.42	0.087	0.081	0.003345	0.46	0.4	0.065	0.028	0.002024
0.46	0.42	0.09	0.085	0.003345	0.46	0.4	0.065	0.031	0.002024
0.46	0.42	0.095	0.091	0.003345	0.46	0.4	0.068	0.05	0.002024
0.46	0.42	0.092	0.082	0.00512	0.46	0.4	0.081	0.03	0.002981
0.46	0.42	0.096	0.09	0.00512	0.46	0.4	0.082	0.045	0.002981
0.46	0.42	0.097	0.092	0.00512	0.46	0.4	0.083	0.06	0.002981
0.46	0.4	0.047	0.03	0.001255	0.46	0.4	0.095	0.047	0.004532
0.46	0.4	0.05	0.04	0.001255	0.46	0.4	0.097	0.07	0.004532
0.46	0.4	0.057	0.052	0.001255	0.46	0.4	0.121	0.1	0.004532
0.46	0.4	0.052	0.035	0.001548	0.46	0.4	0.098	0.05	0.005009
0.46	0.4	0.055	0.047	0.001548	0.46	0.4	0.101	0.065	0.005009
0.46	0.4	0.065	0.06	0.001548	0.46	0.4	0.11	0.095	0.005009
0.46	0.4	0.061	0.045	0.001887	0.46	0.38	0.05	0.02	0.001733
0.46	0.4	0.065	0.057	0.001887	0.46	0.38	0.056	0.032	0.001989
0.46	0.4	0.075	0.07	0.001887	0.46	0.38	0.076	0.075	0.001989
0.46	0.4	0.069	0.055	0.002461	0.46	0.38	0.072	0.05	0.003137
0.46	0.4	0.072	0.062	0.002461	0.46	0.38	0.088	0.084	0.003137
0.46	0.4	0.091	0.083	0.002461	0.46	0.38	0.075	0.04	0.003436
0.46	0.4	0.085	0.07	0.003943	0.46	0.38	0.09	0.087	0.003436
0.46	0.4	0.087	0.079	0.003943	0.46	0.38	0.087	0.075	0.004488
0.46	0.4	0.105	0.098	0.003943	0.46	0.38	0.1	0.098	0.004488
0.46	0.4	0.09	0.078	0.005226	0.46	0.38	0.14	0.136	0.004488
0.46	0.4	0.091	0.081	0.005226	0.46	0.36	0.085	0.075	0.00247
0.46	0.4	0.108	0.1	0.005226	0.46	0.36	0.095	0.083	0.0039
0.46	0.38	0.044	0.016	0.00158	0.46	0.36	0.075	0.04	0.003878
0.46	0.38	0.044	0.018	0.00158	0.46	0.36	0.081	0.05	0.004737
0.46	0.38	0.045	0.025	0.00158	0.46	0.36	0.088	0.067	0.004737
0.46	0.38	0.054	0.022	0.002379	0.46	0.36	0.12	0.095	0.004737
0.46	0.38	0.055	0.03	0.002379	0.46	0.36	0.1	0.09	0.005053
0.46	0.38	0.056	0.045	0.002379					
0.46	0.38	0.06	0.03	0.003031					
0.46	0.38	0.06	0.035	0.003031					
0.46	0.38	0.065	0.055	0.003031					
0.46	0.38	0.066	0.035	0.003426					
0.46	0.38	0.066	0.055	0.003426					
0.46	0.38	0.075	0.065	0.003426					
0.46	0.38	0.072	0.032	0.004305					
0.46	0.38	0.072	0.04	0.004305					
0.46	0.38	0.073	0.055	0.004305					
0.46	0.38	0.08	0.028	0.005136					
0.46	0.38	0.08	0.045	0.005136					
0.46	0.38	0.082	0.07	0.005136					
0.46	0.36	0.032	0.029	0.000557					
0.46	0.36	0.045	0.02	0.001678					
0.46	0.36	0.046	0.028	0.001678					
0.46	0.36	0.055	0.05	0.001678					
0.46	0.36	0.054	0.025	0.002655					
0.46	0.36	0.055	0.03	0.002655					
0.46	0.36	0.058	0.05	0.002655					
0.46	0.36	0.061	0.032	0.003259					
0.46	0.36	0.061	0.043	0.003259					
0.46	0.36	0.065	0.06	0.003259					
0.46	0.36	0.066	0.033	0.00408					
0.46	0.36	0.068	0.05	0.00408					
0.46	0.36	0.071	0.065	0.00408					
0.46	0.36	0.075	0.045	0.004804					
0.46	0.36	0.078	0.06	0.004804					
0.46	0.36	0.095	0.088	0.004804					



