

مطالعه آزمایشگاهی ضریب جریان سرریزهای تناسبی خطی و جذری در کانال‌های مستطیلی

نوشین اصلاحی¹، ابراهیم امیری تکلدانی^{2*}، علیرضا وطن‌خواه³

1- دانشجوی کارشناسی ارشد سازه‌های آبی، گروه مهندسی آبیاری و آبادانی، دانشگاه تهران

2- دانشیار گروه مهندسی آبیاری و آبادانی، پردیس کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران

3- استادیار گروه مهندسی آبیاری و آبادانی، پردیس کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران

* کرج، صندوق پستی 4111

amiri@ut.ac.ir

چکیده- اندازه‌گیری دقیق بده جریان در مجاری روباز و شبکه‌های انتقال آب و فاضلاب از اهمیت ویژه‌ای برخوردار بوده، به طوری که تاکنون انواع مختلفی از سازه‌ها از قبیل سرریزها، روزنه‌ها، فلوم‌ها و دریچه‌های کشویی به منظور اندازه‌گیری بده جریان ارائه شده‌اند. سرریزهای تناسبی دسته‌ای از سرریزهای لبه تیز هستند که به دلیل حساسیت کم نسبت به تغییر عمق بالادست از درستی بالایی برخوردار می‌باشند. در سرریزهای تناسبی نوع خطی، رابطه میان بده و بار آبی خطی است، در حالی که در انواع جذری و لگاریتمی آن، رابطه خطی به ترتیب میان بده و جذر بار آبی و لگاریتم بار آبی برقرار می‌باشد. در این تحقیق بر اساس مبانی نظری موجود در زمینه سرریزهای تناسبی و روش طراحی بدون بده، سه نوع سرریز تناسبی خطی با مقاطع دودکشی، مثلثی معکوس و دو مثلثی معکوس و دو نوع سرریز تناسبی جذری با کناره‌های خطی یک تکه و دو تکه طراحی و ساخته شده و در انتهای یک کانال با مقطع مستطیلی تعبیه شدند. با انجام حدود 600 آزمایش در محدوده بده 2 الی 10 لیتر بر ثانیه بر روی سرریزها، برقراری رابطه خطی میان بده و بار آبی در سرریزهای تناسبی خطی و بده و جذر بار آبی در سرریزهای تناسبی جذری به صورت آزمایشگاهی مورد بررسی قرار گرفت. نتایج آزمایش‌ها نشان دادند که ضریب بده تابعی از نسبت‌های بدون بده بعد بار آبی به ارتفاع تاج سرریز و طول تاج سرریز به ارتفاع تاج سرریز می‌باشد. با استفاده از بخش عمده‌ای از نتایج آزمایشگاهی رابطه‌ای میان بده و ضریب جریان برای هر کدام از سرریزها بدست آمد. مقایسه نتایج حاصل از روابط بدست آمده با باقی‌مانده نتایج آزمایشگاهی نشان داد که متوسط خطای معادلات ارائه شده برابر با 1/5 درصد است که بیانگر دقت مناسب روابط ارائه شده می‌باشد.

کلیدواژه‌گان: سرریز تناسبی خطی، سرریز تناسبی جذری، ضریب بده، کانال مستطیلی.

1- مقدمه

موجب شده که در خصوص رفتار هیدرولیکی آن‌ها تحقیقات قابل توجهی توسط محققان مختلف انجام شود.

سادگی سازه‌ای و استفاده وسیع از سرریزها و شکاف‌ها

خطای قرائت ارتفاع آب به صورت خطی در بده ظاهر می‌شود، در حالی که در سرریزهای دیگر، به دلیل وجود توان بیش از یک در رابطه بده-بار آبی، مقدار خطای ایجاد شده به ازای مقدار معین خطا در قرائت بار آبی بیشتر از مقدار مربوط به سرریز تناسبی است. به عنوان مثال اگر در قرائت بار آبی 1% خطا وجود داشته باشد، در سرریز تناسبی خطی 1% خطا در محاسبه بده ظاهر می‌شود، در حالی که در سرریز مستطیلی و مثلثی به ترتیب 1/5% و 2/5% خطا وجود خواهد داشت. همچنین به دلیل نرخ ثابت تغییرات ارتفاع آب روی سرریز نسبت به افزایش بده در سرریزهای تناسبی، اندازه‌گیری بار آبی تسهیل و میزان خطا در قرائت بار آبی کاهش می‌یابد.

ایده اولیه سرریز تناسبی توسط استات (1897) ارائه شد، اما تلاش او برای بدست آوردن مقطعی که بتواند اندازه‌گیری بار آبی را تسهیل کند، به دلیل لزوم ایجاد عرض بی‌نهایت در تاج سرریز ممکن نشد (کشواو مورتی و پیلا، 1978). به بیان دیگر اگرچه روش ارائه شده برای تعیین مقطع سرریز تناسبی دقیق بوده است، اما از آنجا که در این روش با نزدیک شدن عمق به حداقل مقدار خود، عرض سرریز به بی‌نهایت میل کرده که از جنبه اجرایی و نیز اقتصادی توجیه پذیر نبود، لذا این روش برای اهداف عملی کاربردی نیست (بددور، 2008). برای حل این مشکل پیشنهاد شد که سرریز تناسبی خطی بر روی یک سرریز مستطیلی قرار داده شود که این توصیه منجر به توسعه عملی و ساخت این سرریز شد.

