تحقیقات آب و خاک ایران، دورهٔ ۴۶، شمارهٔ ۴، زمستان ۱۳۹۴ (ص ۶۷۱-۶۶۳)

مقایسهٔ روش‌های مختلف تخمین بده سرریز جانبی لبه تیز نیم‌دایره‌ای در رژیم جریان زیربحرانی

وحید حق‌شناس [۱] و علیرضا وطن‌خواه [۲]*

۱. دانشجوی دکتری سازه‌های آبی، گروه مهندسی آب، دانشگاه تربیت مدرس

۲. دانشیار، گروه مهندسی آبیاری و آبادانی، پردیس کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۳/۱۱/۶– تاریخ تصویب: ۱۳۹۴/۴/۱۰)

چکیده

سرریز جانبی یکی از سازه‌های کنترل جریان است که به طور گسترده در شبکه‌های آبیاری و زهکشی و شبکه‌های فاضلاب استفاده می‌شود. تحقیق حاضر با ۱۶۲ آزمایش روی سرریز جانبی دایره‌ای لبه تیز انجام شده است. با توجه به متغیربودن ارتفاع لبهٔ سرریز و گسترش عرض فوقانی در سرریز جانبی دایره‌ای، این سرریز توانایی کنترل بهتر سیلاب را نسبت به سرریز جانبی مستطیلی داراست. معادلهٔ دیفرانسیل حاکم بر سرریز جانبی دایره‌ای حل تحلیلی ندارد و با استفاده از روش‌های عددی حل می‌شود. از آنجا که روش‌های عددی هزینهٔ محاسباتی دارد، در این تحقیق از معادلهٔ سرریزهای معمولی و خطی فرض‌کردن پروفیل سطح آب در طول سرریز جانبی استفاده شده است. در نهایت، با انجام سه آزمایش دیگر در شرایط متفاوت از شرایط آزمایش‌های انجام‌شده مشخص شد که روش خطی فرض‌کردن پروفیل سطح آب نسبت به سایر روش‌های مورد استفاده در این تحقیق دقت بیشتری دارد.

واژه‌های کلیدی: جریان متغیر مکانی، سرریز جانبی، سرریز جانبی دایره‌ای، ضریب بده.

مقدمه

سرریز جانبی سازهٔ کنترل هیدرولیکی جریان برای انحراف جریان از کانال اصلی به کانال جانبی است. در زمانی که ارتفاع آب در کانال اصلی از ارتفاع تاج سرریز بیشتر می‌شود، این سازهٔ بده مازاد بر ظرفیت کانال اصلی را به کانال جانبی منحرف می‌کند. سرریزهای جانبی به شکل‌های مختلفی ساخته می‌شود. این سازه‌ها معمولاً به شکل مستطیل ساخته می‌شود. سرریزهای جانبی مستطیلی عرض تاج ثابتی دارد، در حالی که در سرریز جانبی دایره‌ای عرض سطح آب عبوری از سرریز تابعی از عمق آب است. در این گونه سرریزها با افزایش بده و ارتفاع آب در کانال اصلی، عرض تاج و سطح آب سرریز جانبی افزایش و در نتیجه بده انحراف‌یافته از سرریز افزایش می‌یابد. بنابراین، عملکرد این سرریزها در کنترل جریان در عمق‌های آب زیاد که اهمیت بیشتری دارد، بهتر ار سرریز مستطیلی خواهد بود. علاوه‌بر آن، با توجه به مقایسه‌های انجام‌شده در این تحقیق، مشخص شد که ضریب بده سرریز جانبی دایره‌ای در مقایسه با سایر اشکال سرریزهای جانبی بیشتر است که باعث افزایش بده انحراف‌یافته در طول کمتری از این سازه خواهد شد.

احتمالاً Demarchi (1934) اولین کسی بود که از معادلهٔ جریان متغیر مکانی مربوط به سرریز جانبی مستطیلی واقع در کانال مستطیلی به صورت مستقیم انتگرال‌گیری کرد. Frazer (1957) نشان داد که پروفیل سطح آب در سرریز جانبی مستطیلی متناسب با شرایط رژیم جریان در بالادست و پایین‌دست سرریز، همچنین طول سرریز به‌صورت زیربحرانی، فوق‌بحرانی یا ترکیب هر دو رژیم جریان همراه با تشکیل پرش هیدرولیکی است. در مجموع، پروفیل سطح آب به پنج حالت مختلف است. El-Khashab and Smith (1976) با انجام مطالعات آزمایشگاهی، در مواردی که بده سرریز جانبی نسبت به بده کانال اصلی قابل ملاحظه است، بر ضرورت استفاده از معادلهٔ مومنتم در محاسبهٔ بده سرریز جانبی اشاره کردند. Vatankhah (2012) از معادلهٔ جریان متغیر مکانی مربوط به سرریز جانبی مستطیلی واقع در کانال مثلثی به صورت مستقیم انتگرال‌گیری کرد.

Uyumaz and Smith (1991) روی سرریزهای جانبی مستطیلی در کانال مستطیلی و دایره‌ای مطالعهٔ عددی انجام دادند. Muslu (2001) مدلی عددی را برای برآورد بده خروجی از سرریزهای جانبی و پروفیل سطح آب در طول سرریز با فرض انرژی مخصوص ثابت معرفی کرد. Kumar and Pathak (1987) سرریز جانبی مثلثی را در دو حالت لبه تیز و لبه پهن مطالعه کردند. ایشان در تحقیق خود انرژی را در طول سرریز ثابت فرض کردند و برای به‌دست آوردن بده در واحد عرض معادلهٔ

* نویسنده مسئول: arvatan@ut.ac.ir

سرریز مثلثی معمولی را بر عرض سطح آب تقسیم کردند. در واقعیت، میزان بده در واحد عرض در دو انتهای لبهٔ سرریز جانبی باید برابر با صفر شود، این در حالی است که در معادلهٔ کومار این مقادیر صفر نیست. Borghei *et al.* (1991) سرریز جانبی لبه تیز مستطیلی را بررسی کردند. Ghodsian (2004) با استفاده از نظریهٔ کومار و انجام تعداد بیشتری آزمایش، ضریب بده مربوط به سرریز جانبی مثلثی لبه تیز را بهبود داد. Cosar and Agaccioglu (2004) سرریز جانبی لبه تیز مثلثی را در کانال مستقیم و انحنادار مستطیلی مطالعه کردند. Rahimpour (2011) با بهره‌گیری از نظریهٔ Kumar and Phathak (1987) در مورد بده در عرض واحد سرریزهای جانبی مثلثی و جمع آن با بده در عرض واحد سرریزهای جانبی مستطیلی، بده در عرض واحد سرریز جانبی ذوزنقه‌ای را تعیین کرد و رابطه‌ای برای تعیین بده خروجی از سرریز جانبی ذوزنقه‌ای به دست آورد.

