

Flow Measurement Flume with Cylindrical and Conical Walls

MILAD MOHAMMADI¹, ALIREZA VATANKHAH^{1*}

1. Department of Irrigation and Reclamation Engineering, College of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran.

(Received: March. 23, 2020- Revised: May. 3, 2020- Accepted: May. 6, 2020)

ABSTRACT

Accurate water measurement is one of the key factors for reduction of agricultural water consumption, distribution integrity and delivery management in irrigation networks. In recent years, there has been a significant advance in flow measurement devices, but the usage of these devices is limited due to the high cost, special maintenance conditions and the need for skill expertise. Water structure used in this study is a new form of flow measurement flume that installed along the channel and has cylindrical and conical shape walls. The crest matches the channel's floor thus in this measuring structure, the control section happens only by transversal constriction. The new flumes are simple in shape and easily applicable in irrigation networks and they have not sedimentation problem. The amount of energy loss and consequently the upstream backwater in this structure is low. This structure controls the flow by creating critical flow in constriction section and will be able to measure flow discharge. In this study, the flow characteristics through the cylindrical and conical flumes have been studied theoretically and experimentally, and several equations have been developed for flow discharge estimation in rectangular open channels.

Keywords: Stage–Discharge Relationship, Rectangular And Trapezoidal Constriction, Backwater Effects, Flow Measurement.

* Corresponding Author's Email: arvatan@ut.ac.ir

فلوم اندازه‌گیری جریان با دیواره‌های مخروطی و استوانه‌ای شکل

میلاذ محمدی^۱، علیرضا وطن‌خواه^{۱*}

۱. گروه مهندسی آبیاری و آبادانی، پردیس کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران.
(تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۱/۴ - تاریخ بازنگری: ۱۳۹۹/۲/۱۴ - تاریخ تصویب: ۱۳۹۹/۲/۱۷)

چکیده

اندازه‌گیری دقیق جریان یکی از عوامل اساسی در جهت برنامه‌ریزی برای کاهش مصرف آب کشاورزی، ایجاد عدالت توزیع و مدیریت تحویل در سامانه‌های تحویل آب در شبکه‌های آبیاری می‌باشد. امروزه تجهیزات نوین اندازه‌گیری دبی توانسته‌اند صحت تحویل آب را افزایش دهند، اما علاوه بر هزینه سرمایه‌گذاری و بهره‌برداری، نیاز به نیروی کار ماهر، گسترش استفاده از آن‌ها را محدود کرده است. سازه مورد استفاده در این تحقیق شکل جدیدی از فلوم‌های اندازه‌گیری جریان می‌باشد که در طول کانال نصب شده و دارای دیواره‌های استوانه‌ای و مخروطی شکل هستند و تاج آن‌ها نیز بر کف کانال منطبق است لذا در این سازه، ایجاد مقطع کنترل در مسیر جریان فقط از طریق تنگ‌شدگی عرضی صورت می‌گیرد. این نوع از سازه همچنین دارای شکل ساده‌ای بوده و به سادگی در شبکه‌های آبیاری قابل اجرا بوده و مشکل رسوب‌گذاری نیز نخواهند داشت. میزان افت انرژی در این سازه و پس‌زدگی حاصل از آن در بالادست کم بوده و این سازه با ایجاد جریان بحرانی در مقطع تنگ‌شدگی، جریان را کنترل نموده و قادر به اندازه‌گیری بده جریان خواهد بود. در این تحقیق با مطالعه نظری و آزمایشگاهی خصوصیات جریان عبوری از سازه‌های استوانه‌ای و مخروطی شکل در شرایط جریان آزاد، معادلاتی برای تخمین بده جریان در یک کانال مستطیلی توسعه داده شده است.

واژه‌های کلیدی: معادله دبی-اشل، انقباض‌های مستطیلی و دوزنقه‌ای، اثرات پس‌زدگی، اندازه‌گیری جریان.

مقدمه

فلوم از رایج‌ترین وسیله‌های اندازه‌گیری جریان در مجاری روباز می‌باشد که در آن سرعت جریان، بر اثر تنگ‌شدگی عرضی، برآمدگی کف و یا ترکیبی از این دو، افزایش می‌یابد. یکی از فلوم‌هایی که ویژگی فوق را داراست، فلوم SMBF است که با داشتن دو نیم‌استوانه در طرفین کانال، باعث تنگ‌شدگی عرضی می‌شود. در پژوهش حاضر، بر اساس عملکرد هیدرولیکی سازه شکاف کنترل^۱، تلاش در ارائه سازه جدید اندازه‌گیری دبی که می‌تواند مزایای قابل توجهی داشته باشد، شده است. از مزایای سازه پیشنهادی در این تحقیق طراحی و اجرای ساده، هزینه احداث کم و عملکرد مطلوب می‌باشد. از طرفی بنا به عملکرد هیدرولیکی خاصی که دارد و همچنین شکل استوانه‌ای سازه، می‌تواند مشکلاتی نظیر رسوبگذاری و آبشستگی در محل سازه را برطرف نموده و به سهولت قابل بهره‌برداری است.

بیش از یک و نیم قرن از شروع مطالعات نظری و آزمایشگاهی در زمینه فلوم‌ها سپری می‌شود و تاکنون، انواع مختلفی از این سازه‌ها توسط محققین مختلف معرفی و مشخصات سازه‌ای و هیدرولیکی آنها تعیین شده است. Hager (1985)

سیلندر محوری قرار داده شده در کانال منشوری افقی را اصلاح کرد. وی با انجام آزمایشاتی در کانال مستطیلی یک رابطه‌ی دبی-اشل به منظور اندازه‌گیری دبی جریان با خطای ۵ درصد پیشنهاد داد و همچنین فرایند جریان در مجاورت سیلندر را مشخص کرد. نتایج این تحقیق منجر به اصلاح مدل در کانال دایره‌ای شد. Hager (1985) با ترسیم منحنی بدون بعد انرژی بحرانی نسبی در مقابل دبی نسبی، ضریب تصحیحی را به دست آورد و در نهایت رابطه‌ای برای محاسبه دبی پیشنهاد داد. وی همچنین در سال (۱۹۸۶) با استفاده از قرار دادن یک مخروط به صورت قائم در مرکز کانال مستطیلی و همچنین قرار دادن دو نیم مخروط در کناره‌های کانال مستطیلی در شرایط زیربحرانی، الگوی ناشی از آن را بررسی کرد (Hager, 1986). آزمایشات وی، پیش‌بینی‌های نظری را تأیید کرد و نشان داد که قانون تشابه فرود بر خصوصیات جریان حاکم است. Samani et al. (1991) آزمایشاتی را جهت بررسی مشخصات هیدرولیکی چند فلوم دایره‌ای انجام دادند. همچنین به منظور اندازه‌گیری عمق آب بالادست مقطع جریان بحرانی یک عمق سنج در بالادست ستون داخلی نصب شده است. آنها در این پژوهش با استفاده از معادله انرژی و رابطه فرود و با

جریان پس‌زده در بالادست سازه و تعیین ضریب افت موضعی ناشی از نصب آن ارائه کرده است. (2017) Vatankhah راه‌حل‌های مستقیم و ترسیمی را برای تعیین ابعاد محدودشده کانال ذوزنقه‌ای و طراحی شکاف کنترل ذوزنقه‌ای ارائه نمود. در این تحقیق مبنای راه‌حل‌های گرافیکی مورد استفاده برای طراحی دبی‌های کمتر از $2/83$ مترمکعب بر ثانیه استفاده شده است. راه‌حل‌های پیشنهادی در طراحی و تحلیل کانال‌های ذوزنقه‌ای و شکاف‌ها با هر بده‌ای قابل استفاده می‌باشند. (2000) Magallanez یک فلوم ساده و نتوری پیشنهاد کردند که شامل دو عدد نیم‌استوانه در دیواره‌های یک کانال مستطیلی بود. در این تحقیق آزمایشگاهی، خطای ناشی از قرائت عمق سنج برابر ۳ درصد بوده است. (2017) Samani بر اساس مفهوم جریان بحرانی در کانال‌های روباز به وسیله قرار دادن ستون‌های عمودی در مسیر جریان و ایجاد انقباض، یک معادله عمومی بدون نیاز به ضرائب چندگانه واسنجی و بدون وابستگی به نسبت انقباض و شیب جانبی کانال، پیشنهاد داد که می‌تواند برای هر سه نوع کانال (مستطیلی، ذوزنقه‌ای و دایره‌ای) قابل کاربرد باشد. (2007) Baiamonte and Ferro با قرار دادن دو نیمه سیلندر در یک کانال مستطیلی آزمایشاتی را انجام دادند. سپس با تحلیل ابعادی و نظریه خود-تشابهی، رابطه دبی-اشل را به صورت نظری به‌دست آوردند. آزمایش‌ها با استفاده از مقادیر مختلف نسبت انقباض و شیب فلوم انجام شد و در نهایت، برای یک محدوده از نسبت انقباض، روابطی برای برآورد دو ضریب رابطه دبی-اشل ارائه شد. (2008) Di Stefano *et al.* رابطه‌ی دبی-اشل را برای یک فلوم جدید به نام SMBF ارائه کردند. علت نام‌گذاری این فلوم این است که در ابتدا توسط سامانی و ماگالانز پیشنهاد شد و در ادامه توسط بایامونته و فررو برای اندازه‌گیری جریان در کانال‌های باز مورد آزمایش قرار گرفت. آزمایشات صحرائی این تحقیق با استفاده از یک فلوم افقی و مقادیر مختلف نسبت انقباض، به منظور به دست آوردن دو ضریب رابطه‌ی دبی-اشل در بازه‌ی زمانی ۲۰۰۴ تا ۲۰۰۶ در حوضه آبریز سیسیل انجام شده است. (2016) Carollo *et al.* یک معادله جدید دبی-اشل برای فلوم SMBF به صورت نظری پیشنهاد دادند. سپس، این معادله تجربی با استفاده از اندازه‌گیری‌های آزمایشگاهی برای مقادیر مختلف نسبت انقباض واسنجی شد. در نهایت اندازه‌گیری‌های میدانی به‌وسیله فلوم SMBF نصب شده در محل و نسبت انقباض مشخص برابر با $0/5$ انجام شد، سپس از داده‌های حاصل برای آزمون رابطه دبی-اشل جدید استفاده شد. همچنین Khalili (2017) Shayan *et al.* با ارائه یک بحث در مورد تحقیق Carollo (2016) *et al.* رویکردی برای محاسبه بده ارائه کردند. طبق نظر آنها در حالت کلی امکان تخمین دبی جریان از فلوم SMBF تنها