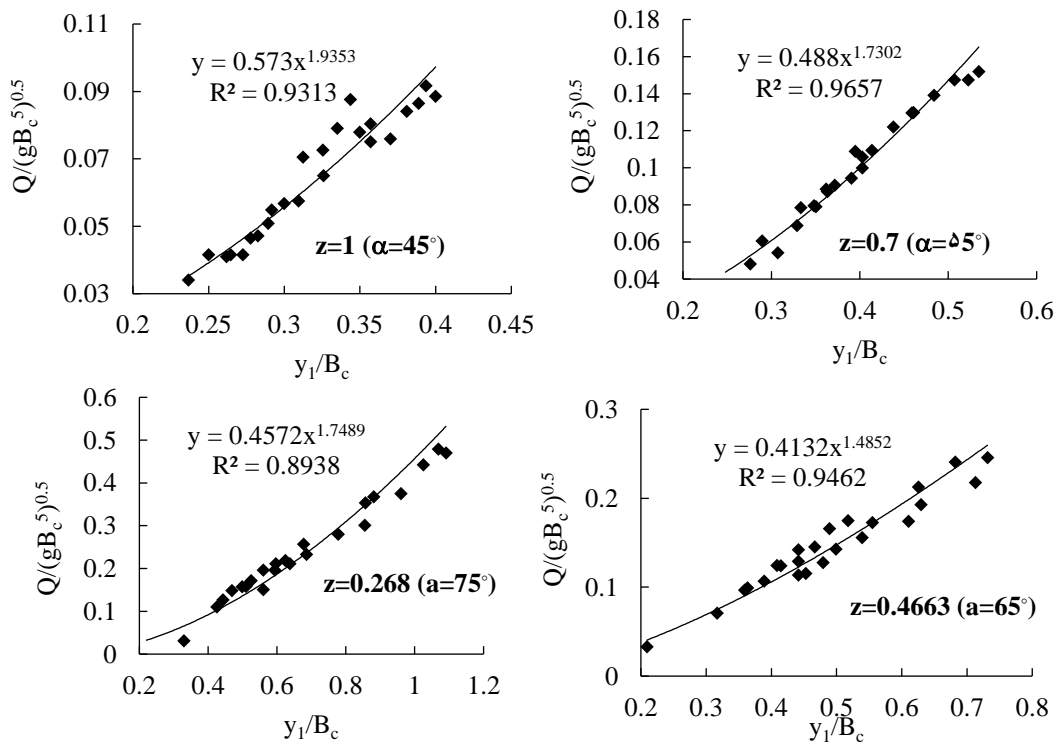
شکل ۲- الف: کانال آزمایشگاهی حین انجام آزمایش در شرایط جریان آزاد ب: شکل شماتیک مقطع عرضی کانال و پایه استوانه‌ای (Badar and Ghare 2012)

نتایج و بحث

جریان آزاد

پس از انجام ۲۴ آزمایش در یک شیب جانبی معین، بر اساس رابطه (۵)، تغییرات پارامتر بی‌بعد عمق جریان در بالادست گلوگاه (y_1/B_c) در برابر دبی جریان بی‌بعد $(Q/(gB_c^5)^{0.5})$ به طور جداگانه برای شیب‌های جانبی مختلف در شکل (۳) ارائه شده‌اند.

همانطوری که از روی نمودارهای شکل (۳) مشخص است در هر چهار نمودار با افزایش عمق جریان بی‌بعد، دبی جریان بی‌بعد نیز افزایش می‌یابد. اما این افزایش با افزایش شیب وجه جانبی از روند مشخصی تبعیت نمی‌کند. مقادیر پارامتر آماری MARE برای شیب‌های جانبی (z) ۱، ۰/۷، ۰/۴۶۶۳ و ۰/۲۶۸ به ترتیب برابر با ۶/۲، ۴/۶، ۸/۱ و ۹/۴ درصد بدست آمده است. همچنین مقادیر پارامتر آماری RMSE برای شیب‌های جانبی مذکور به ترتیب ۰/۰۰۶، ۰/۰۷۸، ۰/۰۱۲ و ۰/۰۲۷ می‌باشد.