همان‌طور که ملاحظه می‌شود، تاکنون تحقیقات متعددی دربارهٔ سرریزهای جانبی انجام شده است. این تحقیقات بیشتر در زمینهٔ سرریز جانبی مستطیلی لبه تیز بوده است. در موارد معدودی نیز به سرریزهای لبه پهن یا سرریزهایی با اشکال متفاوت پرداخته شده است. اما تاکنون تحقیقی دربارهٔ سرریز جانبی دایره‌ای گزارش نشده است. در این تحقیق سرریز جانبی دایره‌ای لبه تیز در رژیم جریان زیربحرانی مطالعه شده است.

مواد و روش‌ها

معادلهٔ دیفرانسیل حاکم بر جریان متغیر مکانی سرریز جانبی دایره‌ای

جریان در سرریزهای جانبی از نوع جریان متغیر مکانی با کاهش بده است. در این تحقیق، فرض شده است کاسته‌شدن جریان باعث تغییرات قابل‌ملاحظهٔ انرژی در جریان نمی‌شود، بنابراین افت انرژی برابر صفر در نظر گرفته شده است. در هر مقطع کانال، کل انرژی نسبت به سطح مبنا برابر است با (Chow 1959):

$$H = Z + y + \alpha \frac{Q^2}{2gA^2} \qquad \text{(رابطهٔ ۱)}$$

در رابطهٔ بالا H انرژی، Z ارتفاع کف کانال، y عمق آب در وسط کانال، A سطح مقطع جریان، α ضریب تصحیح سرعت و Q بده در کانال اصلی است. در صورتی که از معادلهٔ بالا نسبت به محور طولی کانال یعنی x مشتق گرفته شود، داریم:

$$\frac{dH}{dx} = \frac{dZ}{dx} + \frac{dy}{dx} + \frac{\alpha}{2g}\left(\frac{2Q}{A^2}.\frac{dQ}{dx} - \frac{2Q^2}{A^3}.\frac{dA}{dx}\right) \qquad \text{(رابطهٔ ۲)}$$

در این معادله $dH/dx=-S_f$ (شیب خط انرژی)، $dZ/dx=-S_0$ (شیب کف کانال اصلی)، $dA/dx=dA/dy\times dy/dx=Bdy/dx$، B عرض کانال است، که با جایگذاری آن‌ها در معادلهٔ ۲ رابطهٔ ۳ حاصل می‌شود.

(رابطهٔ ۳)

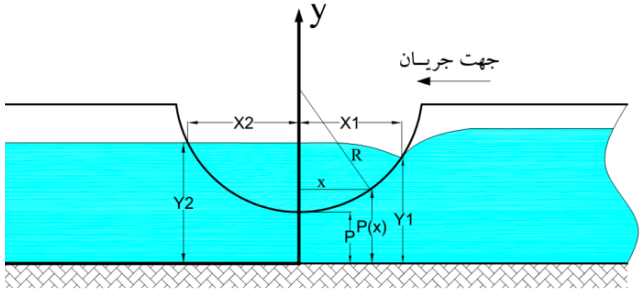
$$\frac{dy}{dx} = \frac{S_0 - S_f - \left(\frac{\alpha Q}{gA^2}\right).\left(\frac{dQ}{dx}\right)}{1 - \alpha Q^2 \frac{B}{gA^3}} = \frac{S_0 - S_f - \left(\frac{\alpha Q}{gA^2}\right).\left(\frac{dQ}{dx}\right)}{1 - F_r^2}$$

در رابطهٔ ۳، Fr عدد فرود جریان است. در سرریزهای جانبی بر اساس رژیم جریان، پروفیل سطح آب ممکن است صعودی یا نزولی باشد. در این تحقیق سرریز جانبی در رژیم جریان زیربحرانی بررسی شده است. در این شرایط پروفیل سطح آب در جهت جریان و در امتداد طولی سرریز به صورت صعودی خواهد بود. در سرریز جانبی دایره‌ای مقدار بده در واحد طول سرریز dQ/dx متفاوت از سرریز جانبی مستطیلی است. با فرض اینکه معادلهٔ سرریزهای معمولی برای هر المان از سرریزهای جانبی دایره‌ای نیز صادق باشد، خواهیم داشت:

(رابطهٔ ۴)

$$\frac{dQ}{dx} = \frac{2}{3}C_d\sqrt{2g}\left[y - p(x)\right]^{\frac{3}{2}} = \frac{2}{3}C_d\sqrt{2g}\left[y - (P + R - \sqrt{R^2 - x^2})\right]^{\frac{3}{2}}$$

در رابطهٔ ۴ y عمق آب در کانال اصلی نسبت به کف کانال، $P(x)$ ارتفاع تاج سرریز در موقعیت x از مرکز سرریز نسبت به کف کانال، P کمترین ارتفاع سرریز، R شعاع سرریز دایره‌ای و x فاصله از محور تقارن سرریز جانبی (محور y) است و مقدار آن در جهت جریان و در امتداد محور xها مثبت در نظر گرفته می‌شود (شکل ۱).



شکل ۱. ابعاد و مشخصات سرریز جانبی دایره‌ای

از جایگذاری معادلهٔ ۴ در معادلهٔ ۳، معادلهٔ دیفرانسیل حاکم بر جریان متغیر مکانی برای سرریز جانبی دایره‌ای به دست می‌آید.

(رابطهٔ ۵)

$$\frac{dy}{dx} = \frac{S_0 - S_f + \left(\frac{\alpha Q}{gA^2}\right).\frac{2}{3}C_d\sqrt{2g}\left(y - (P + R - (R^2 - x^2)^{0.5})\right)^{\frac{3}{2}}}{1 - F_r^2}$$

با فرض $S_0=0$ و $S_f=0$ یا $S_0-S_f=0$ معادلهٔ (۵) به شکل زیر تبدیل می‌شود.