فرض توزیع یکنواخت سرعت، رابطه‌ای بر اساس رابطه انرژی بالادست مقطع جریان بحرانی پیشنهاد دادند که با مقایسه دبی محاسباتی و دبی اندازه‌گیری برای چهار فلوم دایره‌ای، حداکثر خطا را برابر با ۶ درصد به‌دست آوردند. (1993) Magallanez با هدف اندازه‌گیری بده جریان توسط یک فلوم ساده، آزمایشاتی را با نصب لوله‌ای که به‌صورت قائم در داخل یک کانال ذوزنقه‌ای با شیب جانبی ۱:۱، قرار داشت، انجام دادند. (2012) Badar and Ghare با استفاده از تحلیل ابعادی، یک مدل ریاضی جدید به منظور پیش بینی دبی کانال ذوزنقه‌ای با شیب جانبی ۱:۱ به‌وسیله قرار دادن سیلندر در داخل کانال ذوزنقه‌ای ارائه کردند و رابطه به‌دست آمده را با رابطه مربوط به تحقیق (1993) Samani and Magallanez مقایسه کردند. مقایسه دو رابطه نشان داد که مدل ریاضی پیشنهادی، دبی جریان را با دقت بیشتری اندازه‌گیری می‌کند و دارای حداکثر خطای $4/7\%$ می‌باشد در حالیکه حداکثر خطای رابطه سامانی و ماگالانز برابر $5/1\%$ می‌باشد. (2019) Lotfi Kolavani *et al.* به منظور نشان دادن تاثیرات پارامترهای هندسی مانند طول تیغه و ضریب انقباض، آزمایش‌های گسترده‌ای انجام دادند. در این آزمایشات با قرار دادن یک تیغه در کانال مستطیلی روابطی با استفاده از دو رویکرد تحلیل ابعادی و روش خودتشابهی ناقص و نیز معادله انرژی استنباط گردید که معادله به‌دست آمده در این تحقیق از طریق تحلیل ابعادی از معادله استنباط شده با استفاده از معادله انرژی دقیق‌تر است. همچنین آزمایشات نشان داد که دیواره هدایت‌کننده بالادست با زاویه راس 75° درجه، شرایط هیدرولیکی مناسبی را در ورودی فلوم ایجاد می‌کند و دیواره هدایت‌کننده پایین دست تاثیر روی رابطه دبی-اشل ندارد. برای تعیین حد مدولار فلوم و آستانه استغراق، از دو رویکرد حل عددی و رابطه مومنوم استفاده گردید و تحلیل‌ها نشان داد که نتیجه به‌دست آمده از حل عددی، بهترین جواب برای توصیف شرایط آستانه استغراق می‌باشد. (2019) Kapoor *et al.* نیز با قرار دادن یک مخروط در کانال مستطیلی و از طریق کاهش سطح مقطع کانال و ایجاد جریان بحرانی در مقطع تنگ شده، معادله‌ای جهت تخمین جریان پیشنهاد دادند. معادله پیشنهادی در این تحقیق با استفاده از معادله انرژی و بازه دبی جریان ۱ تا 52 لیتر بر ثانیه حاصل گردید. بیشترین خطای معادله پیشنهادی کمتر از 9% می‌باشد. (2014) Ghasemzadeh and Kouchakzadeh در یک پژوهش با آزمون شکل جدیدی از فلوم‌های اندازه‌گیری دارای مقطع ذوزنقه‌ای و تاج منطبق بر کف کانال، روشی برای طراحی آن ارائه کردند. این فلوم به صورت فلوم‌های گلوبلند طبقه بندی و با ایجاد تنگ‌شدگی عرضی در کانال اما بدون نیاز به افزایش ارتفاع کف ایجاد شده است. این تحقیق روشی برای محاسبه انرژی

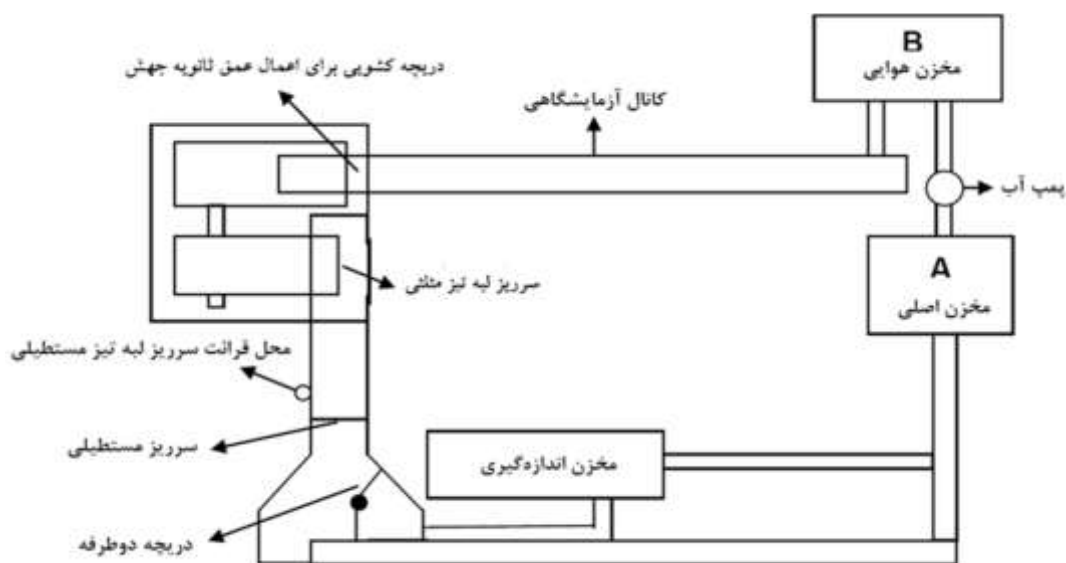
با بررسی مطالعات انجام شده بر روی فلوم‌های ساده اندازه-گیری جریانی، مشخص شد که علی‌رغم ویژگی‌های مطلوب هیدرولیکی و سازه‌ای، مطالعات انجام شده بر روی فلوم‌های اندازه‌گیری با شکل مقطع تنگ شده مستطیلی و خصوصاً مقطع تنگ شده دوزنقه‌ای و تاج منطبق بر کف کانال، محدود بوده است و کاربرد این سازه‌ها نیاز به بررسی‌های وسیع‌تر نظری و آزمایشگاهی دارد. هدف از این تحقیق شناخت رفتار هیدرولیکی فلوم‌های با دیواره‌های جانبی نیم‌استوانه (تنگ‌شدگی عرضی مستطیلی) و همچنین نیم‌مخروطی (تنگ‌شدگی عرضی دوزنقه-ای) و تعیین پارامترهای موثر در تخمین بده عبوری این سازه‌ها بوده است تا به این ترتیب مقدمه‌ای بر مجموعه‌ای از تحقیقات آینده باشد که در نهایت منجر به تدوین ضوابط طراحی و امتیازات و محدودیت‌های کاربرد این گونه از سازه‌های اندازه‌گیری بده باشد.

مواد و روش‌ها

تجهیزات آزمایشگاهی

پژوهش حاضر بر روی یک مدل هیدرولیکی ساخته شده در آزمایشگاه گروه مهندسی آبیاری و آبادانی دانشگاه تهران انجام شده است. کانال آزمایشگاهی مورد استفاده در این پژوهش، یک کانال مستطیلی از نوع شیب‌پذیر، به طول ۱۲ متر، عرض ۰/۲۵ متر و ارتفاع ۰/۵ متر و جنس چارچوب و بدنه‌ی آن به ترتیب از جنس فلز و شیشه می‌باشد. به منظور کنترل تلاطم جریان ورودی به کانال، صفحه‌هایی از جنس یونولیت، در سطح جریان قرار داده شده است. در شکل (۱) نمایی از سامانه تامین آب آزمایشگاه قابل مشاهده است.

