

افزایش راندمان سرریزهای جانبی ساده با استفاده از صفحات هادی یا گروه شمع

عبدالرضا کبیری سامانی^۱

حجت اسماعیلی^۲

منوچهر حیدرپور^۳

(دریافت ۸۸/۹/۱۵ پذیرش ۸۹/۴/۱۰)

چکیده

سرریزها از کاربردی ترین سازه‌های هیدرولیکی هستند که برای مقاصد مختلف مانند اندازه‌گیری دبی، استهلاک انرژی، انحراف جریان، تنظیم سطح آب و کنترل سیلاب توسط مهندسان هیدرولیک مورد استفاده قرار گرفته‌اند. در سرریزهای جانبی، آستانه کنترل در کنار و به موازات کانال اصلی قرار می‌گیرد و به مجرد بالا آمدن سطح آب تا رقوم بیشتر از آستانه سرریز، انحراف آب به کانال جانبی صورت می‌پذیرد. این نوع سرریزها معمولاً در سیستم‌های زهکشی و کنترل سیلاب، جمع‌آوری آبهای سطحی و بسیاری از پروژه‌های منابع آب و محیط زیست کاربرد دارند. محاسبات سرریزهای جانبی بر اساس جریان متغیر مکانی انجام می‌شود. در این مقاله به بررسی و مطالعه روشهایی برای افزایش راندمان سرریزهای جانبی پرداخته شد. به این منظور استفاده از گروه صفحات هادی یا گروه شمع در حالت‌های تک، دوگانه و سه‌گانه پیشنهاد شد. در ابتدا بر اساس معادلات حاکم (قوانین بقای اندازه حرکت و پیوستگی) و اعمال فرضیات مناسب، معادلاتی برای تعیین نیروی دینامیکی وارد بر این سازه‌ها در کانال، تعیین پروفیل سطح آب و نیز تعیین ضریب دبی جریان عبوری از سرریز جانبی در حضور سازه‌های مورد بحث ارائه شد و سپس با استفاده از نتایج مدل آزمایشگاهی و اندازه‌گیری‌های انجام شده به واسطه نتایج تحلیلی و ارائه روابطی برای تعیین ضریب دبی جریان پرداخته شد. بررسی نتایج تحلیلی و آزمایشگاهی نشان داد که در صورت استفاده از صفحات هادی و گروه شمع می‌توان ضریب دبی جریان را تا حدود ۳۰ درصد افزایش داد.

واژه‌های کلیدی: سرریز جانبی، مدل تحلیلی، مدل آزمایشگاهی، صفحات هادی، گروه شمع

Improving Performance of Side Weirs Using Groups of Vane Plates or Piles

Abdorrezza Kabiri-Samani¹

Hojat Esmaili²

Manochehr Heidarpour³

(Received Dec. 6, 2009 Accepted July 1, 2010)

Abstract

Weirs are among the most common hydraulic structures that have been used for centuries by hydraulic engineers for flow measurement, energy dissipation, flow diversion, regulation of flow depth, and flood passage. Side weirs, or lateral weirs, are essentially free overflow weirs installed along the side of the main channel to divert flow over them when the surface of flow in the channel rises above their crest. These weirs are often used in irrigation and flood regulation systems, urban drainage, and many other water resources and environmental projects. The flow over side weirs falls under the category of spatially varied flow. In this paper, methods are presented based on analytical and experimental models for improving side weir performance. For this purpose, groups of (one, two, and three) vane plates or piles were employed. Analytical models were developed based on momentum and continuity equations for determination of dynamic force on vane plates or piles, water surface profile and discharge coefficient of side weir. Measured data were used for calibrating the analytical models and for presenting expressions for the discharge coefficient. Results show that the diverted discharge coefficient can be increased by up to 30% compared to the simple side weir discharge coefficient.

Keywords: Side Weir, Analytical Model, Experimental Model, Vane Plates, Groups of Piles.