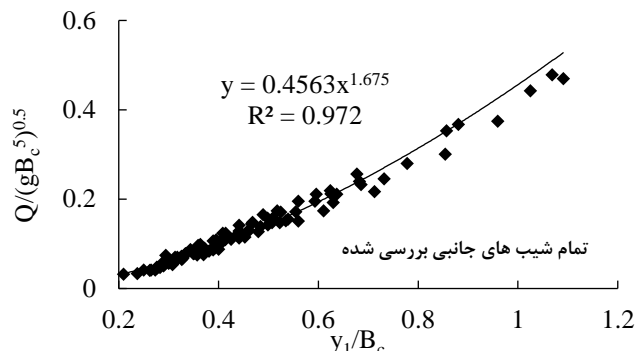
شکل ۳- تغییرات پارامتر بی‌بعد عمق جریان (y_1/B_c) در برابر دبی جریان بی‌بعد $Q/(gB_c^5)^{0.5}$ در شیب‌های جانبی مختلف در شرایط جریان آزاد

جریان بی‌بعد $(Q/(gB_c^5)^{0.5})$ برای شیب‌های جانبی مختلف در

تغییرات پارامتر بی‌بعد عمق جریان (y_1/B_c) در برابر دبی

هم‌پوشانی نمودارهای شکل (۳) بدست آمده است.

قالب یک نمودار در شکل (۴) نشان داده شده است. این شکل از



شکل ۴- تغییرات y_1/B_c در برابر $Q/(gB_c^5)^{0.5}$ در شرایط جریان آزاد برای تمام شیب‌های جانبی بررسی شده

جریان آزاد بدست آمده دارای دقت مناسبی است

مقدار پارامتر آماری MARE و RMSE بر اساس شکل (۴)،

به ترتیب ۸/۲ درصد و ۰/۰۱۷ بدست آمده است.

جریان مستغرق

با توجه به منحنی شکل (۴)، رابطه بین محاسبه دبی جریان

در این شرایط بر اساس رابطه (۱۰)، پس از انجام حداقل ۱۹۲

آزمایش در چهار شیب جانبی مختلف (حداقل ۴۸ آزمایش در هر

شیب جانبی)، تغییرات پارامتر بدون بعد $Q/(gy_1^5)^{0.5}$ در برابر

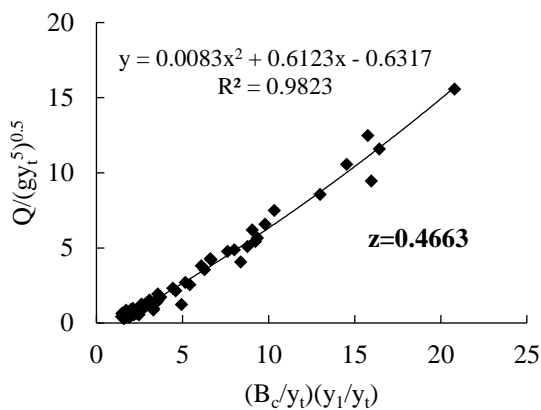
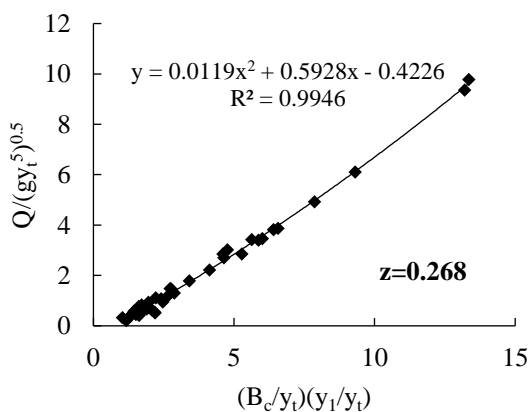
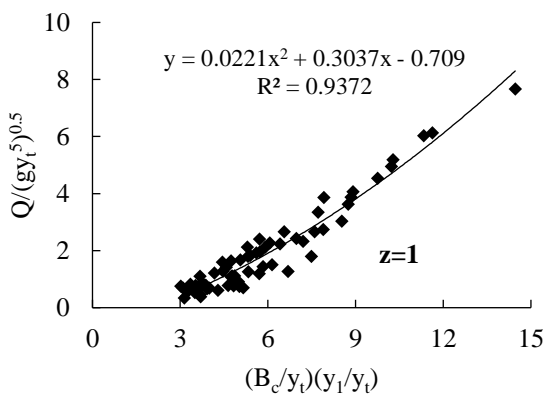
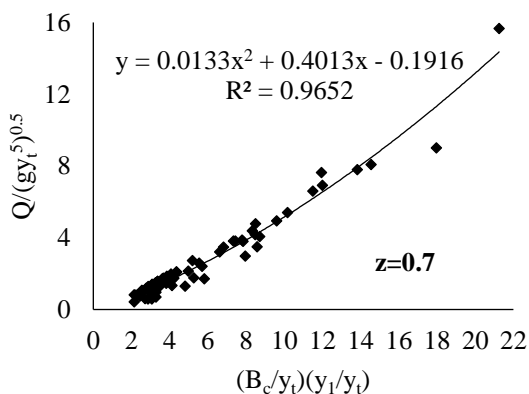
$(B_c y_1 / y_1^2)$ برای هر چهار شیب جانبی بررسی شده در شکل (۵)

نشان داده شده است.