بر اساس اندازه‌گیری عمق آب در بالادست فلوم مقدور نمی‌باشد، لذا علاوه بر اندازه‌گیری عمق آب در بالادست، لازم است عمق آب در یک موقعیت مشخص مانند مقطع گلوگاه نیز اندازه‌گیری شود. بحث‌کنندگان در نهایت به منظور برآورد دبی و شناخت رژیم جریان در محل گلوگاه، محاسبه چند پارامتر را پیشنهاد کرده‌اند، همچنین ذکر کرده‌اند که باید وقوع یا عدم وقوع انسداد در بالادست نیز تبیین شود. (Vatankhah (2017) نیز با ارائه یک بحث در مورد تحقیق (Carollo *et al.* (2016)، معادله‌ای به منظور اندازه‌گیری دبی جریان پیشنهاد کرد که مقدار خطای متوسط این تحقیق نسبت به تحقیق (Carollo *et al.* (2016) کمتر بود. بازه دبی جریان و نسبت انقباض در معادله پیشنهادی برابر $(0.17 \leq r \leq 0.81)$ و $(1.6 \leq Q \leq 5.3 \text{ l/s})$ می‌باشد که در آن r ضریب انقباض و Q بده فلوم می‌باشد. (Aminpour *et al.* (2019) به منظور اندازه‌گیری بده در شرایط جریان آزاد و مستغرق بر روی سازه SMBF مطالعه‌ای انجام دادند. در این تحقیق، با استفاده از داده‌های آزمایشگاهی، در محدوده وسیعی از بده، عمق بالادست و نسبت تنگ‌شدگی عرضی، معادلات بده پیشنهادی مختلف، مورد مقایسه و ارزیابی قرار گرفت و همچنین بر مبنای تحلیل‌های آزمایشگاهی، عددی و برداشت توزیع سرعت در مقطع گلوگاه، غیریکنواختی توزیع سرعت و عمق در مقطع تنگ‌شدگی و ماهیت دو بُعدی جریان را تبیین کردند. در نهایت 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 و همچنین روابطی جهت تعیین آستانه استغراق و تحلیل آبگذری در شرایط جریان مستغرق استخراج نمودند.



شکل ۱- نمایی از کانال و آرام‌کننده‌ها و سامانه تامین آب آزمایشگاه

گسترش بازه عرض کف تنگ‌شدگی، در یک مورد، مقدار عرض کف تنگ‌شدگی برابر صفر در نظر گرفته شد و مقدار شیب جانبی سازه برای این حالت محاسبه گردید. در این تحقیق سعی گردید سازه‌های طراحی شده به ساده‌ترین شکل ممکن ساخته شوند. جنس انتخاب شده جهت ساخت سازه‌ها، ورق آهن گالوانیزه در نظر گرفته شد. ورق‌های گالوانیزه مورد استفاده دارای ضخامت ۲ میلیمتر بوده و با خم کردن این صفحات سازه‌های مورد نظر به آسانی ساخته شدند. در شکل (۳) نمایی از سازه‌های مورد استفاده در این تحقیق قابل مشاهده است، همچنین نمونه‌ای از سازه‌های ساخته و نصب شده در این تصویر نشان داده شده است. همانطور که ملاحظه می‌گردد، سطح آب در بالادست سازه‌ها (خصوصاً مقطع تنگ‌شدگی دوزنقه‌ای) بسیار آرام و بدون آشفتگی می‌باشد. مشخصات هندسی سازه‌های مورد استفاده در آزمایش‌های تحقیق حاضر شامل عرض تنگ‌شدگی، قطر سازه و شیب جانبی سازه به صورت جداگانه در جدول (۱) ارائه شده است. دامنه‌ی تغییرات داده‌های هندسی و هیدرولیکی تحقیق حاضر نیز در جدول (۲) ارائه شده است. در تحقیق حاضر ۳۶ آزمایش بر روی فلوم نیم‌استوانه‌ای و ۷۷ آزمایش بروی فلوم نیم-مخروطی (جمعاً ۱۱۳ آزمایش) در رژیم جریان آزاد انجام شد.



شکل ۲- نمایی از عمق‌سنج مورد استفاده

مطابق شکل (۱) این مجموعه شامل یک مخزن اصلی A مجهز به یک دستگاه پمپ شعاعی و یک مخزن هوایی B می‌باشد. نقش مخزن هوایی تامین هد ثابت است که این امر توسط سرریزی که درون آن تعبیه شده انجام می‌گیرد. این سرریز آب اضافی پمپ شده به مخزن B را دوباره به مخزن اصلی A بر می‌گرداند و بدین ترتیب بار آبی و دبی جریان در سامانه ثابت می‌ماند. بده جریان ورودی به کانال، با استفاده از شیر فلکه‌ای که در ابتدای کانال، نصب شده است تنظیم می‌گردد. به منظور اندازه‌گیری بده عبوری از کانال، از سرریز مثلثی با فشرده‌گی جانبی برای بده‌های کم و از سرریز مستطیلی بدون فشرده‌گی جانبی برای بده‌های زیاد استفاده شد. سرریزها قبلاً توسط یک جریان سنج مغناطیسی سه اینچی با دقت ± 0.2 تا ± 0.5 درصد (ساخت شرکت مگاب) واسنجی شده بودند. به منظور اندازه‌گیری عمق جریان در بالادست و پایین دست سازه، اندازه‌گیری هد آب روی سرریزها (به منظور تعیین بده عبوری از فلوم مورد نظر) و همچنین اندازه‌گیری پروفیل سطح آب جریان عبوری از سازه، از عمق‌سنج ساخت شرکت نیرپیک با دقت ± 0.1 میلیمتر استفاده شد. عمق‌سنجی را که به منظور اندازه‌گیری پروفیل سطح آب مورد استفاده قرار می‌گرفت، بر روی پایه‌ای که قابلیت حرکت در جهت طولی و عرضی داشت، نصب شد و سایر عمق‌سنج‌ها در محل‌های مشخصی نصب شدند. عمق آب بالادست در فاصله ۶۰ سانتیمتری از سازه نصب شده در کانال برداشت گردید. فاصله ۶۰ سانتیمتری به گونه‌ای انتخاب شده است که دارای فاصله کافی از مقطع تنگ‌شدگی باشد و اثرات پایین افتادن سطح آب ناشی از مقطع تنگ‌شدگی ناچیز باشد. در شکل (۲) نمایی از عمق‌سنج مورد استفاده در این تحقیق نشان داده شده است.

سازه‌های موجود در این تحقیق با استفاده از روابط حاکم و مفهوم سازه شکاف کنترل برای کانال تحت آزمایش طراحی شدند. در نهایت پنج مقطع مستطیلی و پنج مقطع دوزنقه‌ای انتخاب شدند که این مقاطع هر کدام با استفاده از دو نیم‌استوانه و دو نیم‌مخروط با قطرهای متفاوت به‌دست آمدند. به منظور

جدول ۱- مشخصات هندسی فلوم‌های مورد استفاده در کانال مستطیلی به عرض ۲۵ سانتی‌متر

سازه مخروطی شکل			سازه استوانه‌ای شکل		
شیب جانبی	عرض گلوگاه فلوم (سانتی‌متر)	قطر قاعده (سانتی‌متر)	شیب جانبی	عرض گلوگاه فلوم (سانتی‌متر)	قطر سازه (سانتی‌متر)
۰/۱۵۵	۱۲/۵	۱۲/۵	صفر	۲۲/۱	۲/۹
۰/۲۷۸	۱۵	۱۰	صفر	۱۵	۱۰
۰/۳۹۶	۱۷/۵	۷/۵	صفر	۱۰	۱۵
۰/۵۱۰	۲۰	۵	صفر	۷/۵	۱۷/۵
۰/۷۳۶	۲۵	صفر	صفر	۵	۲۰

مبانی نظری

به منظور توسعه روابط حاکم بر جریان عبوری از مقاطع تنگ‌شدگی در رژیم جریان آزاد، این سازه‌ها در دو حالت مقطع تنگ‌شدگی مستطیلی به وسیله دو نیم‌استوانه با شعاع‌های مختلف و مقطع

تنگ‌شدگی دوزنقه‌ای به وسیله دو نیم‌مخروط با شیب‌های جانبی (۱) قائم به S افقی) و شعاع‌های قاعده‌ی مختلف در نظر گرفته شده است. در تحقیق حاضر متغیرهای موثر بر جریان آزاد عبوری از مقاطع تنگ‌شدگی مطابق شکل (۴) و جدول (۳) می‌باشد.



(الف)



(ب)



(ج)

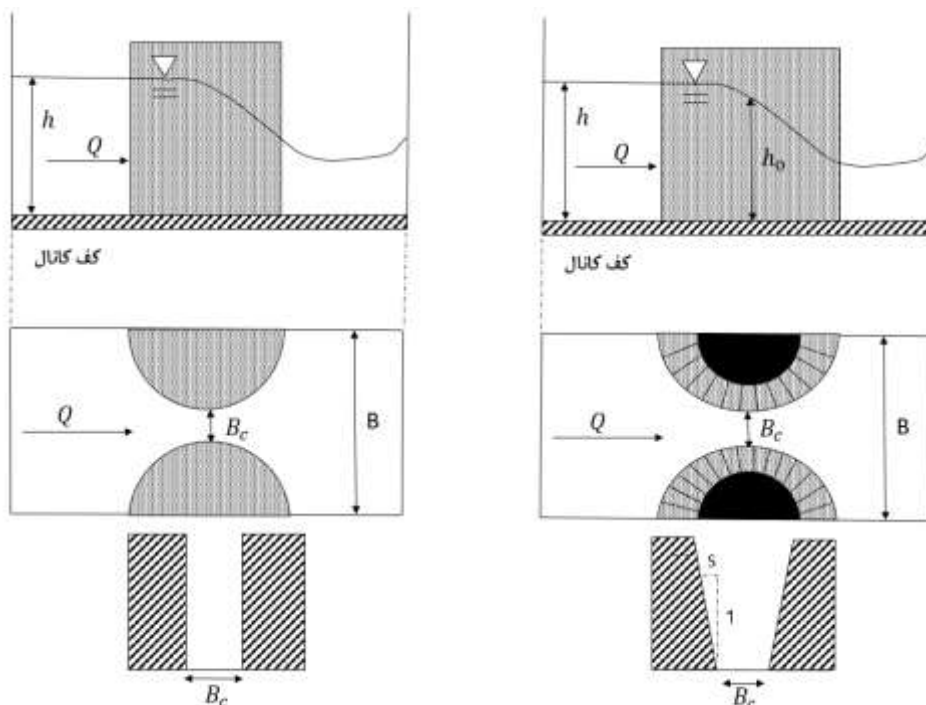
شکل ۳- (الف) نمایی از نیم استوانه‌ها و نیم مخروط‌های مورد استفاده در آزمایش‌ها (ب) نمایی از نیم‌استوانه‌ها برای ایجاد مقطع تنگ‌شدگی عرضی مستطیلی (ج) نمایی از نیم‌مخروط‌ها برای ایجاد مقطع تنگ‌شدگی عرضی دوزنقه‌ای