1. Assist. Prof., Dept. of Civil Eng., Isfahan University of Tech., Isfahan (Corresponding Author) (+98 311) 3913829 akabiri@cc.iut.ac.ir

2. Graduated Student of Water-Civil Eng., Isfahan University of Tech., Isfahan

3. Assoc. Prof., College of Agriculture, Isfahan University of Tech., Isfahan

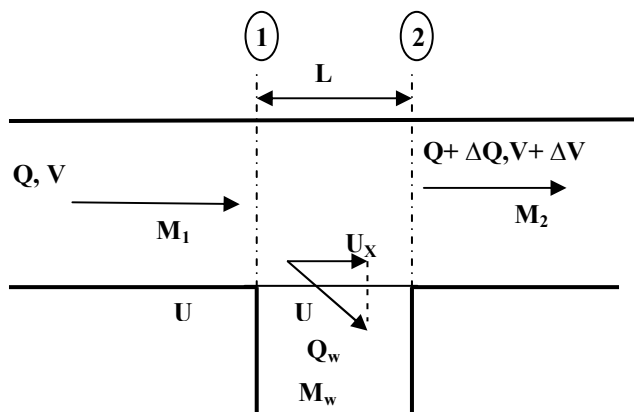
۱- استادیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی اصفهان (نویسنده مسئول) akabiri@cc.iut.ac.ir (۰۳۱۱) ۳۹۱۳۸۲۹

۲- دانش آموخته کارشناسی ارشد، مهندسی عمران-آب، دانشگاه صنعتی اصفهان

۳- دانشیار گروه آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه صنعتی اصفهان

[۲]. دی مارچی با انجام فرضیاتی معادله جریان متغیر مکانی با کاهش دبی را به صورت زیر خلاصه کرد

$$\frac{dy}{dx} = \frac{-\frac{QdQ}{gA^2 dx}}{1 - \frac{Q^2 B}{gA^3}} \quad (2)$$



شکل ۱- مشخصات جریان روی سرریزهای جانبی برای حل معادله اندازه حرکت

از طرفی دبی در واحد طول سرریز را نیز به صورت زیر بیان نمود

$$\frac{dQ}{dx} = -\frac{2}{3} C_M \sqrt{2g} (y-w)^{1.5} \quad (3)$$

که در این روابط

dy/dx تغییرات سطح آب، Q دبی، dQ/dx دبی در واحد طول سرریز، A سطح مقطع جریان، g شتاب ثقل، B عرض بالایی آب (که در کانال مستطیلی برابر عرض کانال است)، C_M ضریب شدت جریان (ضریب دی مارچی)، Y عمق جریان در هر نقطه و w ارتفاع سرریز است. دی مارچی نشان داد که پروفیل جریان خطی نبوده و دارای انحناست و با استفاده از علامت رابطه ۲ نشان داد که پروفیل جریان در حالت زیر بحرانی، صعودی و در حالت فوق بحرانی، نزولی است [۲]. اپکرز^۲ مقدار ضریب دبی را برای حالتی که y (عمق آب) در فاصله‌ای دور از سرریز جانبی اندازه‌گیری شود، 0.625 و برای حالتی که y در روی سرریز جانبی اندازه‌گیری شود، 0.725 پیشنهاد نمود [۳]. فرازر^۳ در سال ۱۹۵۷ نشان داد که پروفیل سطح آب در سرریزهای جانبی ۵ حالت ممکن دارد [۴]. سوبرامانیا^۴ و آواستی^۱ به دنبال مطالعات دی مارچی و با استفاده از