در شرایط جریان آزاد به صورت رابطه (۱۴) است.

$$Q = 0.4563 g^{0.5} B_c^{0.825} y_1^{1.675} \quad (\text{رابطه } 14)$$

بنابراین رابطه (۱۴) که برای محاسبه دبی جریان در شرایط



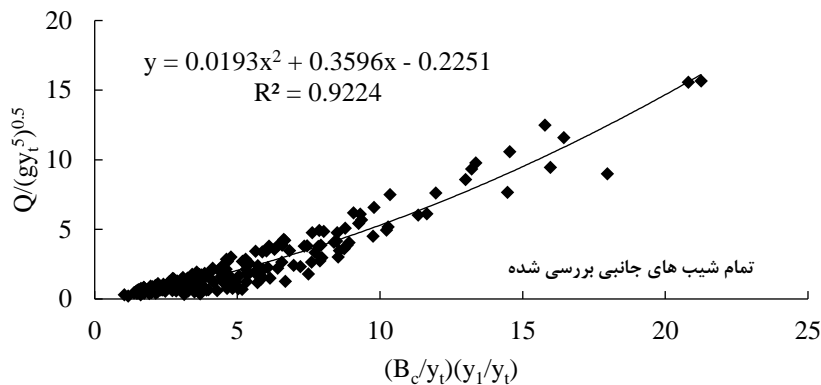
شکل ۵- تغییرات $Q/(gy_1^5)^{0.5}$ در برابر $(B_c/y_1)(y_1/y_1)$ در شیب‌های جانبی مختلف در شرایط جریان مستغرق

ترتیب ۰/۳۴، ۰/۳۲، ۰/۲۷ و ۰/۱۶ می‌باشد. بنابراین دقت برآورد دبی جریان در شرایط جریان مستغرق با استفاده از منحنی‌های شکل (۵) نسبت به جریان آزاد پایین است.

از هم‌پوشانی نمودارهای شکل (۵)، منحنی تغییرات $Q/(gy_t^5)^{0.5}$ در برابر $(B_c/y_t)(y_1/y_t)$ برای تمامی شیب‌های جانبی بررسی شده بدست می‌آید (شکل ۶).

در منحنی‌های شکل (۵)، ملاحظه می‌گردد با کاهش نسبت استغراق (y_t/y_1) و یا با افزایش نسبت y_1/y_t ، دبی بی‌بعد $Q/(gy_t^5)^{0.5}$ افزایش می‌یابد.

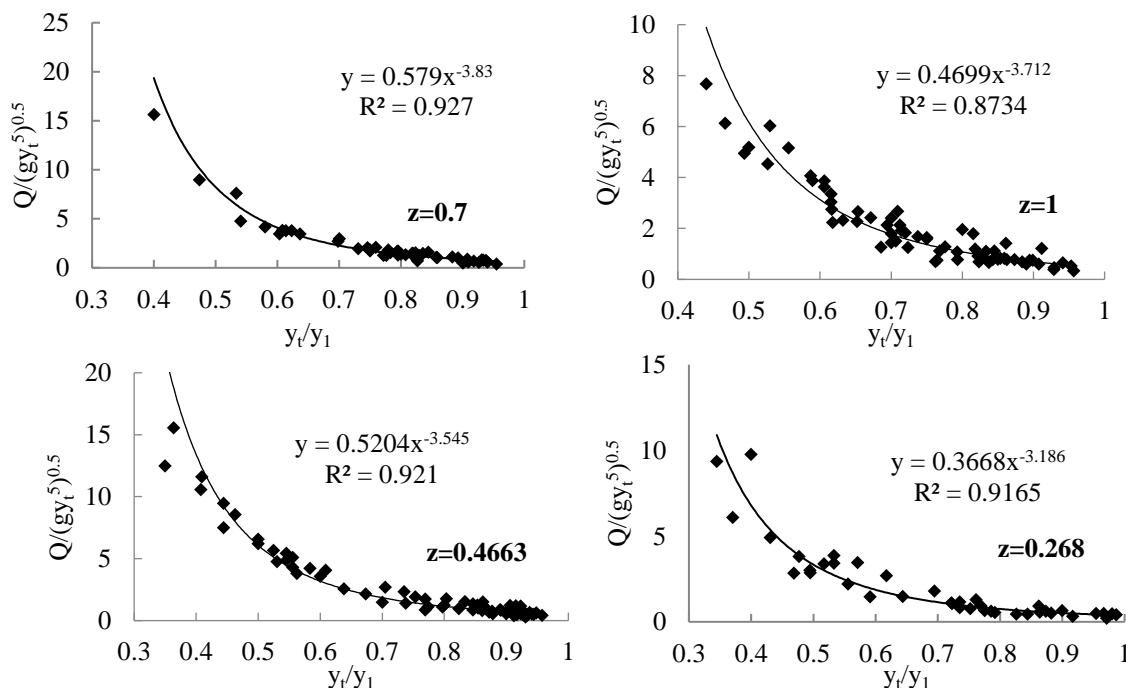
مقدار پارامتر آماری MARE بر اساس منحنی‌های شکل (۵) برای شیب‌های جانبی (z) ۱، ۰/۷، ۰/۴۶۶۳ و ۰/۲۶۸ به ترتیب ۲۲/۹، ۲۵/۱۷، ۱۹ و ۱۴/۹ درصد برآورد شده است. همچنین پارامتر آماری RMSE برای شیب‌های جانبی مذکور به