جدول ۲- دامنه‌ی تغییرات داده‌های هندسی و هیدرولیکی

دامنه تغییرات	خصوصیات هیدرولیکی و هندسی
۲۵	عرض کانال (سانتی‌متر)
۵-۲۲/۱	عرض گلوگاه فلوم (سانتی‌متر) (مقطع مستطیلی)
۰-۱۲/۵	عرض گلوگاه فلوم در کف (سانتی‌متر) (مقطع دوزنقه‌ای)
۳/۴-۲۸	عمق بالادست سازه (سانتی‌متر)
صفر	شیب جانبی (مقطع مستطیلی)
۰/۱۵۵-۰/۷۳۶	شیب جانبی (مقطع دوزنقه‌ای)
۰/۰۹-۰/۶۷	عدد فرود بالادست
۰/۸۱-۶۷/۸۸	دبی جریان (لیتر بر ثانیه)

جدول ۳- متغیرهای موثر بر جریان عبوری از مقطع تنگ‌شدگی

متغیر	نماد	بعد	واحد (متریک)
بده جریان	Q	L^3T^{-1}	m^3/s
عرض کانال	B	L	m
عرض تنگ‌شدگی	B_c	L	m
ارتفاع یا هد آب در بالادست	h	L	m
شتاب جاذبه	g	LT^{-2}	m/s^2
گرانروی دینامیکی سیال	μ	$ML^{-1}T^{-1}$	$N.s/m^2$
جرم مخصوص سیال	ρ	ML^{-3}	$N.s^2/m^4$
شیب جانبی	S	-	-



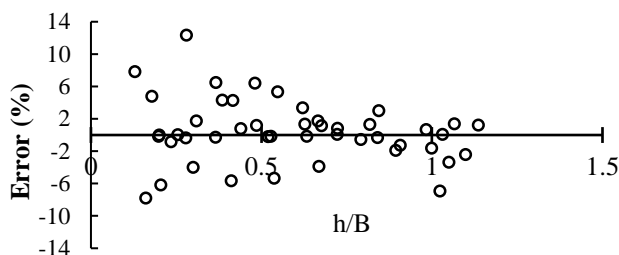
شکل ۴- نمایی از فلوم‌های با مقاطع تنگ‌شدگی مستطیلی (ایجاد شده توسط دو نیم‌استوانه) و دوزنقه‌ای (ایجاد شده توسط دو نیم‌مخروط) (مقطع طولی-پلان و دید از جلو)

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

که در آن B , K_c , B_c و h به ترتیب برابر عرض کانال

با توجه به روش خود تشابهی ناقص، (Ferro 2002) رابطه ای برای دبی-اشل به منظور تخمین دبی جریان در شرایط جریان آزاد پیشنهاد کرد. رابطه پیشنهادی (Ferro 2002) برای مقطع تنگ‌شدگی مستطیلی به صورت رابطه زیر است:

(۸)، با استفاده از تعداد ۴۶ داده آزمایشگاهی بررسی شده است. این رابطه دبی عبوری از مقطع تنگ‌شدگی مستطیلی را در شرایط جریان آزاد با متوسط خطای ۲/۷۲ درصد تخمین خواهد زد. بیشینه خطای این رابطه نیز برابر با ۱۲/۳۲ درصد می‌باشد. همچنین با توجه به توزیع خطای نشان داده شده در شکل (۵)، ۷۸ درصد تخمین‌ها دارای خطای کمتر از ۵ درصد می‌باشند.



شکل ۵- توزیع خطای تخمین دبی عبوری از مقطع تنگ‌شدگی مستطیلی با استفاده از رابطه پیشنهادی (۸)

همچنین با استفاده از تحلیل ابعادی رابطه‌ای مناسب برای دبی عبوری از مقطع تنگ‌شدگی دوزنقه‌ای شکل که در طول کانال نصب شده است، ارائه می‌شود. روابط (۹) و (۱۰) روابط پیشنهادی در این تحقیق برای تخمین بده سازه می‌باشند.

$$Q = (a r_t^b) \left(\frac{h}{B}\right)^{n r_t^c} \sqrt{g B^5} \quad ; \quad r_t = \frac{B_c h + s h^2}{B h} \quad (\text{رابطه ۹})$$

$$Q = (a r_t^b) \left(\frac{h}{B}\right)^{n r_t^c} \sqrt{g B^5} \quad ; \quad r_t = \frac{B_c h_0 + s h_0^2}{B h_0} \quad (\text{رابطه ۱۰})$$

در روابط (۹) و (۱۰)، Q ، بده جریان بر حسب مترمکعب بر ثانیه، h_0 عمق شاخص در مقطع تنگ‌شدگی می‌باشد که از رابطه برازشی به دست خواهد آمد، h ارتفاع آب بالادست بر حسب متر، g شتاب جاذبه زمین بر حسب متر بر مجذور ثانیه، B عرض کف کانال بر حسب متر، B_c عرض کف مقطع تنگ‌شدگی بر حسب متر و s شیب جانبی سازه می‌باشد. در این روابط، r_t برابر نسبت سطح مقطع تنگ‌شدگی در مقطع دوزنقه‌ای به سطح مقطع کانال بالادست می‌باشد. معادلات پیشنهاد شده (۹) و (۱۰) دارای شکلی یکسان می‌باشند و تفاوت آنها در تعریف r_t می‌باشد که به منظور دستیابی به بهترین نسبت سطح مقطع تنگ‌شدگی به سطح مقطع کانال ارائه گردیده اند. همچنین ضرایب a ، b ، c و n ضرایب ثابتی هستند که از طریق داده های آزمایشگاهی قابل محاسبه می‌باشند. معادلات (۱۱) و (۱۲) برای سازه‌های مخروطی شکل استفاده شده در تحقیق حاضر با عرض تنگ‌شدگی کف، ۱۲/۵، ۱۰، ۷/۵ و ۵ سانتیمتر مورد بررسی قرار گرفتند. بدین ترتیب در

مستطیلی، عمق بحرانی در مقطع تنگ‌شدگی، عرض مقطع تنگ‌شدگی و عمق آب در بالادست سازه است. ضرایب واسنجی α و n با استفاده از داده‌های آزمایشگاهی قابل محاسبه می‌باشند. رابطه فررو یک رابطه ساده برای تخمین دبی بر پایه عمق بحرانی می‌باشد. در این رابطه، تخمین عمق بحرانی با استفاده از مشخصات جریان مانند عمق بالادست و مشخصات هندسی سازه صورت گرفته و نهایتاً رابطه‌ای جهت تخمین دبی جریان ارائه شده است.

در این تحقیق با استفاده از تحلیل ابعادی به منظور ارائه رابطه‌ای مناسب برای دبی عبوری از مقطع تنگ‌شدگی مستطیلی، معادلاتی حاصل شدند که این معادلات، با توجه به لزوم متغیر گرفتن توان‌ها و با استفاده از نسبت‌های بی‌بعد با توان‌های متفاوت بسط داده شده‌اند و دارای درصد خطای مناسب و همچنین ساختاری ساده می‌باشند. روابط پیشنهادی (۲)، (۳) و (۴) به صورت زیر می‌باشند:

$$Q = a \left(\frac{h}{B}\right)^b (r^c) \sqrt{g B^5} \quad (\text{رابطه ۲})$$

$$Q = (a r^b) \left(\frac{h}{B_c}\right)^{n r^c} \sqrt{g B_c^5} \quad (\text{رابطه ۳})$$

$$Q = (a r^b) \left(\frac{h}{B}\right)^{n r^c} \sqrt{g B^5} \quad (\text{رابطه ۴})$$

که در این روابط، Q ، بده جریان بر حسب مترمکعب بر ثانیه، h ارتفاع آب بالادست بر حسب متر، g شتاب جاذبه زمین بر حسب متر بر مجذور ثانیه، B ، عرض کف کانال بر حسب متر و B_c ، عرض کف مقطع تنگ‌شدگی بر حسب متر می‌باشد. همچنین ضرایب a ، b ، c و n ضرایب ثابتی هستند که از طریق داده‌های آزمایشگاهی قابل محاسبه می‌باشند. همچنین مقدار r مطابق رابطه (۵) برابر با نسبت عرض کف مقطع تنگ‌شدگی به عرض کف کانال (ضریب انقباض) است.

$$r = \frac{B_c}{B} \quad (\text{رابطه ۵})$$

ضرایب ثابت معادلات (۲) تا (۴) با استفاده از ۴۶ عدد داده آزمایشگاهی مربوط به مقطع تنگ‌شدگی مستطیلی حاصل شدند و در نهایت روابط تخمین دبی عبوری از مقطع تنگ‌شدگی مستطیلی به صورت زیر خواهند بود:

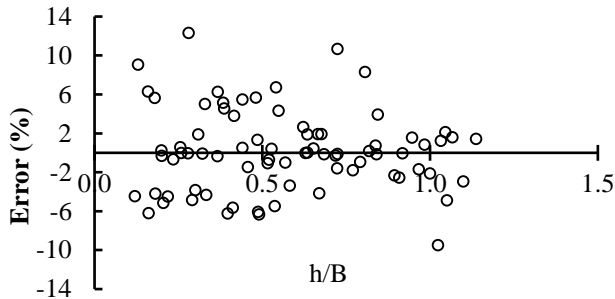
$$Q = 0.843 \left(\frac{h}{B}\right)^{1.77} (r^{1.04}) \sqrt{g B^5} \quad (\text{رابطه ۶})$$

$$Q = (0.85 r^{0.341}) \left(\frac{h}{B_c}\right)^{(1.72 r^{0.041})} \sqrt{g B_c^5} \quad (\text{رابطه ۷})$$

$$Q = (0.804 r^{0.977}) \left(\frac{h}{B}\right)^{(1.7 r^{0.0593})} \sqrt{g B^5} \quad (\text{رابطه ۸})$$

از روابط فوق رابطه (۸) بهترین دقت را دارد. دقت رابطه

درصد تخمین خواهد زد و خطای حداکثر نیز برابر ۱۲/۳۱ درصد می‌باشد. همانطور که در شکل (۷) ملاحظه می‌شود ۷۴ درصد داده‌ها دارای خطای کمتر از ۵ درصد می‌باشند.