(رابطهٔ۶)

$$\frac{dy}{dx}=\frac{\left(\frac{\alpha Q}{gA^2}\right)\frac{2}{3}C_d\sqrt{2g}\left(y-\left(P+R-\left(R^2-x^2\right)^{0.5}\right)\right)^{\frac{3}{2}}}{1-F_r^2}$$

که در رابطهٔ بالا بده Q برابر است با:

(رابطهٔ ۷) $$Q=By\sqrt{2g\left(E_1-y\right)}$$

در رابطهٔ ۷ E_1 انرژی مخصوص در ابتدای سرریز و B عرض کانال مستطیلی است. Demarchi (1934) از رابطهٔ دینامیکی جریان متغیر مکانی برای سرریز جانبی مستطیلی در کانال مستطیلی انتگرال‌گیری کرد و رابطه‌ای را برای طراحی این‌گونه سرریزها پیشنهاد داد. اما حل تحلیلی معادلهٔ متغیر مکانی در سرریز جانبی دایره‌ای که شدیداً غیرخطی است، عملاً ناممکن است. بنابراین، معادلهٔ ۷ باید با استفاده از روش‌های عددی حل شود. در تحقیق حاضر، برای به‌دست آوردن بده عبوری از سرریز جانبی دایره‌ای علاوه بر حل عددی معادلهٔ ۶، از دو روش دیگر نیز استفاده شده است که در ادامه به آن می‌پردازیم.

تقریب معادلهٔ سرریز جانبی نیم‌دایره‌ای با فرض خطی‌بودن پروفیل سطح آب

در حالت کلی، پروفیل سطح آب در طول سرریز جانبی منحنی‌شکل است، اما با تقریب مناسب می‌توان آن را خطی فرض کرد. در این روش، شیب سطح آب به صورت تابعی از مشخصات هندسی و هیدرولیکی با استفاده از داده‌های آزمایشگاهی تعیین می‌شود. در صورت مشخص‌بودن شیب سطح آب، معادلهٔ بده عبوری از سرریز جانبی با استفاده از رابطهٔ سرریز دایره‌ای معمولی به صورت زیر توسعه‌پذیر است. با فرض اینکه معادلهٔ بده سرریز معمولی برای المان‌های جزئی سرریز جانبی قابل استفاده باشد، خواهیم داشت:

(رابطهٔ ۸) $$Q_S=\frac{2}{3}C_d\sqrt{2g}\int_{x_1}^{x_2}\left[y(x)-P(x)\right]^{1/5}dx$$

در این رابطه Q_s بده سرریزشده از سرریز جانبی، C_d ضریب بده، g شتاب ثقل، $y(x)$ عمق آب در فاصلهٔ x از محور y و $P(x)$ ارتفاع تاج سرریز در فاصلهٔ x از محور سرریز (محور y) است. درصورتی که پروفیل خطی سطح آب دارای شیب S_w باشد، خواهیم داشت:

(رابطهٔ ۹)

$$y(x)=y_1+(x-x_1)\,S_w=S_wx+y_1-S_wx_1$$

و $p(x)$ برابر است با:

(رابطهٔ ۱۰) $$P(x)=P+R-\sqrt{R^2-x^2}$$

با جایگذاری رابطه‌های ۹ و ۱۰ در معادلهٔ ۸، خواهیم داشت:

(رابطهٔ ۱۱)

$$Q=\frac{2}{3}C_d\sqrt{2g}\int_{x_1}^{x_2}\left[y_1+(x-x_1)S_w-\left(P+R-\sqrt{R^2-x^2}\right)\right]^{1.5}dx$$

x_1 و x_2 در رابطهٔ ۱۱ از معادلات زیر به دست می‌آید:

(رابطهٔ ۱۲) $$x_1=-\sqrt{R^2-(R+P-y_1)^2}$$

(رابطهٔ ۱۳) $$x_2=\sqrt{R^2-(R+P-y_1-2\,S_wx_1)^2}$$

همان‌طور که ملاحظه می‌شود، x_1 مقداری منفی و x_2 مقداری مثبت است. پس از ساده‌سازی رابطهٔ ۱۱ خواهیم داشت:

(رابطهٔ ۱۴)

$$Q=\frac{2}{3}C_d\sqrt{2g}\int_{x_1}^{x_2}\left[y_1+S_wx-S_wx_1-P-R+\sqrt{R^2-x^2}\right]^{1/5}dx$$

با تغییر متغیر به‌صورت $x=tR$ در انتگرال ۱۴ خواهیم داشت:

(رابطهٔ ۱۵)

$$Q=\frac{2}{3}C_d\sqrt{2g}R^{2.5}\int_{x_1}^{x_2}\left[\frac{y_1-S_wx_1-P-R}{R}+S_wt+\sqrt{1-t^2}\right]^{1/5}dx$$

و یا

(رابطهٔ ۱۶)

$$Q=\frac{2}{3}C_d\sqrt{2g}R^{2/5}\int_{t_1}^{t_2}\left[b+S_wt+\sqrt{1-t^2}\right]^{1/5}dx$$

در رابطهٔ فوق $b=(y_1-S_wx_1-P-R)/R$، $t_1=x_1/R$ و $t_1=x_1/R$. انتگرال فوق حل تحلیلی ندارد. این انتگرال را می‌توان با استفاده از روش‌های انتگرال‌گیری عددی مانند گوس کوادراچر، با دقت مناسب تخمین زد.

در صورتی که $\eta=-\frac{t_2-t_1}{2\sqrt{3}}+\frac{t_2+t_1}{2}$ و $\mu=-\frac{t_2-t_1}{2\sqrt{3}}-\frac{t_2+t_1}{2}$، انتگرال ۱۶ با استفاده از روش گوس کوادراچر به‌صورت زیر تبدیل می‌شود (Gerald and Wheatley, 1994):

(رابطهٔ ۱۷)

$$Q_s=\frac{2}{3}C_d\sqrt{2g}R^{2/5}\frac{t_2-t_1}{2}\left[2b+S_w(\eta+\mu)+(1-\mu^2)+(1-\eta)^2\right]^{1/5}$$

در رابطهٔ ۱۷، Q_S بده سرریزشده از سرریز جانبی، C_d

ضریب بده جریان، g شتاب ثقل، R شعاع سرریز جانبی، S_w شیب سطح آب در طول سرریز جانبی و مقادیر t_1، t_2، b، μ و η از روابط ارائه‌شده محاسبه می‌شود.

استفاده از معادلهٔ سرریز معمولی دایره‌ای

یکی از روش‌های ساده و کاربردی، استفاده از معادلات سرریزهای معمولی در سرریزهای جانبی است. Vatankhah (2010) رابطهٔ ۱۸ را برای محاسبهٔ بده عبوری از سرریز دایره‌ای پیشنهاد داد.