تروسکولانسی (1960) اولین کسی بود که سرریز دوزنقه معکوس با یک زاویه راس تقریباً 50° درجه را معرفی نموده و گزارش کرد که معادله بده-بار آبی این سرریز تقریباً خطی است. کشواو مورتی و گایریدهار (1989) با هدف تسهیل در ساخت، اما با محصور نمودن مقدار انحراف در محدوده مجاز، سرریز دوزنقه معکوس را به صورت یک مثلث معکوس در نظر گرفتند و ضمن به

استفاده از انواع مختلف سرریزها به منظور اندازه‌گیری بده جریان مرسوم بوده، به طوری که با توجه به بار آبی روی سرریز و شکل هندسی آن، امکان تعیین بده عبوری به آسانی میسر است. روزنه‌ها نیز از جمله وسایلی هستند که برای اندازه‌گیری جریان در لوله‌ها و کانال‌های آبیاری و زهکشی از آن‌ها استفاده می‌شود. در صورتی که ارتفاع سقوط آزاد در کانال به اندازه کافی زیاد باشد، از سرریز به عنوان وسیله اندازه‌گیری استفاده می‌شود، ولی چنانچه ارتفاع سقوط کمتر از حد مورد نیاز باشد، از پارشال فلوم و روزنه‌های مستطیلی مستغرق استفاده می‌شود (USBR، 1997). سرریزهای تناسبی خطی و جذری دو نوع از انواع سرریزها هستند که در اولی بده با توان واحد بار آبی متناسب بوده، در حالی که در دومی مقدار بده با توان یک دوم بار آبی متناسب است. به دلیل وجود چنین رابطه‌ای، این سرریزها کاربردهای خاصی دارند که می‌توان به اندازه‌گیری جریان در آزمایشگاه‌های هیدرولیک به دلیل تأمین دقت مورد نظر، نصب در خروجی حوضچه ترسیب به منظور حفظ سرعت جریان در اطراف سرعت متوسط برای ته نشینی رسوبات و همچنین برای کنترل مواد اشاره کرد (کشواو مورتی و پیلا، 1978). شکل‌های مختلف سرریزهای تناسبی با توسعه معادلات و کاربرد روش‌های عددی و همچنین به صورت آزمایشگاهی، توسط محققان مختلف مورد بررسی قرار گرفته است. این بررسی‌ها برای یافتن بهترین شکل هندسی سرریز تناسبی با کمترین میزان حساسیت نسبت به عمق آب بالادست و کمترین خطای ایجاد شده در محاسبه بده به عمل آمده است. از آنجا که برآورد بده عبوری از روی سرریز مستلزم اندازه‌گیری رقوم آب در بالا دست سرریز می‌باشد، لذا ورود خطا در قرائت بار آبی روی سرریز سبب بروز خطای قابل توجه در برآورد بده و اختلاف قابل توجه بین بده‌های واقعی و محاسبه شده خواهد شد. به دلیل خطی بودن تغییرات بده در برابر ارتفاع آب روی سرریز، در سرریز تناسبی خطی،

شده را پیشنهاد دادند. وطن خواه (2012) برای بهبود دامنه تغییرات خطی سرریز مثلثی معکوس پیشنهاد کرد که اگر به جای مقطع مستطیلی در سرریز دودکشی از مقطع مثلثی استفاده شود، ضمن افزایش دامنه خطی سرریز دودکشی، میزان خطای انحراف از رابطه خطی کاهش می یابد. همچنین وی با بهینه سازی و بی بعدسازی روابط تئوری سرریزهای مثلثی معکوس و دودکشی و دو مثلثی معکوس جدولی را برای تسهیل طراحی سرریزهای فوق ارائه کرد.

در این تحقیق سرریزهای تناسبی خطی و جذری با کناره-های خطی تکه ای (پروفیلی از سرریز که از خطوط مستقیم تشکیل شده است)، به وسیله روش طراحی بدون بعد ارائه شده توسط وطن خواه (2012) طراحی شده و خصوصیات آن مورد بررسی آزمایشگاهی قرار گرفته است. لازم به ذکر است که در طراحی ارائه شده توسط وطن خواه (2012) روابط دو متغیره برای پیش بینی ضرایب بده عبوری ارائه شده که بنا به نتیجه گیری ایشان در کل دامنه کاربرد، کارایی داشته و از دقت بالایی برخوردار است.

2- مواد و روش ها

2-1- روابط بدون بعد سرریزهای تناسبی با کناره های

خطی شکل

اگر ارتفاع معادل انرژی جنبشی در بالادست و اثرات لزجت و کشش سطحی نادیده گرفته شوند، بده عبوری از روی سرریز برابر است با (فرنچ، 1985):

$$Q = \int_{y=0}^{y=H} C \sqrt{2g(H-y)} b(y) dy \quad (1)$$

وطن خواه (2012) بر مبنای رابطه (1) و بسط آن، بده عبوری از قطعه i ام را به صورت روابط (2) و (3) معرفی کرد.

دست آوردن روابط نظری برای استفاده از آن، به بررسی عملکرد آزمایشگاهی آن پرداختند. کشاوا مورتی و گایریدهار (1989) برای بهبود دامنه تغییرات خطی سرریز مثلثی معکوس یک سرریز مستطیلی را به سرریز مثلثی معکوس اضافه کردند. این سرریز به سرریز دودکشی معروف است. کشاوا مورتی و گایریدهار بر اساس مطالعه آزمایشگاهی بر روی 4 سرریز خطی، نتیجه گرفتند که میانگین ضریب بده برابر با 0/615 است. کشاوا مورتی و گایریدهار (1989) همچنین سه عدد سرریز دودکشی مختلف را مورد آزمایش قرار داده و نشان دادند که رابطه خطی بین بده و بار آبی سرریز مثلثی معکوس، برای سرریز دودکشی نیز معتبر است. سوامی و همکاران (1991) با توجه به تحقیقات قبلی در زمینه سرریزهای خطی که توسط بنکس و همکاران (1968)، چاندراسک هاران و راوو (1976)، لاوک (1961) و راوو و عبدالهوکاری (1971) صورت گرفته بود و با فرض ثابت بودن ضریب بده، نیمرخ سرریز خطی را توسعه داده و سپس با بررسی تغییرات ضریب بده با نسبت بار آبی به ارتفاع سرریز، نیمرخ برای سرریز خطی ارائه کردند که نیاز به قاعده و سطح مبنای اصلاح شده ندارد. بددور (2008) یک معادله کلی برای محاسبه بده برای سرریزهای چند جمله ای (که در آنها رابطه حاکم بر طراحی از چندین جمله تشکیل شده است) بر مبنای شکل جدید سرریز چند جمله ای ارائه داد. بددور (2008) با بهینه سازی ضرایب سرریز چند جمله ای، سرریزی طراحی نمود که رفتار آن مشابه سرریز خطی یا تناسبی است. وطن خواه و کوچکزاده (2009) با استفاده از تابع گاما شکل کلی رابطه بده برای سرریز چندجمله ای از درجه n را توسعه دادند. آن ها با استفاده از این راه حل کلی، راه حل دقیق سرریز خطی را بدست آوردند. با توجه به اینکه این راه حل دقیق سرریز خطی مختص اهداف کاربردی نیست، لذا آن ها یک راه حل دقیق اصلاح

$$Q_m = \frac{2}{3} K b H_m^{3/2} + \frac{4}{15} K z_1 H_m^{5/2}, \quad n=1, H_m = y_1 \quad (6)$$