شکل ۶- تغییرات $Q/(gy_t^5)^{0.5}$ در برابر $(B_c/y_t)(y_1/y_t)$ در تمامی شیب‌های جانبی بررسی شده در شرایط جریان مستغرق

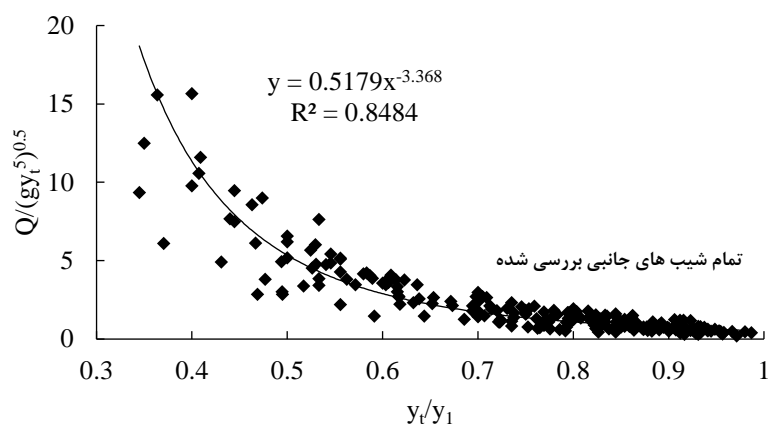
در شرایط جریان مستغرق مناسب به نظر نمی‌رسد. بر اساس رابطه (۱۱) تغییرات y_t/y_1 در برابر $Q/(gy_t^5)^{0.5}$ در شکل (۷) ارائه شده است. از روی نمودارهای این شکل دیده می‌شود که با افزایش نسبت استغراق (y_t/y_1) دبی بی‌بعد $Q/(gy_t^5)^{0.5}$ کاهش می‌یابد.

علیرغم مناسب بودن ضریب رگرسیونی رابطه بین $(B_c/y_t)(y_1/y_t)$ در برابر $Q/(gy_t^5)^{0.5}$ در شکل (۶) که برابر ۰/۹۲ بدست آمده، محاسبه دبی جریان بی‌بعد با استفاده از این شکل دارای MARE و RMSE به ترتیب برابر با ۳۵/۹ درصد و ۰/۴۸ می‌باشد. بنابراین استفاده از این شکل برای محاسبه دبی جریان



شکل ۷- تغییرات y_t/y_1 در برابر $Q/(gy_t^5)^{0.5}$ در شیب‌های جانبی مختلف

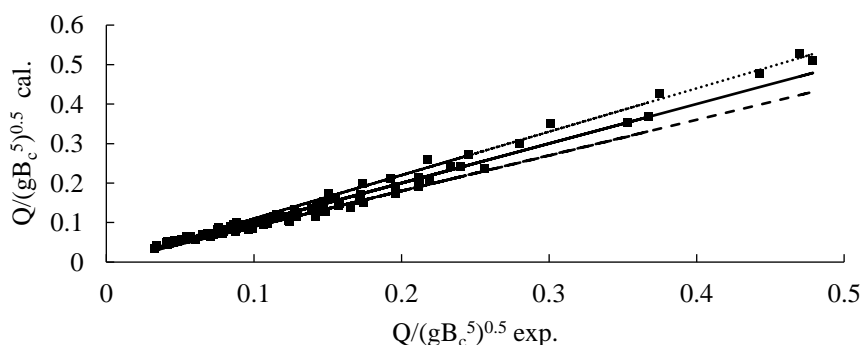
ارائه شوند، تغییرات y_t/y_1 در برابر $Q/(gy_t^5)^{0.5}$ برای تمام شیب‌های جانبی بررسی شده حاصل می‌شود. شکل (۸) این تغییرات را نشان می‌دهد. ضریب رگرسیونی رابطه بین نسبت استغراق (y_t/y_1) و $Q/(gy_t^5)^{0.5}$ در شکل (۸) معادل 0.8484 بدست آمده و مقادیر پارامترهای MARE و RMSE در محاسبه دبی جریان بی‌بعد با استفاده از منحنی ارائه شده در این شکل برابر $34/3$ درصد و 0.39 است.