(رابطهٔ ۱۸)

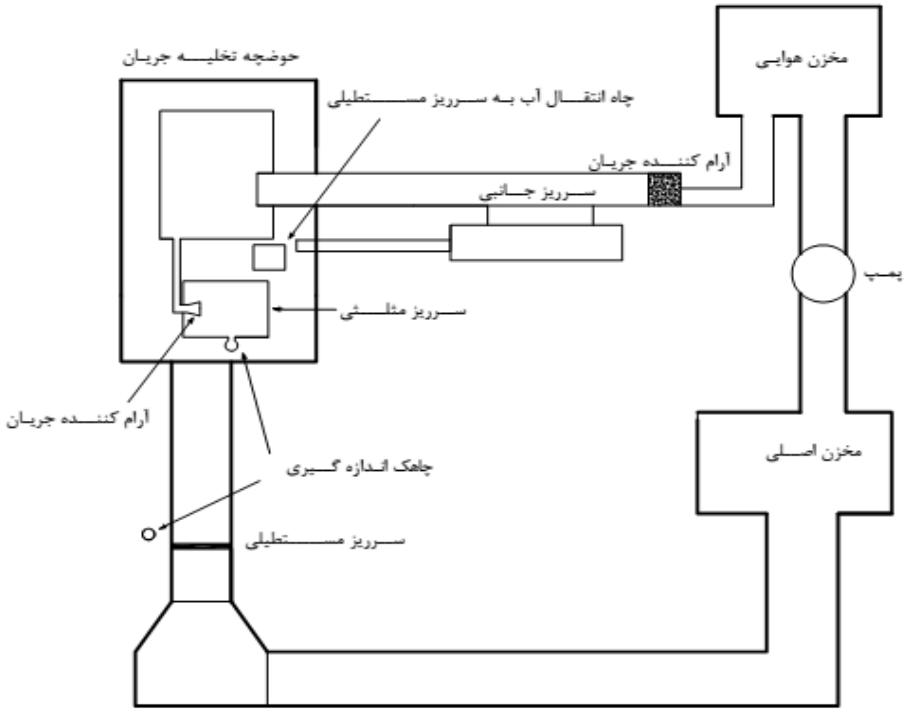
$$Q = ۰/۳۹۲۶\ C_d \sqrt{۲g} H^{\frac{۳}{۲}} D \eta^{\frac{۱}{۲}} (\sqrt{۱-۰/۲۲\eta} + \sqrt{۱-۰/۷۷۳\eta})$$

که در آن H هد آب بر روی سرریز، D قطر سرریز و $\eta=H/D$ است.

در سرریزهای معمولی عمق آب در طول سرریز یکسان است، اما در سرریزهای جانبی علاوه بر تغییرات سطح آب در عرض کانال، سطح آب در طول سرریز نیز تغییر می‌کند. در نتیجه، با واسنجی ضریب بده می‌توان از معادلات سرریزهای معمولی برای تخمین بده در سرریزهای جانبی استفاده کرد.

مشخصات تجهیزات آزمایشگاهی

به منظور بررسی مشخصات هیدرولیکی سرریز جانبی دایره‌ای، مدلی فیزیکی در آزمایشگاه هیدرولیک گروه آبیاری و آبادانی دانشگاه تهران ساخته و آزمایش‌هایی روی جریان آب عبوری از این نوع سرریز انجام شد. کانال اصلی مورد استفاده کانالی با چارچوب فلزی و بدنهٔ شیشه‌ای به طول ۱۲ متر، عرض ۰/۲۵ متر و ارتفاع ۰/۵ متر بود. مقدار بده در کانال اصلی بعد از سرریز جانبی با سرریز مثلثی لبه تیز با زاویهٔ رأس ۲۹ درجه اندازه‌گیری شد. این سرریز مثلثی با جریان‌سنج مغناطیسی با دقت ۰/۲± تا ۰/۵± درصد واسنجی شده بود. بده سرریزشده از سرریز جانبی با استفاده از کانال انتقال به بده سرریز مثلثی یادشده افزوده شد و بده کل از یک سرریز مستطیلی عبور کرد (شکل ۲).



شکل ۲. نمایی از تجهیزات آزمایشگاهی مورد استفاده و قسمت‌های مختلف آن

برای اندازه‌گیری پروفیل سطح آب در طول سرریز جانبی از عمق‌سنجی با دقت ۰/۱± میلی‌متر استفاده شد. به منظور کنترل و ایجاد شرایط متناسب برای جریان، دریچه‌ای کشویی در پایین‌دست جریان (انتهای کانال) قرار داده شد. سرریزهای جانبی مورد استفاده در این تحقیق از جنس پلکسی‌گلاس بود که با دستگاه برش لیزری به‌طور دقیق برش داده شده بودند. همچنین، سه سرریز نیم‌دایره‌ای به قطرهای ۲۵، ۳۰ و ۴۰ سانتی‌متر استفاده شد. لبهٔ این سرریزها پس از برش دقیق لیزری با فرز تراشکاری به‌طور مناسب به‌صورت ۴۵ درجه فارسی‌بر شد. سپس هرکدام از این سرریزها در ۳ ارتفاع ۵، ۱۰ و ۱۵ سانتی‌متر نصب شد. در هر نصب علاوه بر تغییر بده بالادست سرریز، عمق پایین دست نیز توسط دریچه تغییر

می‌کرد. محدودهٔ تغییرات متغیرها در آزمایش‌های انجام‌شده در جدول ۱ آمده است.