پروفیل دو تکه:

$$Q = \frac{2}{3} K b H^{3/2} + \frac{4}{15} K z_1 H^{5/2}, \quad 0 < H \leq y_1 \quad (\text{الف-7})$$

$$Q = \frac{2}{3} K b \left[H^{3/2} - (H - y_1)^{3/2} \right] + \frac{2}{3} K \left[(b + z_1 y_1 - z_2 y_1) (H - y_1)^{3/2} \right] + \frac{2}{15} K z_1 \left[2H^{5/2} - (H - y_1)^{5/2} (2H + 3y_1) \right] + \frac{2}{15} K z_2 \left[(H - y_1)^{5/2} (2H + 3y_1) \right], \quad y_1 < H \leq H_m \quad (\text{ب-7})$$

$$Q_m = \frac{2}{3} K b \left[H_m^{3/2} - (H_m - y_1)^{3/2} \right] + \frac{2}{3} K \left[(b + z_1 y_1 - z_2 y_1) (H_m - y_1)^{3/2} \right] + \frac{2}{15} K z_1 \left[2H_m^{5/2} - (H_m - y_1)^{5/2} (2H_m + 3y_1) \right] + \frac{2}{15} K z_2 \left[(H_m - y_1)^{5/2} (2H_m + 3y_1) \right] \quad (8)$$

در روابط فوق Q بده جریان عبوری جریان، H ارتفاع جریان عبوری نسبت به تاج سرریز، H_m ارتفاع حداکثر جریان عبوری (نسبت به تاج سرریز)، b نصف طول تاج سرریز، y_1 فاصله عمودی (نسبت به تاج سرریز) اولین نقطه‌ای که شیب اضلاع سرریز تغییر می‌کند، Z_1 شیب قطعه اول اضلاع سرریز (نسبت فاصله افقی به فاصله عمودی)، Z_2 شیب قطعه دوم اضلاع سرریز، Q_m حداکثر بده عبوری از روی سرریز و $K=2C\sqrt{2g}$ می‌باشد. همچنین وطن‌خواه (2012) با بهینه‌سازی و بی‌بعد سازی روابط تئوری سرریزهای تناسبی پارامترهای بی‌بعدی را به منظور سهولت طراحی سرریزهای تناسبی خطی و جذری ارائه کرده است. در تحقیق حاضر با استفاده از روابط ارائه شده توسط وطن‌خواه، ابتدا سرریزها طراحی شده و سپس با احداث یک مدل آزمایشگاهی و انجام مجموعه‌ای از آزمایش‌ها بر اساس روابط بدون بعد بدست آمده، ضریب جریان عبوری از روی سرریزها تعیین شدند.

$$Q_i = \int_{y=\sum_{j=1}^i y_{j-1}}^{y=\sum_{j=1}^i y_j} 2C\sqrt{2g(H-y)} \cdot \left[b + z_i y + \sum_{j=1}^i (z_{j-1} - z_i) y_{j-1} \right] dy \quad (2)$$

$$Q_i = \frac{2}{3} K \left[b + \sum_{j=1}^i (z_{j-1} - z_i) y_{j-1} \right] \cdot \left[\left(H - \sum_{j=1}^i y_{j-1} \right)^{3/2} - \left(H - \sum_{j=1}^i y_j \right)^{3/2} \right] + \frac{2}{15} K z_i \left[\left(H - \sum_{j=1}^i y_{j-1} \right)^{5/2} (2H + 3 \sum_{j=1}^i y_{j-1}) \right] - \left[\left(H - \sum_{j=1}^i y_j \right)^{5/2} (2H + 3 \sum_{j=1}^i y_j) \right] \quad (3)$$

وطن‌خواه (2012) همچنین بده بیشینه عبوری از میان سرریز را به صورت رابطه (4) بیان کرد.

$$Q_m = \sum_{i=1}^n Q_i = \frac{2}{3} K \sum_{i=1}^n \left\{ \left[b + \sum_{j=1}^i (z_{j-1} - z_i) y_{j-1} \right] \cdot \left[\left(H_m - \sum_{j=1}^i y_{j-1} \right)^{3/2} - \left(H_m - \sum_{j=1}^i y_j \right)^{3/2} \right] + \frac{2}{15} K \sum_{i=1}^n \left\{ z_i \left[\left(H_m - \sum_{j=1}^i y_{j-1} \right)^{5/2} (2H_m + 3 \sum_{j=1}^i y_{j-1}) - \left(H_m - \sum_{j=1}^i y_j \right)^{5/2} (2H_m + 3 \sum_{j=1}^i y_j) \right] \right\} \right\} \quad (4)$$

وطن‌خواه (2012) در نهایت روابط (5-8) را برای طراحی و محاسبه بده‌های تئوری مربوط به سرریزهای تناسبی از دو نوع خطی و جذری با دو نوع پروفیل واحد (منظور مقطعی از سرریز است که اضلاع کناری آن دارای شیبی یکسان می‌باشند) و پروفیل دوتکه که در آن اضلاع کناری سرریز در نقطه‌ای تغییر شیب داده و دارای دو شیب می‌باشد، ارائه نموده است (شکل‌های 1 و 2). پروفیل واحد:

$$Q = \frac{2}{3} K b H^{3/2} + \frac{4}{15} K z H^{5/2}, \quad 0 < H \leq H_m \quad (5)$$

متغیرهای $L/(L+P)$ و $H/(H+P)$ به عنوان متغیرهای بی-بعد مؤثر بر ضریب بده تعیین شدند و آزمایش‌ها بر این اساس برای تعیین ضرایب بده آزمایشگاهی در برابر تغییرات هر یک از این پارامترها برنامه‌ریزی شدند. به منظور تحلیل داده‌ها، هر یک از سرریزها در چند ارتفاع نصب شده و ضمن قرائت بده و بار آبی، با توجه به روابط ارائه شده توسط وطن‌خواه (2012)، بده نظری و بده بیشینه داده‌های متناظر آزمایشگاهی محاسبه شده و سپس با توجه به تعریف کلی ضریب بده به عنوان نسبت بده آزمایشگاهی به بده نظری، ضرایب بده آزمایشگاهی برآورد شدند.