شکل ۷- توزیع خطای تخمین دبی عبوری از مقطع تنگ‌شدگی مستطیلی و دوزنقه‌ای با استفاده از رابطه پیشنهادی (۱۴)

در توسعه روابط مربوط به مقطع تنگ‌شدگی دوزنقه‌ای و همچنین رابطه (۱۴) که با استفاده از داده‌های آزمایشگاهی حاصل گردید، از داده آزمایشگاهی مربوط به عرض تنگ‌شدگی برابر صفر بدلیل رفتار متفاوت در روابط مربوطه استفاده نشد. همچنین در روابط برازشی فوق از اعداد بی‌بعد جهت کنترل درستی روابط و ضرائب حاصل شده استفاده گردید. به عنوان مثال، یکی از کمیت‌های بی‌بعد که به منظور کنترل درستی معادلات مربوط به مقطع تنگ‌شدگی دوزنقه‌ای استفاده گردید، عبارت h_0/h بود. این ترم در تمامی معادلات ذکر شده دارای مقداری کمتر از یک می‌باشد اما زمانیکه از داده‌های آزمایشگاهی مربوط به مقطع مثلثی ($B_c=0$) استفاده گردید، این کمیت بی‌بعد دارای مقداری بیشتر از یک شد که نشان دهنده عدم امکان کاربرد معادله برای عرض صفر می‌باشد.

نتایج و بحث

در تحقیق حاضر به منظور تحلیل مقطع تنگ‌شدگی مستطیلی از ۴۶ داده آزمایشگاهی و در تحلیل مقطع تنگ‌شدگی دوزنقه‌ای از ۳۶ داده آزمایشگاهی تحت شرایط جریان آزاد استفاده شده است. روابط مورد استفاده در این تحقیق در جداول (۴ و ۶) به ترتیب برای مقطع تنگ‌شدگی مستطیلی و مقطع تنگ‌شدگی دوزنقه‌ای نشان داده شده است. در نهایت با استفاده از داده‌های آزمایشگاهی برای هر دو مقطع مستطیلی و دوزنقه‌ای رابطه‌ای کلی با خطای متوسط ۳/۰۹ درصد ارائه گردید. نتایج حاصل از روابط ارائه شده به منظور تعیین دبی از سازه‌های مورد نظر به شرح زیر می‌باشند.

مقطع تنگ‌شدگی مستطیلی

در جدول (۴) میزان متوسط و بیشینه خطای هرکدام از روابط

توسعه این روابط و به‌دست آوردن ضرائب برازشی، به دلیل میزان خطای بالا و رفتاری متفاوت از داده‌های مربوط به سازه با عرض تنگ‌شدگی صفر استفاده نگردید. ضرائب ثابت معادلات (۱۱) و (۱۲) با استفاده ۳۱ عدد داده آزمایشگاهی مربوط به مقطع تنگ‌شدگی دوزنقه‌ای حاصل شدند و در نهایت روابط تخمین دبی عبوری از مقطع تنگ‌شدگی دوزنقه‌ای به صورت زیر خواهند بود:

$$Q = (1.24 r_t^{2.27}) \left(\frac{h}{B}\right)^{(1.79 r_t^{0.205})} \sqrt{gB^5} \quad \text{(رابطه ۱۱)}$$

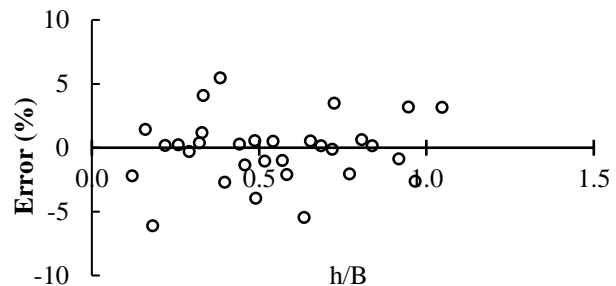
$$Q = (5.26 r_t^{2.25}) \left(\frac{h}{B}\right)^{(2.36 r_t^{0.251})} \sqrt{gB^5} \quad \text{(رابطه ۱۲)}$$

در رابطه (۱۲) عمق شاخص برای محاسبه r_t به صورت زیر

تعریف می‌شود:

$$h_0 = B_c (1 + s^{1.8})^{4.56} \left(\frac{h}{B}\right) \quad \text{(رابطه ۱۳)}$$

از میان روابط (۱۱) و (۱۲)، رابطه (۱۲) دقت بیشتری دارد. این رابطه دبی را با متوسط و بیشینه خطای ۱/۸۵ و ۶/۱ درصد تخمین خواهد زد. شکل (۶) توزیع خطای تخمین دبی با استفاده از رابطه (۱۲) را نشان می‌دهد. همانطور که ملاحظه می‌شود ۹۰ درصد داده‌های آزمایشگاهی دارای خطایی کمتر از ۵ درصد می‌باشند.



شکل ۶- توزیع خطای تخمین دبی عبوری از مقطع تنگ‌شدگی دوزنقه‌ای با استفاده از رابطه (۱۲)

معادله (۱۴) به منظور ارائه یک رابطه عمومی برای دبی عبوری از سازه با مقطع تنگ‌شدگی مستطیلی و دوزنقه‌ای ارائه شده است. ضرائب برازشی این رابطه با استفاده از داده‌های آزمایشگاهی مربوط به سازه استوانه‌ای شکل و مخروطی شکل به‌دست آمده‌اند. تعداد کل داده‌های آزمایشگاهی مورد استفاده برای واسنجی این رابطه ۷۷ عدد می‌باشد.

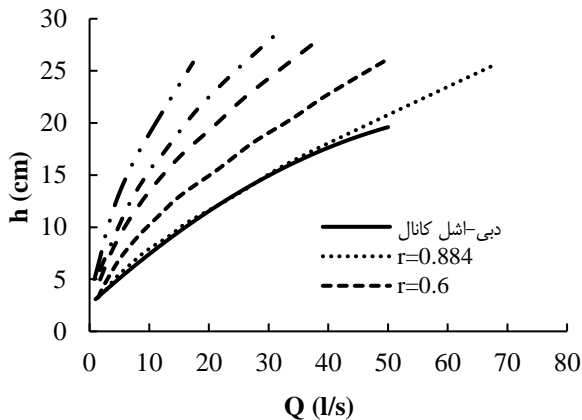
$$Q = (0.825 r_*^*) \left(\frac{h}{B}\right)^{(1.723 r_*^{0.048})} \sqrt{gB^5} \quad \text{(رابطه ۱۴)}$$

در این رابطه عمومی r_*^* به شکل زیر تعریف شده است:

$$r_*^* = \frac{A_0}{A} = \frac{B_c h_0 + s h_0^2}{B h_0} \quad \text{(رابطه ۱۵)}$$

$$h_0 = 0.61 B_c (1 + s)^{4.53} \left(\frac{h}{B}\right)^{2.11} \quad \text{(رابطه ۱۶)}$$

توزیع خطای رابطه (۱۴) در تخمین دبی جریان عبوری مطابق شکل (۷) است. رابطه (۱۴)، دبی را با متوسط خطای ۳/۰۹



شکل ۹- منحنی‌های دبی-اشل کانال و دبی-اشل سازه‌های استوانه‌ای شکل

پس‌زدگی آب در اثر احداث سازه‌های اندازه‌گیری با اهمیت بوده و لازم است در حد امکان کم باشد. شکل (۹) منحنی دبی اشل کانال بدون وجود سازه و همچنین منحنی دبی اشل کانال با وجود سازه را نشان می‌دهد. در این شکل می‌توان میزان تاثیر هر سازه استوانه‌ای شکل را بر روی ارتفاع آب بالادست مشاهده کرد. همانطور که ملاحظه می‌شود با افزایش تنگ‌شدگی میزان پس‌زدگی آب در بالادست سازه افزایش می‌یابد.