شکل ۸- تغییرات y_t/y_1 در برابر $Q/(gy_t^5)^{0.5}$ در تمامی شیب‌های جانبی بررسی شده در شرایط جریان مستغرق

رابطه‌ای واحد برای محاسبه دبی جریان در شرایط جریان مستغرق در محدوده شیب‌های جانبی بررسی شده انجام شده است.

دبی‌های بی‌بعد اندازه‌گیری شده و محاسبه شده در شرایط جریان آزاد بر اساس شکل (۴) (رابطه ۱۴) در محدوده خطای ± 10 درصد مقایسه و در شکل (۹) ارائه شده است.



شکل ۹- مقایسه دبی‌های بی‌بعد اندازه‌گیری شده و محاسبه شده در شرایط جریان آزاد در تمام شیب‌های جانبی بررسی شده در محدوده خطای ± 10 درصد بر اساس رابطه (۱۴)

توان و ضریب عمق جریان بدون بعد در رابطه ارائه شده توسط Samani and Magallanez (1993) که هم برای شرایط جریان آزاد و هم برای شرایط جریان مستغرق (که بدون در نظر

مقدار MARE در تعیین دبی جریان با استفاده از منحنی‌های شکل (۷) برای شیب‌های جانبی (z) ۱، ۰/۷، ۰/۴۶۶۳ و ۰/۲۶۸ به ترتیب برابر با $21/3$ ، $20/2$ ، $22/7$ و $23/8$ درصد و مقدار RMSE برای شیب‌های جانبی مذکور به ترتیب برابر با 0.37 ، 0.38 ، 0.28 می‌باشد که نشان دهنده دقت نسبتاً پایین این منحنی‌ها در مقایسه با شرایط جریان آزاد (رابطه ۱۴) است. چنانچه داده‌های نمودارهای شکل (۷) در قالب یک نمودار

بنابراین استفاده از شکل‌های مذکور برای محاسبه دبی جریان، دقت مورد انتظار را ندارد. دلیل بالا بودن مقدار MARE و RMSE در این دو شکل (شکل‌های ۶ و ۸) همپوشانی داده‌های مربوط به شیب‌های جانبی بررسی شده در قالب یک نمودار می‌باشد (نمودارهای شکل ۵ در قالب نمودار شکل ۶ و نمودارهای شکل ۷ در قالب نمودار شکل ۸) که با هدف بدست آوردن

با توجه به شکل (۹) مشخص می‌شود اکثر دبی‌های بی‌بعد محاسبه شده در محدوده خطای ± 10 درصد دبی‌های بی‌بعد آزمایشگاهی قرار دارند.

Mohammadi and Bonacci (1997) ۳٪ و در تحقیقات Vatankhah (2020)، در رابطه اول (استفاده از پایه‌های استوانه‌ای)، ۲/۷۲٪ و در رابطه دوم (استفاده از پایه‌های مخروطی)، ۱/۸۵٪ گزارش شده است. در تحقیق حاضر مقدار خطا در محاسبه دبی جریان با استفاده از رابطه بدست آمده در شرایط جریان آزاد در کانال دوزنقه‌ای با شیب جانبی (z) ۱، ۰/۷، ۰/۴۶۶۳ و ۰/۲۶۸ به ترتیب برابر با ۶/۲، ۴/۶، ۸/۱ و ۹/۴٪ و در شرایط جریان مستغرق برای شیب‌های جانبی مذکور به ترتیب ۲۵/۱۷، ۲۲/۹، ۱۹ و ۱۴/۹٪ در روش اول (منحنی‌های شکل ۵)، و در روش دوم (منحنی‌های شکل ۷) ۲۱/۳، ۲۰/۲، ۲۲/۷ و ۲۳/۸٪ بدست آمده است.