2-2- مدل آزمایشگاهی

همان‌گونه که قبلاً گفته شد در این تحقیق بر اساس مطالعات وطن‌خواه (2012)، مدل سرریزهای تناسبی با کناره‌های خطی تکه‌ای، 3 مدل سرریز تناسبی خطی با مقاطع دودکشی، دو مثلثی معکوس و مثلثی معکوس و 2 مدل سرریز تناسبی جذری با پروفیل خطی واحد و پروفیل خطی دو تکه مطابق شکل‌های 1 و 2 طراحی شدند. نمای سرریزها حین آزمایش و نمایی از فلوم آزمایشگاهی در شکل‌های 3 و 4 آورده شده است. آزمایش‌های مربوط به این تحقیق در مرکز تحقیقات آب گروه آبیاری و آبادانی دانشگاه تهران انجام شده است. طول فلوم آزمایشگاهی 2 متر و عرض آن 25 سانتی‌متر بوده و دیواره‌ها و کف فلوم هر دو از جنس پلکسی گلس ساخته شد. سرریزها در انتهای فلوم تعبیه شده و بده جریان عبوری از طریق یک لوله 3 اینچ توسط پمپ از مخزن اصلی وارد فلوم شده و بوسیله فلومتر الکترومغناطیسی که درستی اندازه‌گیری آن توسط شرکت سازنده 0/5 درصد حداکثر عدد دبی گزارش شده، اندازه‌گیری می‌شد.

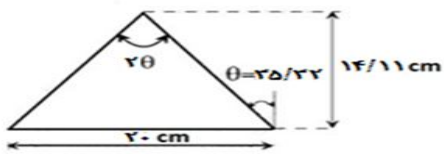
تحلیل ابعادی برای پیش‌بینی ضریب بده جریان عبوری با توجه به اهداف مورد نظر در این تحقیق که شامل بررسی آزمایشگاهی سرریزهای تناسبی در مقطع مستطیلی و نیز تعیین پارامترهای مؤثر بر روی ضریب بده جریان بود، یک مجموعه آزمایشگاهی طراحی شده و سپس آزمایش‌های متعددی بر روی مدل‌های طراحی شده از سرریزها انجام گرفت. به منظور سامان‌دهی آزمایش‌ها از نظر تعداد و تنوع آن‌ها، ابتدا عوامل دخیل در تعیین ضریب جریان مشخص شده و سپس با استفاده از روش آنالیز ابعادی، معادلات بدون بعد تعیین شده و برنامه‌ریزی آزمایش‌ها به عمل آمد.

بر اساس مطالعات به عمل آمده، متغیرهای مؤثر بر ضریب بده جریان عبارتند از: L, H, P, B و ν که به ترتیب نشان دهنده ارتفاع تاج سرریز از کف کانال، بار آبی روی سرریز، طول تاج سرریز، عرض کانال و سرعت جریان می‌باشند. همچنین کشش سطحی σ ، لزوجت دینامیکی آب μ و جرم مخصوص آب ρ نیز از پارامترهای مؤثر بر ضریب بده جریان هستند.

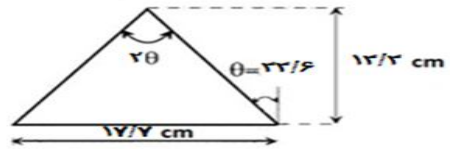
مطابق با تئوری پای Π باکینگهام، با توجه به وجود هشت متغیر و سه بعد، تعداد پنج عامل بدون بعد تعیین و رابطه (9) برای تخمین ضریب جریان به دست آمد:

$$C = f\left(\frac{L}{P}, \frac{H}{P}, \frac{B}{P}, We, R\right) \quad (9)$$

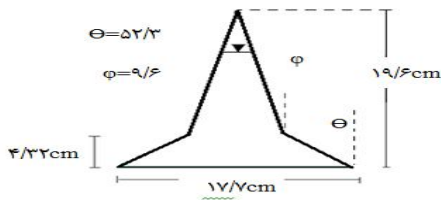
در رابطه (9)، We معرف عدد وبر و R معرف عدد رینولدز است. با توجه به ناچیز بودن نیروهای لزوجت و نیز کشش سطحی، می‌توان از عبارات بیان‌کننده نیروهای لزوجت و کشش سطحی صرف‌نظر کرده و از آنجا که عرض کانال مقداری ثابت است و همچنین از پارامترهای طراحی نیز نیست، لذا متغیر بی‌بعد B/P نسبت به متغیر بی‌بعد L/P از اهمیت کمتری برخوردار است. لازم به ذکر است که L یا به عبارتی طول تاج سرریز از جمله پارامترهای طراحی سرریز محسوب می‌شود. در نتیجه



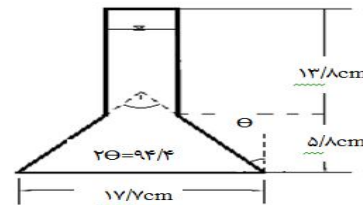
ب- مثلثی معکوس با طول تاج 20 سانتی متر



الف- مثلثی معکوس با طول تاج 17/7 سانتی متر

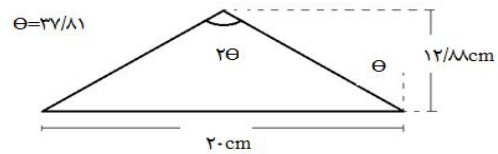
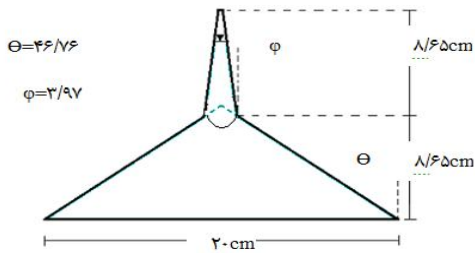


د- دو مثلثی معکوس



ج- دودکشی

شکل 1 نمای توصیفی از سرریزهای خطی طراحی شده



شکل 2 نمای توصیفی از سرریزهای جذری طراحی شده (سمت راست: با پروفیل واحد، سمت چپ: با پروفیل دو تکه)