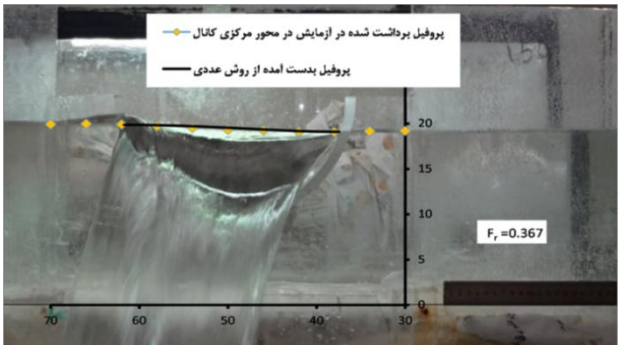
جدول ۱. محدودهٔ تغییرات متغیرها

قطر سرریز (Cm)	۲۵،۳۰،۴۰
ارتفاع سرریز (Cm)	۵،۱۰،۱۵
عرض کانال (Cm)	۲۵
عمق بالادست سرریز (Cm)	۱۰/۳۵-۲۸/۰۳
عمق پایین‌دست سرریز (Cm)	۱۰/۵۴-۲۸/۳۳
عدد فرود بالادست	۰/۱۷۳ -۰/۸۱۵
عدد فرود پایین‌دست	۰/۰۶۹ -۰/۵۱۷

نتایج و بحث

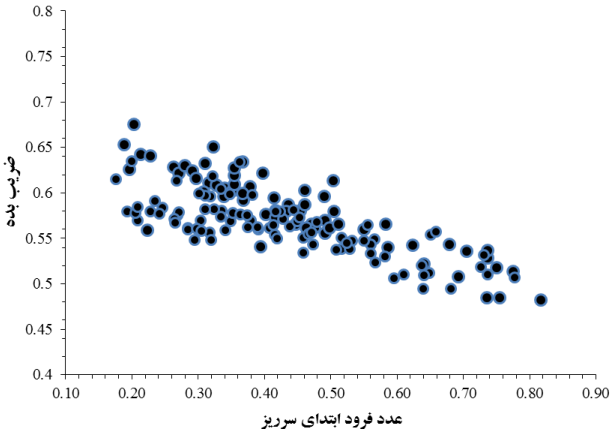
بررسی حل عددی جریان متغیر مکانی در سرریز جانبی دایره‌ای

برای نمونه پروفیل سطح آب مربوط به یکی از آزمایش‌ها در برابر پروفیل به‌دست آمده از روش حل عددی (معادلهٔ ۶) با استفاده از روش رانگ کوتای مرتبهٔ ۴ در شکل ۳ نشان داده شده است (پروفیل‌ها مربوط به محور مرکزی کانال است).



شکل ۳. مقایسهٔ پروفیل‌های برداشته در محور مرکزی کانال و پروفیل‌های به‌دست آمده از روش حل عددی

همان‌طور که از پروفیل‌ها مشاهده می‌شود، روش عددی، پروفیل سطح آب را درصورت داشتن ضریب بده مناسب، به خوبی پیش‌بینی می‌کند. نکتهٔ مهم در پیش‌بینی بده خارج‌شده و پروفیل سطح آب، معادله‌ای مناسب به منظور برآورد ضریب بده است. ضریب بده در روش عددی بر اساس بهینه‌سازی و به حداقل رساندن مجموع مربعات بین بده آزمایشگاهی و بده حاصل از معادلهٔ دیفرانسیل ۶ تعیین می‌شود. ضرایب بده محاسبه‌شده از روش عددی در برابر عدد فرود در بالادست سرریزجانبی برای قطرهای مختلف سرریز جانبی (کل داده‌های آزمایشگاهی) در شکل ۴ نشان داده شده است.



شکل ۴. نمودار ضریب بده بر اساس روش حل عددی در مقابل عدد فرود در ابتدای سرریز

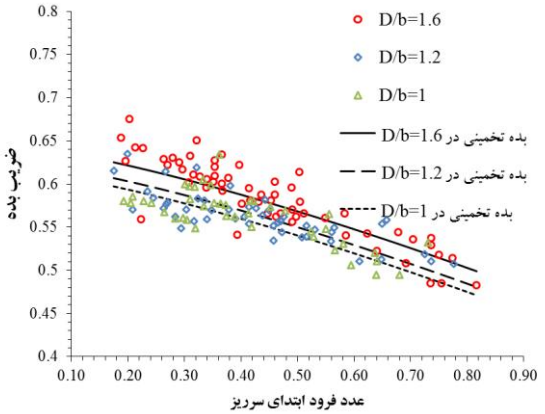
همان‌طور که در نمودار مشهود است، با افزایش عدد فرود، مقدار ضریب بده کاهش می‌یابد. با افزایش عدد فرود نسبت نیروی اینرسی در جهت جریان به نیروی ثقل بیشتر می‌شود و جریان تمایل کمتری به ریزش از سرریز جانبی دارد و بدین ترتیب ضریب بده کاهش می‌یابد. اگرچه روش عددی نسبت به سایر روش‌های استفاده‌شده در این تحقیق از اصول هیدرولیکی قوی‌تری برخوردار است و پروفیل سطح آب را به‌خوبی پیش‌بینی می‌کند، اما باید توجه داشت که روش عددی دارای هزینه محاسباتی زیادی نسبت به سایر روش‌هاست. بنابراین، استفاده از روش‌های ساده‌تر برای استفاده در کارهای عملی ارجح است.

استخراج رابطه‌ای برای تعیین ضریب بده در حل عددی

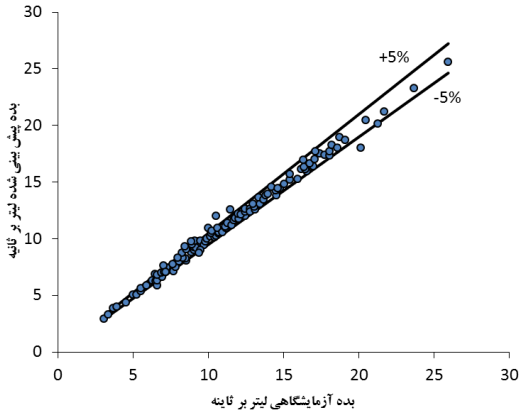
ضریب بده در سرریز جانبی دایره‌ای تابعی از قطر سرریز، ارتفاع سرریز، سرعت جریان، ارتفاع آب در بالادست و پایین‌دست، عرض کانال، لزج‌بودن سیال، شتاب ثقل، کشش سطحی سیال و چگالی سیال است. با استفاده از آنالیز ابعادی، نسبت‌های بی‌بعد عدد فرود بالادست Fr_1، عدد فرود پایین‌دست Fr_2، عدد رینولدز بالادست Re_1، عدد رینولدز پایین‌دست Re_2، عدد وبر We، نسبت قطر سرریز به عرض کانال D/B، نسبت ارتفاع آب در بالادست سرریز به عرض کانال y_1/B، نسبت ارتفاع آب در پایین‌دست سرریز به عرض کانال y_2/B و نسبت ارتفاع سرریز به عرض کانال P/B به دست می‌آید. با حذف پارامترهای بی‌بعد کم‌تأثیر مشخص شد که ضریب بده تابعی از عدد فرود بالادست و نسبت بی‌بعد قطر سرریز به عرض کانال است و مابقی متغیرهای بی‌بعد تأثیر کمتری در تعیین ضریب بده دارد. در نهایت، با به حداقل‌رساندن خطای بده تخمینی، رابطهٔ ۱۹ برای تعیین ضریب بده در حل عددی به دست آمد.

$$C_d = -0/1895\ Fr_1^{1/335} + 0/061\left(\frac{D}{B}\right)^{-0/801} + 0/555 \quad \text{(رابطهٔ ۱۹)}$$

متوسط درصد خطای معادلهٔ فوق در تخمین بده برابر با ۲/۷ درصد است و تنها ۱۳ درصد از ضریب بده‌های تخمینی از این معادله دارای خطایی بیش از ۵ درصد است. شکل ۵ ضریب بده را در برابر عدد فرود به تفکیک قطر سرریز نشان می‌دهد. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، اثر قطر به‌خوبی تفکیک شده است.