نتیجه‌گیری

جهت انجام این پژوهش، کانال آزمایشگاهی با شیب جانبی قابل تنظیم و پایه‌های استوانه‌ای (به تعداد چهار عدد در ابعاد مختلف) در آزمایشگاه هیدرولیک ساخته شد. آزمایشات متعددی در شرایط جریان آزاد و مستغرق بر اساس روابط تابعی و بدون بعد بدست آمده از آنالیز ابعادی صورت گرفتند و نتیجه‌گیری شد که استفاده از این سازه در شرایط جریان آزاد قابل اطمینان بوده و رابطه بدست آمده جهت محاسبه دبی جریان بی‌بعد در هر شیب جانبی به طور جداگانه و رابطه (۱۴) که برای تمام شیب‌های جانبی بررسی شده بدست آمده از دقت مناسبی برخوردار است به طوریکه میانگین قدر مطلق خطای نسبی (MARE) و خطای جذر میانگین مربعات (RMSE) در محاسبه دبی جریان با استفاده از این رابطه به ترتیب برابر ۸/۲ درصد و ۰/۱۷ می‌باشد. ساخت کانال‌های دوزنقه‌ای با شیب وجه جانبی ۱:۱ خیلی رایج‌تر است، لذا با توجه به اینکه مقادیر MARE و RMSE مربوط به این شیب جانبی که به ترتیب ۶/۲ درصد و ۰/۰۰۶ می‌باشد، استفاده از منحنی و رابطه ارائه شده در شکل (۳) مربوط به شیب جانبی z=1 دارای دقت بالاتری نسبت به رابطه (۱۴) می‌باشد. در هر شیب جانبی دقت برآورد دبی در شرایط جریان مستغرق پایین بوده و استفاده از این سازه در این شرایط بر اساس نتایج حاصل از تحقیق حاضر پیشنهاد نمی‌گردد. استفاده از یک رابطه واحد برای محاسبه دبی جریان که هم در شرایط جریان آزاد و هم در شرایط جریان مستغرق بکار رود مناسب نیست و باید رابطه مربوط به هریک از شرایط جریان آزاد و مستغرق بطور جداگانه استفاده شود. حساسیت این سازه نسبت به تغییرات عمق جریان در بالادست گلوگاه، هم‌سطح سرریزهای مثلثی لبه‌تیز و بالاتر از سرریزهای مستطیلی لبه‌تیز است. بهتر است از نتایج بدست آمده در محدوده متغیرهای موثر در این تحقیق استفاده شود.

گرفته شدن نسبت استغراق ارائه شده)، به ترتیب ۱/۵۱ و ۰/۲۲۶ می‌باشد. اما در رابطه بدست آمده در تحقیق حاضر (رابطه ۱۴) به ترتیب ۱/۶۷۵ و ۰/۴۵۶۳ بدست آمده است. مشخص است که مقادیر توان و ضریب بدست آمده در این تحقیق بیشتر از تحقیق (Samani and Magallanez (1993) است. این موضوع به این دلیل می‌تواند باشد که به ازای یک دبی جریان معین، عمق جریان در بالادست گلوگاه در شرایط جریان مستغرق بیشتر از شرایط جریان آزاد خواهد بود (به دلیل تاثیر عمق پایاب روی عمق بالادست). با توجه به اینکه در تحقیقات این محققین جهت بدست آوردن رابطه محاسبه دبی جریان، از داده‌های شرایط جریان مستغرق نیز استفاده شده لذا در تحقیقات مذکور جهت بدست آوردن رابطه محاسبه دبی جریان، به ازای یک دبی جریان معین از مقادیر بزرگتری برای عمق جریان بالادست (نسبت به شرایط جریان آزاد) استفاده شده است. به عبارت دیگر در شرایط مساوی از نظر دبی جریان، مقدار عمق جریان استفاده شده در رابطه محققین مذکور بیشتر از عمق جریان استفاده شده در رابطه بدست آمده در تحقیق حاضر باید باشد.

در رابطه ارائه شده توسط Ghare and Badar (2012) که بر اساس داده‌های آزمایشگاهی دیگر محققان از جمله Samani and Magallanez (1993) برای شیب جانبی z=1 بدست آمده، از گروه‌های بدون بعدی که با گروه‌های بدون بعد بکار رفته در تحقیقات (Samani and Magallanez (1993) و تحقیق حاضر تفاوت دارد استفاده شده است. همچنین در این رابطه نیز تاثیر نسبت استغراق نادیده گرفته شده است. توان و ضریب عمق جریان بدون بعد در رابطه Ghare and Badar (2012) به ترتیب ۲/۴۳۸ و ۰/۴۴۶ می‌باشد. رابطه بدست آمده در تحقیق حاضر (رابطه ۱۴)، یک رابطه با درجه ۲/۵ نسبت به عمق جریان در بالادست گلوگاه می‌باشد که بالاتر از توان بار هیدرولیکی روی تاج سرریز در رابطه سرریزهای مستطیلی لبه‌تیز (که ۱/۵ می‌باشد)، و مساوی توان بار هیدرولیکی روی راس سرریز در رابطه سرریزهای مثلثی لبه‌تیز است. این موضوع نشان دهنده حساسیت بالای این سازه در محاسبه دبی جریان در شرایط جریان آزاد نسبت به تغییرات عمق جریان در بالادست گلوگاه است.