سرریز جذری با پروفیل واحد

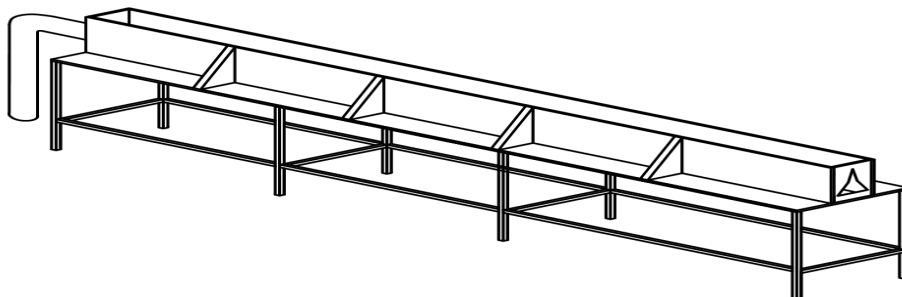


سرریز دو مثلثی معکوس



سرریز دودکشی

شکل 3 نمایی از سرریزهای تناسبی مورد آزمایش



شکل 4 نمایی شماتیک از فلوم آزمایشگاهی

سرریزهای تناسبی خطی و بده و جذر بار آبی در سرریزهای تناسبی جذری برای تمام مقادیر p (ارتفاع سرریز)، وجود دارد.

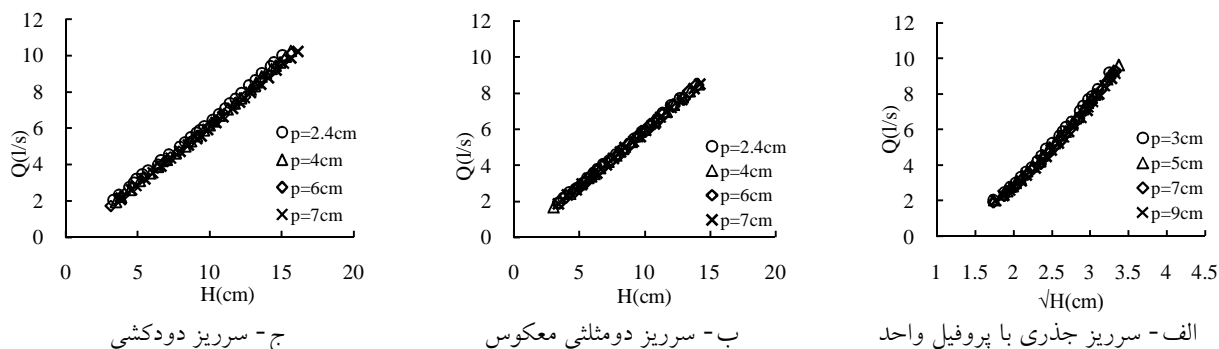
در شکل 6 نیز نمودار تغییرات ضریب بده در برابر نسبت تغییرات عمق آب روی سرریز به عمق آب در بالادست نشان داده شده است. همانگونه که از شکل 6 ملاحظه می‌شود، با افزایش عمق آب روی سرریز در هر کدام از مدل های سرریز طراحی شده، ضریب جریان کاهش می‌یابد. این کاهش به دلیل افزایش سطح تماس جریان عبوری با لبه سرریز و نیز افزایش فشار آب روی لایه جریان مماس بر روی لبه سرریز و در نتیجه ایجاد اصطکاک بیشتر در سطح تماس است. لازم به ذکر است که مقدار کاهش در ضریب بده با افزایش عمق کمتر شده و در نهایت ضریب بده تحت تاثیر افزایش عمق قرار نمی‌گیرد. همچنین در شکل 6 مشاهده می‌شود که در هنگام عبور بده کم در کلیه سرریزها با افزایش ارتفاع تاج سرریز از کف کانال ضریب بده عبوری از سرریز کاهش می‌یابد، لیکن با افزایش بده عبوری، تغییرات ایجاد شده در ضریب بده عبوری ناشی از افزایش ارتفاع کاهش می‌یابد.

به منظور پیش‌بینی ضریب بده عبوری و با در نظر گرفتن ضریب بده به صورت تابعی از دو متغیر بدون بعد $H/(H+P)$ و $L/(L+P)$ روابطی برای پیش‌بینی ضرایب بده عبوری از میان سرریزهای آزمون شده به کمک Solver نرم‌افزار Excel به دست آمدند.

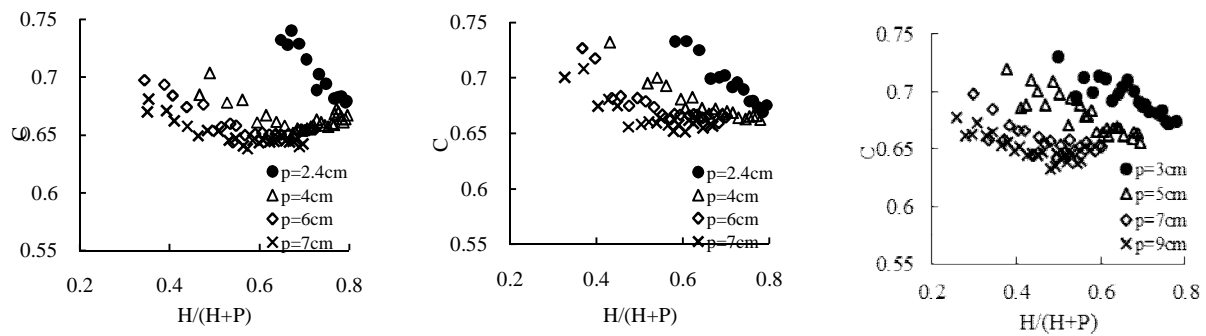
لازم به ذکر است از آنجا که محل اندازه‌گیری عمق جریان برای سرریز تناسبی در فاصله‌ای معادل دو برابر بار آبی حداکثر در بالادست سرریز توصیه شده است (باس، 1989)، عمق جریان توسط عمق سنج با دقت $\pm 0/1$ میلی‌متر در فاصله 25 سانتی‌متری پشت سرریز قرائت می‌شد. این فاصله برای تمامی آزمایش‌ها ثابت در نظر گرفته شد. گام‌های مورد استفاده برای تغییر بده عبوری حدود $0/3$ لیتر بر ثانیه تعیین شد تا طیف وسیعی از دبی‌ها مورد آزمایش قرار گیرد. برای هر ارتفاع سرریز حدود 23 آزمایش در محدوده بده 2 الی 10 لیتر بر ثانیه انجام شد. در مجموع برای کل سرریزهای طراحی شده حدود 600 آزمایش صورت گرفت که در این میان سرریزهای تناسبی خطی به دلیل تعداد بیشتر آن‌ها 414 آزمایش را به خود اختصاص دادند. همچنین سهم سرریزهای تناسبی جذری 185 آزمایش بود.