به منظور تعیین بیشترین و کمترین درصد پس‌زدگی در سازه‌های با مقطع مستطیلی، از پارامتر h/B استفاده شد. که در این رابطه h ، ارتفاع آب بالادست بر حسب متر و B ، عرض کف کانال بر حسب متر می‌باشد. درصد پس‌زدگی از طریق رابطه (۱۷) محاسبه شده است:

(رابطه ۱۷)

$$\text{پس‌زدگی (\%)} = \frac{\text{ارتفاع آب بالادست (بدون وجود سازه)} - \text{ارتفاع آب بالادست (با وجود سازه)}}{\text{ارتفاع آب بالادست (بدون وجود سازه)}}$$

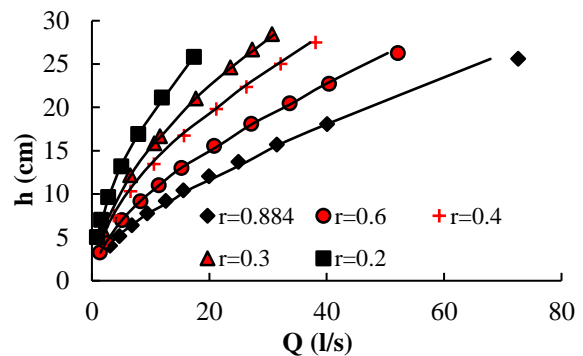
بدین ترتیب که حداکثر درصد پس‌زدگی به ازای $0 < h/B < 1$ برای نسبت انقباض‌های $0/۲$ ، $0/۳$ ، $0/۴$ ، $0/۶$ ، $0/۸۸$ به ترتیب برابر $۷/۹۷\%$ ، $۳۸/۹\%$ ، $۸۲/۱۳\%$ ، $۱۰۸/۱۶\%$ و $۱۶۱/۲۸\%$ حاصل شدند. در سازه با عرض تنگ‌شدگی ۵ سانتیمتر ($r=0/۲$) بیشترین پس‌زدگی وجود خواهد داشت و به ازای عرض تنگ‌شدگی $۲۲/۱$ سانتیمتر ($r=0/۸۸۴$) کمترین میزان پس‌زدگی را خواهیم داشت. همچنین بر اساس جدول (۵) مشاهده می‌شود که به ازای $r=0/۸۸۴$ ، رابطه (۸) دارای بیشترین خطای متوسط می‌باشد. بنابراین باید تعادلی مناسب بین خطای روابط پیشنهادی برای تخمین بده و میزان پس‌زدگی برقرار گردد. به عبارت دیگر با کاهش میزان پس‌زدگی که مطلوب می‌باشد خطای افزایش می‌یابد که نامطلوب می‌باشد. در تحقیق حاضر معادله تخمین دبی عبوری از سازه در بازه $0/۲ \leq r \leq 0/۶$ که دارای خطای متوسط کمتر از ۳ درصد می‌باشد و میزان پس‌زدگی آن نیز کم است، پیشنهاد می‌گردد.

پیشنهادی (۶)، (۷) و (۸) ارائه گردیده است. از شکل (۸) و جدول (۵) نیز مشخص است، رابطه (۸) برای سازه‌های استوانه‌ای با r برابر با $0/۳$ ، $0/۴$ و $0/۶$ دارای خطای کمتر از ۳ درصد می‌باشد.

جدول ۴- روابط ارائه شده برای تخمین بده مقطع تنگ‌شدگی مستطیلی

روش تحلیل	شماره رابطه	متوسط خطا (درصد)	بیشینه خطا (درصد)
	(۸)	۲/۷۲	۱۲/۳۲
تحلیل ابعادی	(۷)	۲/۷۲	۱۱/۲۴
	(۶)	۳/۵۱	۱۱/۴۲

با توجه به مبنای سازه‌های اندازه‌گیری به‌وسیله تنگ‌شدگی عرضی، انتظار می‌رود با کاهش نسبت عرض تنگ‌شدگی مقطع به عرض تنگ‌شدگی کانال، میزان خطای اندازه‌گیری سازه نیز کاهش یابد. همانطور که در جدول (۵) نشان داده شده است برای $r=0/۳$ ، میزان خطای رابطه (۸) حداقل است.



شکل ۸- مقایسه دبی-اشل آزمایشگاهی مقاطع تنگ‌شدگی مستطیلی (منحنی با خطوط پیوسته) و رابطه (۸) برای تخمین بده (نقاط گسسته)

جدول ۵- میزان درصد خطای رابطه (۸) برای هر سازه استوانه‌ای شکل

r	متوسط خطا (درصد)	بیشینه خطا (درصد)
0/۸۸۴	۴/۲	۷/۸۱
0/۶	۲/۲	۷/۸
0/۴	۲/۸۵	۵/۶۶
0/۳	0/۹	۱/۷
0/۲	۳	۱۲/۳

مطابق اطلاعات ارائه شده در جدول (۵)، معادله تخمین دبی عبوری از سازه به ازای بازه $0/۲ \leq r \leq 0/۶$ دارای خطای متوسط کمی می‌باشد اما به ازای تنگ‌شدگی بیشتر، به عنوان مثال، $r=0/۸۸۴$ رابطه پیشنهادی برای تخمین دبی دارای متوسط خطای بیشتری می‌باشد.

شده‌اند.

در جدول (۷) میزان خطای متوسط و بیشینه رابطه (۱۲) برای هر سازه مخروطی شکل به صورت جداگانه ارائه شده است. در این جدول، η برابر با نسبت عرض تنگ‌شدگی مقطع دوزنقه‌ای در گلوگاه به عرض کف کانال بالادست می‌باشد. همانطور که از جدول (۷) مشاهده می‌شود، رابطه (۱۲) دارای خطای متوسط و خطای حداکثر قابل قبولی می‌باشد و همچنین با کاهش η ، خطای رابطه نیز کاهش می‌یابد. در جدول فوق به خوبی تاثیر شیب جانبی و عرض مقطع تنگ‌شدگی مشاهده می‌گردد.

مقطع تنگ‌شدگی دوزنقه‌ای

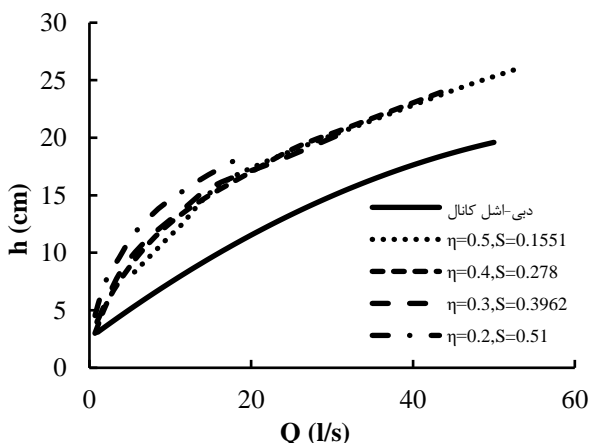
جهت انتخاب و ارائه رابطه‌ی مناسب برای تعیین دبی عبوری از مقطع تنگ‌شدگی دوزنقه‌ای، از روش تحلیل ابعادی استفاده شد. در جدول (۶) مشخصات روابط پیشنهادی حاصل شده از طریق این روش، ارائه گردیده است و رابطه (۱۲) دارای کمترین خطای متوسط و خطای بیشینه می‌باشد. روابط جدول (۶) با استفاده از ۷۷ سری داده آزمایشگاهی و با کمینه کردن خطای بین بده محاسباتی و مشاهداتی توسط صفحه گسترده اکسل حاصل

جدول ۶- روابط ارائه شده برای تخمین بدهی مقطع تنگ‌شدگی دوزنقه‌ای

رابطه دبی-اشل پیشنهادی در این تحقیق	متوسط خطا (درصد)	بیشینه خطا (درصد)
$Q = (5.26 r_t^{2.25}) \left(\frac{h}{B}\right)^{(2.36 r_t^{0.251})} \sqrt{gB^5}$ $r_t = \frac{B_c^2(1+s^{1.8})^{4.56} \left(\frac{h}{B}\right) + s(B_c(1+s^{1.8})^{4.56} \left(\frac{h}{B}\right))^2}{Bh}$	۱/۸۵	۶/۱
$Q = (1.24 r_t^{2.27}) \left(\frac{h}{B}\right)^{(1.79 r_t^{0.205})} \sqrt{gB^5}$ $r_t = \frac{A_0}{A} = \frac{B_c h + s h^2}{Bh}$	۴/۲۵	۱۰/۹۶

جدول ۷- خطای رابطه (۱۲) برای سازه‌های مخروطی شکل مختلف

η	S	متوسط خطا (درصد)	بیشینه خطا (درصد)
۰/۵	۰/۱۵۵۱	۲/۷۴	۴/۰۹
۰/۴	۰/۲۷۸	۱/۵۷	۳/۹۵
۰/۳	۰/۳۹۶۲	۱/۸۵	۳/۴۹
۰/۲	۰/۵۱	۱/۷۹	۶/۱

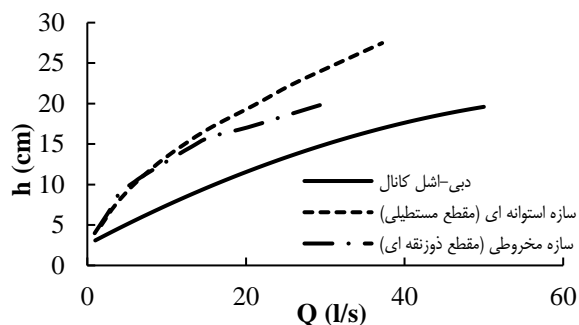


شکل ۱۰- منحنی‌های دبی-اشل کانال و دبی-اشل سازه‌های مخروطی شکل

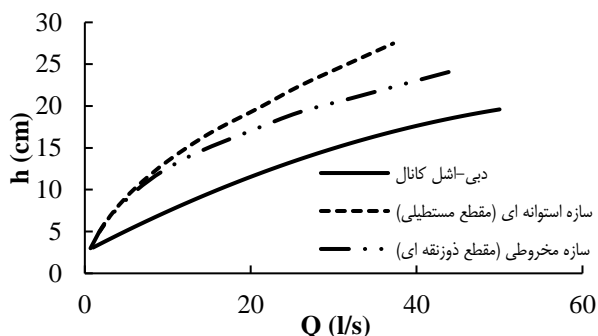
در جدول (۸) با توجه به رابطه (۱۴) میزان درصد خطای متوسط و درصد خطای حداکثر برای مجموعه کل سازه‌ها یعنی سازه‌های استوانه‌ای شکل و مخروطی شکل ارائه شده است.