شکل ۵. ضریب بده در برابر عدد فرود به تفکیک قطرهای مورد آزمایش

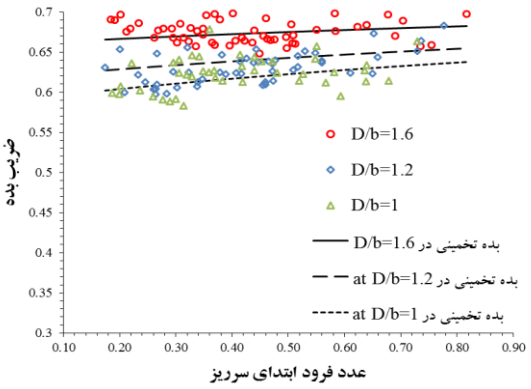


شکل ۶. مقایسهٔ بده پیش‌بینی‌شده در روش عددی در برابر بده آزمایشگاهی

شکل ۶ نیز مقدار بده پیش‌بینی‌شده در صورت استفاده از معادلهٔ ۱۹ را در برابر بده واقعی نشان می‌دهد. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، اکثر بده‌های تخمینی در باند خطای ±۵٪ قراردارد.

در نظر گرفتن معادلات سرریزهای معمولی برای سرریزهای جانبی

تاکنون در بسیاری از تحقیقات از معادلهٔ سرریزهای معمولی برای سرریزهای جانبی استفاده شده است (Cosar and Aggaioglu, 2004; Pathirana et al., 2006; Emiroglu et al., 2011; May, 2003). در اکثر این تحقیقات عمق ابتدای سرریز (y_1) عمق شاخص در نظر گرفته شده است. در این تحقیق نیز عمق ابتدایی سرریز در محور مرکزی کانال عمق شاخص انتخاب شده است. به‌دلیل اینکه ارتفاع آب (هد روی سرریز) در رژیم جریان زیربحرانی در طول سرریز جانبی افزایش می‌یابد، در صورت فرض عمق ابتدایی به عنوان عمق شاخص، هد آب روی سرریز کمتر از مقدار واقعی تخمین زده می‌شود. به همین دلیل مقدار ضرایب بده محاسبه‌شده در این روش در مقایسه با سایر روش‌ها بیشتر است. به عبارت دیگر، ضریب بده با افزایش عدد فرود در این روش افزایش می‌یابد (شکل ۷).



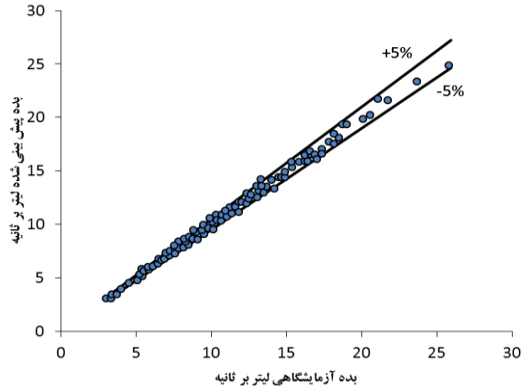
شکل ۷. ضرایب بده در برابر عدد فرود به تفکیک قطرهای آزمایش‌شده و مقایسه با معادلهٔ تخمین ضریب بده

با استفاده از حداقل‌کردن مجموع خطای بده تخمینی، رابطهٔ ۲۰ برای تعیین ضریب بده در صورت استفاده از عمق ابتدایی به دست می‌آید.

$$C_d = \frac{(0/242 + 0/864 Fr_1 + 1/0518\left(\frac{D}{b}\right))}{(1 + 1/147 Fr_1 + 1/199\left(\frac{D}{b}\right))} \quad \text{(رابطهٔ ۲۰)}$$

درصد خطای متوسط در این معادله ۲/۳۵ درصد است و ۶/۳۶ درصد از داده‌ها دارای خطای بیش از ۵ درصد است.

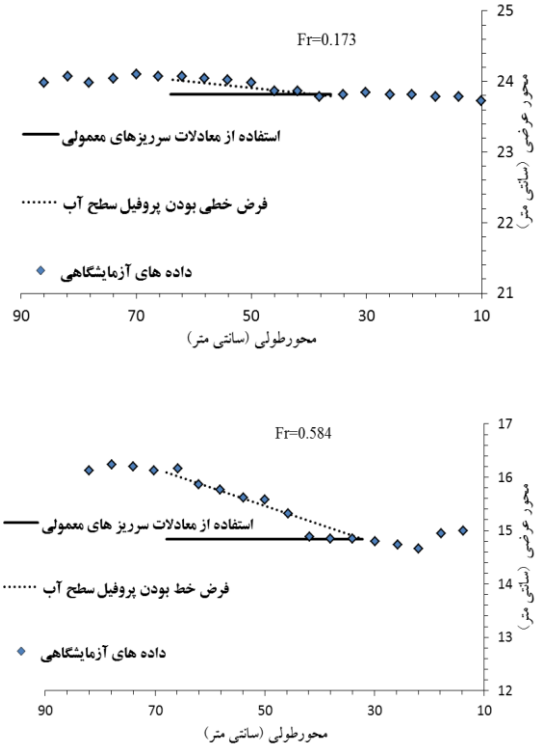
در شکل ۸ نیز بده آزمایشگاهی در برابر بده به‌دست آمده از معادلهٔ ۲۰ نشان داده شده است.