3- نتایج و بحث

به منظور بررسی امکان وجود رابطه خطی میان بده و بار آبی در سرریزهای تناسبی خطی و میان بده و جذر بار آبی در سرریزهای تناسبی جذری، برای تمامی آزمایش‌ها بده آزمایشگاهی در برابر بار آبی قرائت شده ترسیم گردید. در شکل 5، نمودار مربوط به سه سرریز به عنوان نمونه آورده شده است. با توجه به شکل 5 ملاحظه می‌شود که رابطه خطی مورد انتظار بین بده و بار آبی در



شکل 5 رابطه بده و بار آبی در بعضی از سرریزهای خطی و جذری آزمون شده



ج- سرریز دودکشی

ب- سرریز دومثلثی معکوس

الف- سرریز جذری با پروفیل واحد

شکل 6 نمودار تغییرات ضریب بده آزمایشگاهی نسبت به $H/(H+P)$ در سرریزهای خطی و جذری آزمون شده

گرفته شد. همچنین a, b, c, d, e, f و g مقادیر ثابتی هستند که مقدار آن‌ها با کمینه کردن خطاها، تعیین شده و برای هر سرریز متفاوت می‌باشند. معادلات تجربی پیشنهادی ضریب بده به شکل معادله (10) برای سرریزهای مورد مطالعه در جدول 1 معرفی شده‌اند. شکل 7 برازش روابط پیشنهادی را با توجه به ضرایب بده آزمایشگاهی هر سرریز نشان می‌دهد. این روابط برای ارتفاع‌های مختلف از هر سرریز بسط داده شده‌اند.

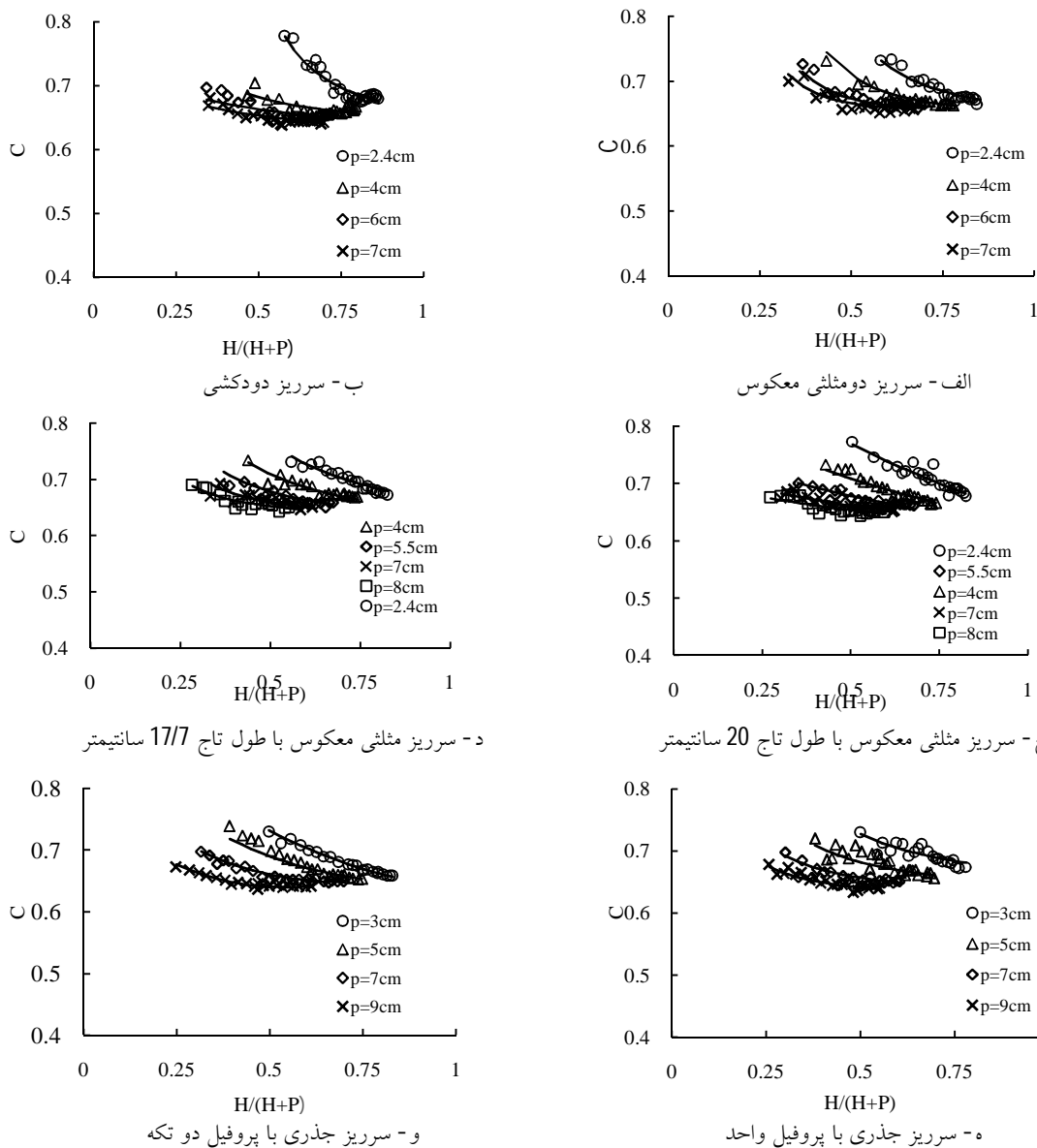
3-1- مقایسه بین سرریزهای آزمون شده

یکی از راه‌های مقایسه بین سرریزهای آزمون شده به منظور تعیین دقت آنها و در نتیجه تمایز آنها نسبت به یکدیگر، بررسی مقدار اختلاف میان دبی آزمایشگاهی اندازه‌گیری شده با دبی محاسبه شده است. دبی محاسبه شده عبارت از حاصل ضرب ضرایب دبی (بدست آمده از روابط موجود در جدول 1) در دبی برآورد شده حاصل از روابط (5) و (7) می‌باشد. در این مقایسه، میزان خطای کمتر به مفهوم رفتار مناسب‌تر سرریز بر اساس نوع خطی بودن یا جذری بودن آنها می‌باشد. شکل 8 میزان خطای نسبی ($e\%$) در برابر پارامتر بی‌بعد $H/(H+P)$ در برخی از سرریزهای بررسی شده را نشان می‌دهد.