شکل (۱۰) منحنی دبی اشل کانال بدون وجود سازه و همچنین منحنی دبی اشل کانال با وجود سازه را نشان می‌دهد. در این شکل می‌توان میزان تاثیر هر سازه مخروطی شکل را بر روی ارتفاع آب بالادست مشاهده کرد. از این شکل ملاحظه می‌شود که شیب جانبی سازه و همچنین عرض مقطع تنگ‌شدگی بر روی عمق آب بالادست و پس‌زدگی تاثیر مستقیم دارد.

به منظور تعیین بیشترین و کمترین درصد پس‌زدگی در سازه‌های با مقطع دوزنقه‌ای نیز، از پارامتر h/B استفاده شد. که در این رابطه h ارتفاع آب بالادست بر حسب متر و B عرض کف کانال بر حسب متر می‌باشد. درصد پس‌زدگی از طریق رابطه (۱۷) محاسبه شده است. بدین ترتیب که حداکثر درصد پس‌زدگی به ازای $0 < h/B < 1$ برای η های ۰/۵، ۰/۴، ۰/۳ و ۰/۲ به ترتیب برابر ۵۵/۴۹٪، ۷۵/۱۳٪، ۸۴/۱۶٪ و ۱۱۹/۵۹٪ حاصل شدند.



شکل ۱۲- مقایسه میزان تاثیر سازه استوانه‌ای و مخروطی شکل بر ارتفاع آب بالادست به ازای عرض تنگ‌شدگی ۷/۵ سانتیمتر



شکل ۱۳. مقایسه میزان تاثیر سازه استوانه‌ای و مخروطی شکل بر ارتفاع آب بالادست به ازای عرض تنگ‌شدگی ۱۰ سانتیمتر

مقایسه با سایر تحقیقات

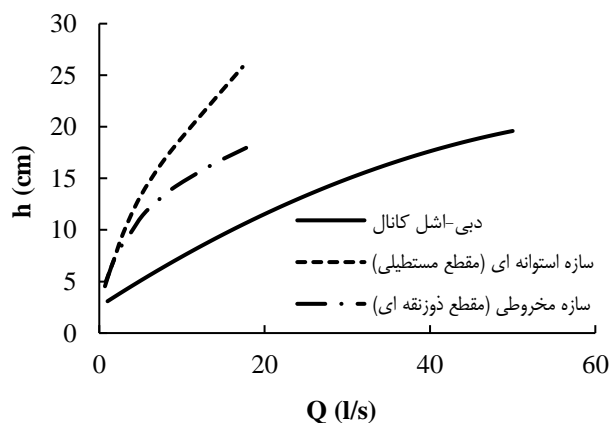
مقطع تنگ‌شدگی مستطیلی

در این بخش، پژوهش حاضر با تحقیقات انجام شده در مورد سازه اندازه‌گیری جریان به وسیله نیم استوانه‌ها مقایسه شده است. بدین منظور از داده‌های آزمایشگاهی این تحقیق و همچنین از داده‌های آزمایشگاهی (Baiamonte and Ferro (2007) در روابط ارائه شده استفاده شده است. از اولین تحقیقات انجام شده بر روی این نوع سازه‌ها، تحقیق (Samani and Magallanez (2000 می‌باشد. در این پژوهش به وسیله تحلیل ابعادی، رابطه‌ای بر اساس عمق آب بالادست ارائه گردیده است. همچنین در تحقیقی دیگری توسط (Samani (2017 نیز از این روش استفاده شده است. عمق آب بالادست در این رابطه با استفاده از یک عمق سنج که روی سازه نصب شده است برداشت شده است و با توجه به نوسانات سطح آب در نزدیکی مقطع تنگ‌شدگی، این عمق کنار سازه با عمق بالادست سازه در فاصله ۶۰ سانتیمتر تفاوت خواهد داشت و به همین دلیل نمی‌توان از رابطه ارائه شده توسط (Samani and Magallanez (2000 و همچنین رابطه ارائه شده در تحقیق (Samani (2017 جهت مقایسه استفاده نمود. از دیگر تحقیقات انجام شده در این زمینه می‌توان به تحقیق آزمایشگاهی (Baiamonte and Ferro (2007 اشاره کرد که در این پژوهش با استفاده از تحلیل ابعادی و روش خودتشابهی ناقص، رابطه‌ای ارائه

جدول ۸- خطای رابطه (۱۴) برای کل سازه‌های استوانه و مخروطی شکل

r یا η	S	متوسط خطا (درصد)	بیشینه خطا (درصد)
$\eta = 0.5$	0.1551	3/51	6/08
$\eta = 0.4$	0.228	3/1	6/33
$\eta = 0.3$	0.3962	6/34	10/66
$\eta = 0.2$	0.51	1/52	5/16
$r = 0.884$	.	4/08	9/49
$r = 0.6$	.	2/42	9/04
$r = 0.4$	.	3/07	5/64
$r = 0.3$	.	0/99	1/58
$r = 0.2$	.	3/52	12/3

تعدادی از سازه‌های استوانه ای شکل و مخروطی شکل آزمایش شده در این تحقیق که دارای عرض تنگ‌شدگی برابری می‌باشند انتخاب و در ادامه به مقایسه میزان تاثیر سازه‌ها روی عمق آب بالادست و همچنین مقایسه میزان خطای متوسط و بیشینه با استفاده از رابطه (۱۲) پرداخته شده است. شکل‌های (۱۱) تا (۱۳) مقایسه میزان پس‌زدگی در سازه‌های استوانه‌ای و مخروطی شکل را به ازای عرض‌های تنگ‌شدگی ۵، ۷/۵ و ۱۰ سانتیمتر نشان می‌دهد. از مقایسه منحنی‌های نشان داده شده در شکل‌های (۱۱)، (۱۲) و (۱۳) مربوط به سازه‌های استوانه‌ای و مخروطی شکل می‌توان نتیجه گرفت که سازه استوانه‌ای شکل تاثیر بیشتری روی ارتفاع آب بالادست خواهد داشت و به عبارتی دارای پس‌زدگی بیشتری می‌باشد. از این منحنی‌ها نیز تاثیر شیب جانبی بر ارتفاع آب بالادست و کنترل پس‌زدگی به خوبی قابل مشاهده است. همانگونه که در شکل‌ها نشان داده شده است میزان پس‌زدگی ناشی از مقطع تنگ‌شدگی دوزنقه‌ای به مراتب کمتر از پس‌زدگی مقطع تنگ‌شدگی مستطیلی می‌باشد.



شکل ۱۱- مقایسه میزان تاثیر سازه استوانه‌ای و مخروطی شکل بر ارتفاع آب بالادست به ازای عرض تنگ‌شدگی ۵ سانتیمتر

که در رابطه فوق، a ، b ، c و ضرایب برازشی هستند که با استفاده از داده‌های آزمایشگاهی (Baiamonte and Ferro (2007) در فلوم مستطیلی با عرض برابر ۳۰ سانتیمتر مشخص شده‌اند. h_* و ضرایب به‌دست آمده در این رابطه به‌صورت $c=0.76$ و $b=0.214$ و $a=0.826$ و $h_*=h/B_c$ هستند.

همچنین به منظور واسنجی رابطه (۱۹)، از داده‌های آزمایشگاهی این تحقیق و همچنین داده‌های آزمایشگاهی (Baiamonte and Ferro (2007) و جمعا به تعداد ۱۱۹ داده‌ی آزمایشگاهی استفاده گردید و بدین ترتیب ضرایب رابطه فوق به صورت $a=0.8$ ، $b=0.24$ ، $c=0.68$ حاصل گردیدند.

در جدول (۹) مقادیر هیدرولیکی و هندسی داده‌های تحقیق حاضر و داده‌های آزمایشگاهی (Baiamonte and Ferro (2007) با یکدیگر مقایسه شده‌اند. در این جدول از پارامتر $\lambda=B_{min}/B$ استفاده شده است که در آن B_{min} حداقل عرض تنگ-شدگی و B عرض کانال می‌باشد و F_r عدد فرود بالادست می‌باشد. جدول (۱۰) میزان خطای متوسط و خطای حداکثر روابط (۱۸) و (۱۹) را با استفاده از داده‌های آزمایشگاهی این تحقیق و همچنین کل داده‌های تحقیق حاضر و تحقیق (Baiamonte and Ferro (2007) (جمعا به تعداد ۱۱۹ داده‌ی آزمایشگاهی) را نشان می‌دهد.