مقدار خطا در محاسبه دبی جریان با استفاده از رابطه بدست آمده در تحقیقات Hager (1985)، ۵٪، در تحقیقات Mattar (2017)، ۸/۷٪، در تحقیقات Das et al. (2017)، ۵٪، در تحقیقات Ghare and Kapoor et al. (2019)، ۹٪، در تحقیقات Samani and Magallanez Badar (2012)، ۴/۷٪، در تحقیقات Samani and Magallanez (1993)، ۵/۱٪، در تحقیقات Ghare and Badar (2014) در رابطه اول ۵ و در رابطه دوم ۲۰٪، در تحقیقات Peruginelli and

"هیچ‌گونه تعارض منافع توسط نویسندگان وجود ندارد"

REFERENCES

- Badar, A. M. Ghare, A. D. (2012). Development of discharge prediction model for trapezoidal canals using simple portable flume. *International Journal of Hydraulic Engineering*, 1(5), 37-42.
- Baiamonte, G. and Ferro, V. (2007). Simple flume for flow measurement in sloping open channel. *Journal of Irrigation & Drainage Engineering*, 133(1), 71-78.
- Bos, M. G. (1985). Long-throated flumes and broad-crested weirs. International institute for land Reclamation and improvement, Wageningen, The Netherland, 156.
- Das, R. Nayek, M. Das, S. Dutta, P. and Mazumdar A. (2017). Design and analysis of 0.127 m (5") Cutthroat flume. *Ain Shams Engineering Journal*, 8(3), 295-303.
- Ghare, A. D. and Badar, A. M. (2014). Experimental studies on the use of mobile cylinders for measurement of flow through rectangular channels. *International Journal of Civil Engineering*, 12(4), 504-512.
- Goel, A. (2006). On a flow meter for discharge measurement in irrigation channels. *Flow Measurement and Instrumentation* 17(5), 255-257.
- Hager, W. H. (1985). Modified venture channel. *Journal of Irrigation and drainage engineering*, 111(1), 19-35.
- Hager, W. H. (1986). Modified trapezoidal venture channel. *Journal of Irrigation and drainage engineering*, 112(3), 225-241.
- Hager, W. H. (1988). Mobile flume for circular channel. *Journal of Irrigation and drainage engineering*, 114(3), 520-534.
- Hayawi, H. A. Yahya A. A. and Hayawi, G. A. (2013). Analysis of hydraulic characteristics of cutthroat flume. *Al-Rafidain Engineering Journal (AREJ)*, 21(4), 131-141.
- Kapoor, A. Ghare, A. D. Vasudeo, A. D. and Badar, A. M. (2019). Channel Flow Measurement Using Portable Conical Central Baffle. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 145(11), 06019010, 1-9.
- Matter, H. A. Khadr, M. Rashwan, I. M. (2017). Mobile flume for inverted semicircular Open channel, *Mansoura Engineering Journal*, 42(4), 27-36.
- Mohammadi, M. and Vatankhah, A. (2020). Flow measurement flume with cylindrical and conical walls. *Iranian soil and water researches*, 51(7), 1637-1651 (in Persian).
- Peruginelli, A. and Bonacciz, F. (1997). Mobile prisms for flow measurement in rectangular channels. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 123(3), 170-174.
- Rashwan, I. M. H and Idress, M.I. (2013). Evaluation efficiency for mobile as discharge measurement device for partially filled circular channel. *Ain Shams Engineering Journal*, 4(2), 199-206.
- Samani, Z. and Magallanez, H. (1992). Hydraulic characteristics of a circular flume. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 117(4), 559-567.
- Samani, Z. and Magallanez, H. (1993). Measuring water in trapezoidal canals. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 119(4), 181-189.
- Samani, Z. and Magallanez, H. (2000). Simple Flume for Flow Measurement in Open Channels. *Journal of Irrigation & Drainage Engineering*, 126(2), 127-129.
- Tekade, S. A. Vasudeo, A. D. Ghare, A. D. and Ingle, R. N. (2016). Measurement of flow in supercritical flow regime using cutthroat flumes. *Sādhanā* 41(2), 265-272.