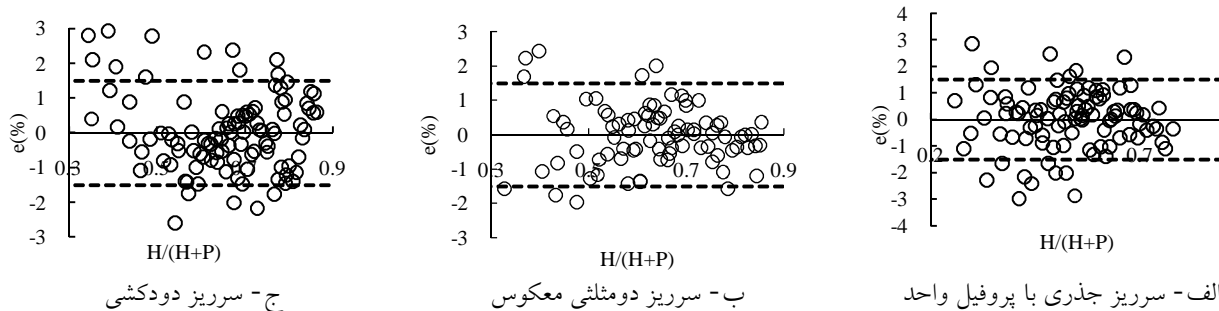
نحوه تعیین ضرایب بده پیش‌بینی شده به این صورت بود که با تعیین مقادیر متناظر $L/(L+P)$ و $H/(H+P)$ برای تمامی داده‌های مربوط به هر سرریز مورد مطالعه و ضرایب بده آزمایشگاهی معلوم، مقادیر ضرایب بده پیش‌بینی شده مطابق روند زیر محاسبه شد. ابتدا شکل غیر خطی برای معادله‌ی پیشنهادی ضریب بده به صورت تابعی از دو متغیر بی‌بعد مؤثر $L/(L+P)$ و $H/(H+P)$ تعیین شد. سپس در نرم افزار Excel معادله پیشنهادی تا حدی که خطای آن نسبت به ضریب بده آزمایشگاهی در حد قابل قبول (بسیار کم) باشد، به دفعات حل شد و بعضاً تغییراتی در شکل معادله پیشنهادی به منظور رسیدن به شکل مطلوب آن با کمترین خطا میان ضرایب بده آزمایشگاهی و ضرایب بده پیش‌بینی شده توسط معادله تجربی پیشنهادی صورت گرفت. لازم به ذکر است که این روند برای مجموعه داده‌های هر سرریز که شامل ارتفاع‌های مختلف است، به طور جداگانه انجام گرفت و در نهایت معادله پیشنهادی برای پیش‌بینی ضریب بده هر سرریز مطالعه شده ارائه شد. شکل کلی در نظر گرفته شده برای معادله پیشنهادی به صورت غیرخطی و به فرم معادله (10) است.

$$C_d = \frac{a}{x^b} + \frac{c}{y^d} + ex^f y^g \quad (10)$$

در معادله (10)، $x=H/(H+P)$ و $y=L/(L+P)$ در نظر



شکل 7 مقایسه میان ضرایب بده پیش بینی شده (خطوط ممتد) و ضرایب بده آزمایشگاهی در سرریزهای آزمون شده



شکل 8 خطای نسبی در برابر $H/(H+P)$ در برخی از سرریزهای آزمون شده

جدول 1 معادلات پیشنهادی ضرایب بده برای سرریزهای آزمون شده

معادله	درصد داده‌ها در محدوده خطای $\pm 1/5\%$	معادله پیشنهادی ضریب بده	نوع سرریز
(11)	89/3%	$C = \frac{0.275}{\left(\frac{H}{H+p}\right)^{-0.12}} + \frac{0.34}{\left(\frac{L}{L+p}\right)^{0.34}} + 0.09 \times \left(\frac{H}{H+p}\right)^{-2.42} \times \left(\frac{L}{L+p}\right)^{8.11}$	سرریز دو مثلثی معکوس
(12)	84/6%	$C = \frac{0.652}{\left(\frac{H}{H+p}\right)^{0.053}} + \frac{-0.0003}{\left(\frac{L}{L+p}\right)^{13}} + 1.59 \times \left(\frac{H}{H+p}\right)^{-4.16} \times \left(\frac{L}{L+p}\right)^{3.9}$	سرریز دودکشی
(13)	78/2%	$C = \frac{0.636}{\left(\frac{H}{H+p}\right)^{0.002}} + \frac{1.185}{\left(\frac{L}{L+p}\right)^{-7.07}} + 1.1 \times \left(\frac{H}{H+p}\right)^{0.39} \times \left(\frac{L}{L+p}\right)^{6.55}$	سرریز مثلثی معکوس با طول تاج 20 سانتیمتر
(14)	79/5%	$C = \frac{-0.054}{\left(\frac{H}{H+p}\right)^{0.758}} + \frac{0.56}{\left(\frac{L}{L+p}\right)^{0.38}} + 0.21 \times \left(\frac{H}{H+p}\right)^{-1.1} \times \left(\frac{L}{L+p}\right)^{4.08}$	سرریز مثلثی معکوس باطول تاج 17/7 سانتیمتر
(15)	84/3%	$C = \frac{0.713}{\left(\frac{H}{H+p}\right)^{0.003}} + \frac{-0.08}{\left(\frac{L}{L+p}\right)^{0.43}} + 0.09 \times \left(\frac{H}{H+p}\right)^{-1.49} \times \left(\frac{L}{L+p}\right)^{6.74}$	سرریز جذری با پروفیل واحد
(16)	94/4%	$C = \frac{-1.368}{\left(\frac{H}{H+p}\right)^{-0.933}} + \frac{1.18}{\left(\frac{L}{L+p}\right)^{-0.97}} + 0.84 \times \left(\frac{H}{H+p}\right)^{1.22} \times \left(\frac{L}{L+p}\right)^{-1.06}$	سرریز جذری با پروفیل دوتکه

همان‌طور که از شکل 8 مشاهده می‌شود تمام سرریزهای بررسی شده رفتار خطی و جذری مورد انتظار را نشان داده‌اند و روابط پیشنهادی دقت بسیار مطلوبی داشته به طوری که در تمامی سرریزهای آزمون شده 78/2% تا 94/4% از داده‌ها دارای خطای کمتر از $\pm 1/5\%$ می‌باشند.