شکل ۸. مقایسهٔ بده به‌دست آمده از معادلات سرریزهای معمولی با قراردادن عمق ابتدایی به عنوان شاخص و بده آزمایشگاهی

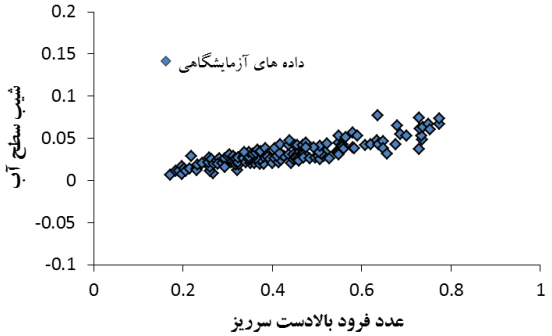
بررسی روش فرض خطی پروفیل سطح آب روی سرریز جانبی

پروفیل سطح آب روی سریز جانبی در واقع منحنی است اما می‌توان با تقریب مناسب آن را خطی فرض کرد. برای نمونه تعدادی از پروفیل‌های برداشت‌شده در آزمایش‌ها در مقایسه با فرض خطی‌بودن پروفیل (همچنین، پروفیل ثابت در روش سرریز معمولی) در شرایط مختلف عدد فرود در شکل ۹ نشان داده شده است.



شکل ۹. مقایسهٔ داده‌های آزمایشگاهی و فرض خطی‌بودن پروفیل سطح آب برای دو عدد فرود مختلف

از بررسی نمودارهای شکل ۹ مشاهده می‌شود که فرض خطی‌بودن پروفیل سطح آب، فرضی منطقی است. شیب سطح آب در سرریزهای جانبی به عوامل متعددی بستگی دارد، اما مهم‌ترین عاملی که شیب سطح آب را تحت تأثیر قرارمی‌دهد، عدد فرود جریان در بالادست سرریز جانبی است.



شکل ۱۰. رابطهٔ بین شیب سطح آب در طول سرریز جانبی و عدد فرود بالادست سرریز

شکل ۱۰ رابطهٔ شیب سطح آب در آزمایش‌های مختلف را نسبت به عدد فرود نشان می‌دهد. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، شیب سطح آب بستگی زیادی به عدد فرود دارد و با افزایش عدد فرود افزایش می‌یابد. این موضوع با ترسیم منحنی‌های انرژی مخصوص در بالادست و پایین‌دست سرریز به ازای انرژی مخصوص ثابت توصیف‌پذیر است. در این حالت اختلاف بین شاخه‌های زیربحرانی در بالادست و پایین‌دست سرریز با افزایش عدد فرود افزایش و بنابراین شیب متوسط سطح آب افزایش می‌یابد.

با توجه به شکل ۱۰شیب سطح آب در طول سرریز از معادلهٔ ۲۱ تخمین زده می‌شود.

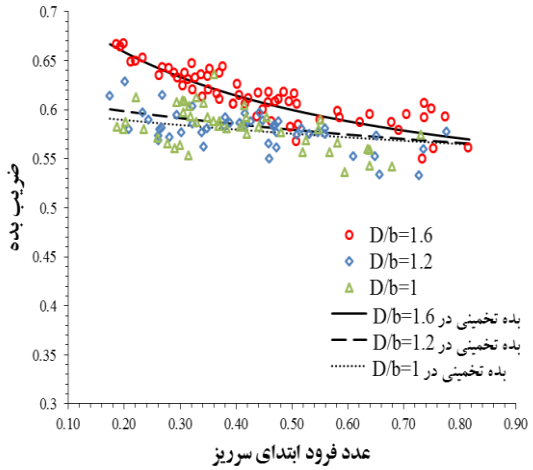
$$S = ۰/۰۷۶\, Fr_۱^{۱/۱۰۵} \qquad \text{(رابطهٔ ۲۱)}$$

ضریب بده در این روش نیز تابعی از Fr_1 و $\frac{D}{B}$ است و از معادلهٔ ۲۲ تخمین‌زده می‌شود که:

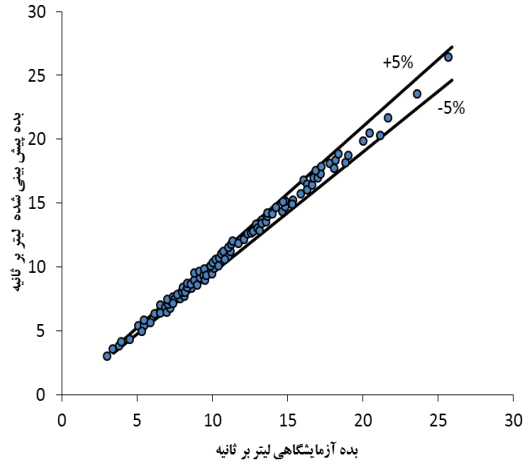
$$C_d = \frac{(۰/۵۷۸ + ۰/۱۲۱\, Fr_۱ - ۰/۳۱۷\, (\frac{D}{B}))}{(۱ - ۰/۲۴۹\, Fr_۱ - ۰/۵۶۶\, (\frac{D}{B}))} \qquad \text{(رابطهٔ ۲۲)}$$

متوسط درصد خطای استفاده از معادلهٔ ۲۲ در تعیین ضریب بده برابر با ۲/۲ درصد و ۴/۵ درصد از داده‌ها دارای خطای بیش از ۵ درصد است.

در شکل ۱۱ مقدار ضریب بده به تفکیک قطر در برابر عدد فرود، همچنین مقادیر ضریب بده در قطرهای مختلف با استفاده از معادلهٔ ۲۲ در تعیین ضریب بده نشان داده شده است.



شکل ۱۱. ضریب بده در صورت فرض خطی‌بودن پروفیل سطح آب به تفکیک قطر در برابر عدد فرود



شکل ۱۲. بده آزمایشگاهی در برابر با بده پیش‌بینی‌شده در صورت فرض خط‌بودن پروفیل سطح

شکل ۱۲ رابطهٔ بین بده آزمایشگاهی و بده تخمینی در صورت فرض خط‌بودن پروفیل سطح آب را نشان می‌دهد. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، اکثر بده‌های تخمینی در باند خطای ۵٪± قراردارد.

بازبینی و بررسی مجدد روش‌های مختلف با انجام چند آزمایش شاهد جدید

با توجه به اینکه دقت اکثر معادلات ارائه‌شده نزدیک به هم است، برای بررسی دقیق‌تر این روش‌ها، سه سری آزمایش دیگر با بده زیاد و ارتفاع‌های متفاوت از آزمایش‌های قبلی انجام شد. در این آزمایش‌ها از سرریز دایره‌ای با قطر ۴۰ و ارتفاع ۷/۵ سانتی‌متر از کف کانال استفاده شد. مشخصات این آزمایش‌ها در جدول ۲ درج شده است.