شده است. در ادامه این تحقیق، (Carollo et al. (2016) دیگری تحت عنوان "رابطه جدید دبی-اشل برای فلوم SMBF" ارائه کردند که رابطه نهایی پیشنهاد شده در این پژوهش با استفاده از داده‌های آزمایشگاهی (Baiamonte and Ferro (2007) به‌صورت زیر می‌باشد:

(رابطه ۱۸)

$$Q = \frac{(B_c + \beta h) g^{1/2} h^{3/2}}{\left[\frac{1}{2} + \alpha \cos \left\{ \frac{1}{3} \arccos \left[1 - 2 \frac{(B_c + \beta h)^2}{B^2 \alpha^3} \right] \right\} \right]^{3/2}}$$

در این رابطه Q ، دبی جریان، B ، عرض کانال، B_c ، عرض مقطع تنگ‌شدگی، h ، عمق آب بالادست، α و β ضرایب برازشی می‌باشند که با استفاده از داده‌های آزمایشگاهی به ترتیب برابر با ۱/۰۸۵ و ۰/۲۴۳ حاصل شده است. در ادامه نیز این رابطه با استفاده از داده‌های آزمایشگاهی این تحقیق و همچنین داده‌های آزمایشگاهی (Baiamonte and Ferro (2007) و جمعاً به تعداد ۱۱۹ داده‌ی آزمایشگاهی واسنجی گردید که ضرایب α و β به ترتیب برابر با ۱/۰۸۲ و ۰/۲۲۵ خواهند بود. (Vatankhah (2017) نیز با ارائه یک بحث در مورد تحقیق فوق، معادله (۱۹) را به منظور اندازه‌گیری دبی جریان پیشنهاد کرد.

$$Q = \frac{\alpha B_c \sqrt{gh^3(1+\beta h^2)}}{\left\{ \frac{1}{2} + \cos \left[\frac{1}{3} \arccos(1-2r^2) \right] \right\}^{3/2}} \quad \text{(رابطه ۱۹)}$$

جدول ۹- مقایسه مقادیر هیدرولیکی و هندسی داده‌های آزمایشگاهی

مشخصات داده‌ها	دبی آزمایشگاهی (لیتر بر ثانیه)	$r=B_c/B$	B_{min}/B	F_r
داده‌های آزمایشگاهی تحقیق حاضر	۰/۸۱-۶۷/۸۸	۰/۲-۰/۸۸۴	۰/۱۶-۰/۹	۰/۰۹-۰/۶۷
داده‌های آزمایشگاهی بیامونته و فررو (۲۰۰۷)	۱/۵۵-۵/۲۷	۰/۱۷-۰/۸۱	۰/۲-۰/۷۷	۰/۱۱-۰/۵

جدول ۱۰- میزان خطای روابط مورد مقایسه با استفاده از داده‌های موجود

ردیف	داده‌های تحقیق حاضر (۳۶ داده آزمایشگاهی)	داده‌های بیامونته و فررو (۸۳ داده آزمایشگاهی)	هر دو سری داده‌های آزمایشگاهی (۱۱۹ داده آزمایشگاهی)
میزان خطا (درصد)	متوسط خطا (درصد)	بیشینه خطا (درصد)	متوسط خطا (درصد)
رابطه (۱۸)	۵/۴۲	۶/۱۹	۲/۹۱
$0.243 = \beta = 1.085, \alpha$			
رابطه (۱۸) واسنجی مجدد	۴/۶۶	۶/۵۰	۲/۶۶
$0.225 = \beta = 1.082, \alpha$			
رابطه (۱۹)	۴/۳۶	۷/۶۱	۲/۳۹
$a=0.826, b=0.214, c=0.76$			
رابطه (۱۹) واسنجی مجدد	۴/۱۲	۶/۳۵	۲/۳۳
$a=0.8, b=0.24, c=0.68$			

نتیجه‌گیری

در این پژوهش با استفاده از سازه‌هایی به شکل نیم‌استوانه و نیم-مخروط و قرار دادن آنها در طول کانال، مقاطع تنگ‌شدگی مستطیلی و دوزنقه‌ای به منظور اندازه‌گیری جریان ایجاد شد. برای تعیین رابطه‌ای مناسب برای سازه‌های مورد نظر در شرایط جریان آزاد، مقاطع تنگ‌شدگی دوزنقه‌ای به صورت مجزا مورد بررسی قرار گرفتند. معادلات از طریق تحلیل ابعادی برای ۴۶ داده آزمایشگاهی مقطع تنگ‌شدگی مستطیلی و ۳۷ داده آزمایشگاهی مقطع تنگ‌شدگی دوزنقه‌ای حاصل گردیدند. رابطه (۸) برای مقطع تنگ‌شدگی مستطیلی با خطای متوسط ۲/۷۲٪ دارای حداقل خطای متوسط می‌باشد و همچنین رابطه (۱۲) به منظور تخمین دبی در مقطع تنگ‌شدگی دوزنقه‌ای دارای خطای متوسط ۱/۸۵٪ می‌باشد. به منظور مقایسه پژوهش حاضر با سایر تحقیقات در مورد سازه اندازه‌گیری جریان به وسیله نیم‌استوانه‌ها از داده‌های آزمایشگاهی این تحقیق و همچنین از داده‌های آزمایشگاهی (Baiamonte and Ferro (2007) و جمعا به تعداد ۱۱۹ داده‌ی آزمایشگاهی در روابط ارائه شده استفاده شده است و در ادامه با واسنجی معادله‌ی به‌دست آمده از طریق رابطه انرژی به منظور تخمین دبی در تحقیق (Vatankhah (2017) با ضرایب متفاوت و خطای متوسط ۲/۳۳ درصد حاصل گردید که دارای مقدار خطای کمتری نسبت به دیگر روابط می‌باشد.

همچنین با مقایسه تحقیق حاضر با پژوهش Kapoor et al. (2019) به منظور تخمین دبی جریان به وسیله نیم‌مخروط‌ها این نتیجه حاصل گردید که رابطه (۱۲) ارائه شده در این تحقیق با متوسط خطای ۱/۸۵ درصد و حداکثر خطای ۶/۱ دبی عبوری از فلوم با مقطع تنگ‌شدگی دوزنقه‌ای را تخمین خواهد زد که دارای خطاهای کمتری نسبت به تحقیق (Kapoor et al. (2019) می‌باشد که نشان می‌دهد معادله حاصل شده توسط تحلیل ابعادی و تحلیل‌های رگرسیونی از رابطه به‌دست آمده توسط معادله انرژی دقیق‌تر خواهد بود. بر اساس نتایج آزمایشگاهی و تحلیلی تحقیق حاضر، کاربرد سازه حاضر به عنوان یک ابزار اندازه‌گیری قابل حمل در شرایط جریان آزاد در کانال‌های باز پیشنهاد می‌گردد.

در نهایت با توجه به اطلاعات جدول فوق به نظر می‌رسد داده‌های آزمایشگاهی در این تحقیق مکمل داده‌های آزمایشگاهی (Baiamonte and Ferro (2007) می‌باشند، در این تحقیق رابطه (۱۹) با ضرایب واسنجی شده که با استفاده از هر دو سری داده‌های آزمایشگاهی حاصل شده است، دارای خطای متوسط ۲/۳۳ درصد می‌باشد که دارای مقدار خطای کمتری نسبت به دیگر روابط می‌باشد.

مقطع تنگ‌شدگی دوزنقه‌ای

در این بخش، پژوهش حاضر با تحقیقات انجام گرفته در مورد سازه اندازه‌گیری جریان به وسیله نیم‌مخروط مقایسه شده است. یکی از تحقیقات انجام شده، (Kapoor et al. (2019) می‌باشد که با قرار دادن یک مخروط در میان کانال مستطیلی و از طریق کاهش سطح مقطع کانال و ایجاد جریان بحرانی در مقطع تنگ شده، معادله (۲۰) را جهت تخمین جریان پیشنهاد دادند.

$$Q = c_d \frac{(B_c y_c + c y_c^2)^{3/2} g^{1/2}}{(B_c + 2c y_c)^{1/2}} \quad (\text{رابطه } 20)$$

که در این معادله Q ، دبی جریان، C_d ، ضریب دبی، B_c ، عرض تنگ‌شدگی کانال، y_c ، عمق بحرانی، c ، نسبت شعاع به ارتفاع مخروط و g ، شتاب جاذبه زمین می‌باشند. با توجه به تشابه مساحت تنگ‌شدگی در فلوم تحقیق حاضر و تحقیق Kapoor et al. (2019)، دو پژوهش با استفاده از داده‌های آزمایشگاهی موجود و با صرفنظر کردن از اثرات لایه مرزی قابل مقایسه می‌باشند. معادله پیشنهادی در تحقیق (Kapoor et al. (2019) استفاده از معادله انرژی و مجموع ۲۳ داده آزمایشگاهی حاصل گردیده است که خطای میانگین و حداکثر حاصل از رابطه (۲۰) به ترتیب برابر با ۴/۲۴ و ۸/۱۹ درصد می‌باشد. رابطه (۱۲)، به منظور تخمین دبی عبوری از مقطع تنگ‌شدگی دوزنقه‌ای شکل ارائه شده که از ۳۶ داده آزمایشگاهی تحت شرایط جریان آزاد و روش تحلیل ابعادی استفاده گردیده است. رابطه (۱۲) با متوسط خطای ۱/۸۵ درصد و حداکثر خطای ۶/۱ دبی عبوری از فلوم با مقطع تنگ‌شدگی دوزنقه‌ای را تخمین خواهد زد که دارای خطاهای کمتری نسبت به تحقیق (Kapoor et al. (2019) می‌باشد. با توجه به مقایسه‌های انجام گرفته، می‌توان استنباط کرد که معادله حاصل شده توسط تحلیل ابعادی و تحلیل‌های رگرسیونی از رابطه به‌دست آمده توسط معادله انرژی دقیق‌تر خواهد بود.

REFERENCES

- Aminpour, Y. Vatankhah, A. Farhoudi, J. (2019). Discharge Analysis of SMBF Flumes in Free and Submerged Flow Conditions, *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 50(7), 1635-1649.
- Baiamonte, 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 Pampaloni, V. (2016). New Stage-Discharge Equation for the SMBF Flume. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 142(5).

- 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.
- Ferro, V. (2002). Discussion of "Simple flume for flow measurement in Open Channel" by Zohrab Samani and Henry Magallanez. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 128(2), 129-131.
- Hager, W. H. (1985). Modified venturi channel. *Journal of irrigation and drainage engineering*, 111(1), 19-35.
- Hager, W. H. (1986). Modified, trapezoidal Venturi channel. *Journal of irrigation and drainage engineering*, 112(3), 225-241.
- 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).
- Khalili Shayan, H. Aminpour, Y. Barghi Khezerloo, A. and Farhoudi, J. (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), 07017012.
- 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).
- 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).