4- نتیجه‌گیری

در تحقیق حاضر با توجه به روابط نظری توسعه یافته برای سرریزهای تناسبی، شکل‌های متفاوت این سرریز در دو گروه سرریزهای تناسبی خطی و سرریزهای تناسبی جذری طراحی شد. به منظور بررسی خصوصیات خطی و جذری آن‌ها و همچنین بررسی ضریب بده جریان عبوری از میان سرریز و پارامترهای مؤثر بر آن در کانال مستطیلی، بر اساس روابط بدست آمده از روش پای باکینگهام برای محاسبه ضریب جریان عبوری از رو و داخل سرریزها، برنامه‌ریزی به منظور انجام یک مجموعه آزمایش به عمل آمده و در مجموع حدود 600 آزمایش

در محدوده بده 2 الی 10 لیتر در ثانیه به عمل آمد. به منظور بررسی ارتباط خطی، با توجه به نتایج حاصل از آزمایش‌های انجام شده، نمودارهای بده-بار آبی در سرریزهای خطی و نمودارهای بده-جذر بار آبی در سرریزهای جذری ترسیم و نمودار خطی مناسب از میان داده‌ها برازش داده شد. نتایج علاوه بر تأیید رفتار خطی و جذری مورد انتظار، عملکرد مطلوب ابعاد پیشنهادی را تأیید می‌کند. با بررسی ضرایب بده عبوری برای سرریزهای مورد مطالعه، روابطی برای پیش‌بینی ضرایب بده به صورت تابعی از دو پارامتر مؤثر معرفی شده برای هر یک از سرریزها ارائه شد. روابط ارائه شده در کل دامنه کاربرد، کارایی داشته و از دقت بالایی برخوردار می‌باشند، به طوری که در تمامی سرریزهای آزمون شده 78/2% تا 94/4% از داده‌ها خطای کمتر از $\pm 1/5\%$ دارند.

5- تقدیر و تشکر

این تحقیق در راستای اهداف و مأموریت‌های قطب علمی

Chandrasekaran, D., and Rao, N. S. L. (1976). Characteristics of proportional weirs, Journal of the Hydraulics Division, 102(11), pp. 1677-1692.

French, R. H. (1985). *Open-channel hydraulics*, McGraw-Hill, New York.

Keshava Murthy, K., and Giridhar, D. P. (1990). Improved inverted V-notch or chimney weir, Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 116(3), pp. 374-386.

Keshava Murthy, K., and Pillai, K. G. (1978). Design of constant accuracy linear proportional weir, Journal of the Hydraulics Division, 104(4), pp. 527-541.

Keshava Murthy, K., and Pillai, K. G. (1978). Modified proportional V-notch weirs. Journal of the Hydraulics Division, 104(5), pp. 775-791.

Keshava Murthy, K., and Giridhar, D. P. (1989). Inverted v-notch: Practical proportional weir, Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 115(6), pp. 1035-1050.

Lavek, H. R. (1961). A contribution to theoretical and experimental research on linear weirs, La Houille Blanche, Grenoble, France, 16(4), pp. 469-494.

Rao, N. S. L., and Abdul Bhukari, C.H. (1971). Linear proportional weirs with trapezoidal bottom, Journal of Hydraulic Resources, 9(3), pp. 413-427.

Stout, O. V. P. (1897). A new form of weir notch, Transaction Nebraska Engineering Society, 1, 13.

Swamee, P. K., Pathak, S. K., Agarwal, M., and Ansari, A. S. (1991). Alternative linear weir design, Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 117(3), pp. 311-323.

Troskolanski, A. T. (1960). *Hydrometry: Theory and practice of hydraulic measurements*, Pergamon Press

USBR. (1997). Water Measurement Manual 3rd edition-Chapter 9- Submerged orifices, Section 1.

Vatankhah, A. R. (2012). Head-discharge equation for sharp-crested weir with piecewise-linear sides, Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 138(11), pp. 1011-1018.

Vatankhah, A. R. and Kouchakzadeh, S. (2009). Discussion of "Head-discharge equation for sharp-crested polynomial weir", by Baddour, R.E. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 135(3), pp. 393-395.

ارزیابی و به‌سازی شبکه‌های آبیاری و زهکشی و با حمایت‌های دانشگاه تهران و قطب یاد شده انجام شده است. بدین وسیله از حمایت‌های مذکور تشکر و قدردانی می‌شود.

6- فهرست علائم

B	عرض کانال
b	نصف طول تاج سرریز
C	ضریب بده جریان
d	عمق سرریز
g	شتاب ثقل
H	ارتفاع آب روی سرریز
H_m	عمق حداکثر جریان
L	طول تاج سرریز
P	ارتفاع تاج سرریز از کف کانال
Q_m	بده بیشینه عبوری از سرریز
R	عدد رینولدز
V	سرعت جریان
We	عدد وبر
y_1	فاصله عمودی قطعه اول از تاج سرریز
Z_1	شیب قطعه اول سرریز
Z_2	شیب قطعه دوم سرریز
σ	کشش سطحی
μ	لزوجة دینامیکی
ρ	جرم مخصوص آب

7- منابع

Baddour, R. E. (2008). Head-discharge equation for sharp-crested polynomial weir, Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 134(2), pp. 260-262.

Banks, W. H. H., Burch, C. R., and Shaw, T. L. (1968). The design of proportional and logarithmic thin-plate weirs, Journal of Hydraulic Research, 6(2), pp. 75-106.

Bos, M .G. (1989). Discharge measurement structures. International Institute for Land Reclamation and Improvement (ILRI), Publication No. 20, Wageningen, The Netherlands.