جدول ۲. مشخصات آزمایش‌های سری دوم به منظور بررسی روش‌های مختلف

شمارهٔ آزمایش	بده بالادست (لیتر بر ثانیه)	بده سرریزشده از سرریز (لیتر بر ثانیه)	عدد فرود
۱	۵۹/۵۴	۳۷/۱۵	۰/۶۰۹
۲	۴۱/۵۷	۲۱/۱۲	۰/۵۸۰
۳	۳۶/۴۵	۱۴/۳۹	۰/۶۳۳

در جدول نیز بده پیش‌بینی‌شده از روش‌های مختلف در برابر بده آزمایشگاهی نشان داده شده است.

جدول ۳. بده تخمین‌زده‌شده از روش‌های مختلف و مقایسه با داده‌های آزمایشگاهی سری دوم

شمارهٔ آزمایش	بده آزمایشگاهی (لیتر بر ثانیه)	بده سرریز معمولی (لیتر بر ثانیه)	خطا (٪)	بده در صورت خطی فرض‌کردن سطح آب (لیتر بر ثانیه)	خطا (٪)
۱	۳۷/۱	۳۹/۵	۶/۳	۳۸/۴	۳/۳
۲	۲۱/۱	۲۲/۱	۴/۶	۲۱/۸	۳/۳
۳	۱۴/۳	۱۳/۹	۳	۱۴/۶	۱/۴
متوسط درصد خطاها			۴/۶۳		۲/۶۶

در جدول ۲ مشاهده می‌شود که روش خطی‌فرض‌کردن پروفیل سطح آب نسبت به استفاده از معادلات سرریزهای معمولی دقت مناسب‌تری دارد. روش خطی‌فرض‌کردن پروفیل سطح آب، در مواقعی که بده سرریزشده از سرریز جانبی زیاد باشد، قابلیت پیش‌بینی بده را به خوبی داراست. اما در مواقعی که طراح روش ساده‌تری برای طراحی نیاز باشد، می‌توان از معادلهٔ سرریزهای معمولی با قراردادن عمق ابتدایی به منزلهٔ عمق شاخص استفاده کرد.

نتیجه‌گیری

در این تحقیق سرریزجانبی دایره‌ای به صورت آزمایشگاهی و نظری بررسی شده است. روش‌های متعددی به منظور تخمین بده استفاده شد. روش حل عددی پروفیل سطح آب دارای کمترین فرضیه‌ها برای مشخص‌کردن بده در سرریزجانبی دایره‌ای است، اما این روش هزینهٔ محاسباتی زیادی دارد. به این دلیل روش‌های ساده‌تری برای تخمین بده در سرریزهای جانبی دایره‌ای توسعه داده شد. با استفاده از معادلات سرریزهای معمولی و روش خطی‌فرض‌کردن پروفیل سطح آب معادلاتی برای تخمین مقدار بده خروجی از سرریز جانبی دایره‌ای توسعه داده شد. برای هر کدام از روش‌ها، روابطی برای تعیین ضریب بده ارائه شد. با بازبینی روش‌ها مشخص شد که روش خطی‌فرض‌کردن پروفیل سطح آب از دقت مناسب‌تری در تخمین بده در سرریزهای جانبی دایره‌ای برخوردار است، بنابراین برای استفاده در عمل پیشنهاد می‌شود.

سپاسگزاری

تحقیق حاضر با حمایت «قطب ارزیابی و بهسازی شبکه‌های آبیاری و زهکشی» انجام شده است. بدین وسیله از قطب یادشده و از دانشگاه تهران که فضا و امکانات لازم را فراهم کرد تشکر و قدردانی می‌شود.

REFERENCES

Borghei, S. M., Jalili, M. R., and Ghodsian, M. (1999). Discharge coefficient for sharp-crested side weir in subcritical flow. *Journal of Hydraulic Engineering*, 125(10), 1051-1056.

Cosar, A., and Agaccioglu, H. (2004). Discharge coefficient of a triangular side-weir located on a curved channel. *Journal of irrigation and drainage engineering*,130(5), 410-423.

De Marchi, G. (1934). Saggio di teoria del funzionamento degli stramazzi laterali. L'Energia elettrica, 11(11), 849-860.

El-Khashab, A., and Smith, K. V. (1976). Experimental investigation of flow over side weirs. *Journal of the Hydraulics Division*, 102(9), 1255-1268.

Emiroglu, M. E., Agaccioglu, H., and Kaya, N. (2011). Discharging capacity of rectangular side weirs in straight open channels. *Flow Measurement and Instrumentation*, 22(4), 319-330.

Frazer, W. (1957). The behavior of side weirs in prismatic rectangular channel. Hydraulic papers No 14. Symposium of four papers on side spillways. In ICE Proceedings, 6(2), 305-328.

Gerald CF and Wheatley PO (1994) Applied Numerical Analysis. Addison-Wesley, Boston, MA, USA.

Ghodsian, M. (2004). Flow over triangular side weir. Scientia Iranica, 11(1-2), 114-120.

Kumar, C. P., and Pathak, S. K. (1987). Triangular side weirs. *Journal of irrigation and drainage engineering*, 113(1), 98-105.

May, R. W. (2003). Hydraulic design of side weirs. Thomas Telford.

Muslu, Y. (2001). Numerical analysis for lateral weir flow. *Journal of irrigation and drainage engineering*, 127(4), 246-253.

Pathirana, K. P. P., Munas, M. M., and Jaleel, A. L. A. (2006). Discharge coefficient for sharp-crested side weir in supercritical flow. *J. Institution Eng*, 39(2), 17-24.

Rahimpour, M., Keshavarz, Z., and Ahmadi, M. M. (2011). Flow over trapezoidal side weir. *Flow Measurement and Instrumentation*, 22(6), 507-510.

Te Chow, V. (1959). Open channel hydraulics.

Uyumaz, A., and Smith, R. H. (1991). Design procedure for flow over side weirs. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 117(1), 79-90.

Vatankhah, A. R. (2010). Flow measurement using circular sharp-crested weirs. *Flow Measurement and Instrumentation*, 21(2), 118-122.

Vatankhah, A. R. (2012). Analytical solution for water surface profile along a side weir in a triangular channel. *Flow Measurement and Instrumentation*, 23(1), 76-79.