سرریزها از انواع سازه‌های هیدرولیکی هستند که با اهداف مختلف در سیستم‌های انتقال آب، شبکه‌های آبیاری و زهکشی، سیستم‌های جمع‌آوری آبهای سطحی، مجاری انتقال و تخلیه فاضلاب و تصفیه‌خانه‌های آب و فاضلاب به کار گرفته می‌شوند [۱]. یکی از انواع کاربرد سرریزها، سرریزهای جانبی است. از موارد کاربرد سرریزهای جانبی می‌توان به کنترل دبی و انحراف سیلاب و دبی مازاد در رودخانه‌ها و کانال‌ها اشاره کرد. رفتار هیدرولیکی جریان در مقطع کانال با سرریز جانبی از نوع جریان متغیر مکانی است. جریان متغیر مکانی به حالتی از جریان‌های دائمی گفته می‌شود که در آن، شدت جریان در طول کانال و در جهت جریان، افزایش و یا کاهش می‌یابد. در طرح‌های جدید به منظور جداسازی رسوب و کاهش بار بستر از سرریزهای جانبی استفاده می‌شود. یکی از انواع سرریزهای جانبی، سرریز جانبی با جریان متغیر مکانی با کاهش دبی است. در جریان‌های متغیر مکانی با کاهش دبی، شدت جریان در طول مسیر کاهش می‌یابد. در جریان متغیر مکانی با کاهش دبی که اساساً یک جریان انشعابی است، تقسیم دبی در طول مسیر جریان انجام می‌گیرد. تئوری جریان متغیر مکانی با کاهش دبی برای اولین بار در طراحی سرریزهای جانبی در کانال‌ها مطرح شد. با توجه به شکل ۱ چنانچه Q و V مقادیر دبی و سرعت در مقطع ۱، $Q + \Delta Q$ و $V + \Delta V$ مقادیر دبی و سرعت در مقطع ۲ ΔQ و ΔV نرخ تغییرات دبی و سرعت می‌باشند، U سرعت جریان انشعابی و U_x مؤلفه طولی سرعت جریان انشعابی باشد، با نوشتن معادله مومنتم در جهت جریان در کانال اصلی رابطه زیر حاصل می‌شود

$$M_2 - M_w - M_1 = P_1 - P_2 + W \sin \theta - F_f \quad (1)$$

که در این رابطه

M_1 ، M_2 و M_w به ترتیب مقادیر مومنتم جریان در مقاطع ۱ و ۲ و روی سرریز جانبی در جهت x ، P_1 و P_2 نیروهای ناشی از فشار هیدرواستاتیک در مقاطع ۱ و ۲، W وزن سیال در فاصله Δx ، θ زاویه کف کانال با افق و F_f نیروی ناشی از اصطکاک کف کانال در طول Δx است. با حل این معادله و جایگذاری ترم‌های رابطه و دیفرانسیل‌گیری در راستای x ، معادله دینامیکی جریان متغیر مکانی با کاهش دبی حاصل می‌شود.

اگرچه تا سال ۱۹۳۴ مطالعات محدودی در ارتباط با سرریزهای جانبی انجام شده بود، اما تحقیقات دی مارچی^۱ پایه و اساس مطالعات بعدی در ارتباط با این نوع سرریزها قرار گرفت

² Ackers

³ Frazer

⁴ Subramanya

¹ De- Marchi

تئوری او مطالعاتی روی سرریزهای جانبی انجام دادند و نشان دادند که بهترین محل برای اندازه‌گیری عمق جریان، محور کانال است [۵]. تامسون و همکاران^۲ ضمن نقد و بررسی روابط ارائه شده توسط سوبرامانیا و آواستی و در نظر گرفتن شرایط حدی فرود برابر یک، به این نتیجه رسیدند که C_M به سمت یک میل می‌کند [۶]. الخشاب^۳ و اسمیت^۴ با مطالعات آزمایشگاهی به این نتیجه رسیدند که اگر مؤلفه طولی سرعت روی سرریز، بزرگ‌تر از مؤلفه سرعت در کانال اصلی باشد ($U_x > V$)، فرض ثابت بودن انرژی در طول سرریز فرض صحیحی نیست [۷]. رانگا راجو و همکاران^۵ با استفاده از مدل آزمایشگاهی، ضریب دبی سرریزهای جانبی لبه تیز و لبه پهن مستطیلی با دیواره جانبی در کانال فرعی را مورد مطالعه قرار دادند [۸]. در زمینه‌ی سرریزهای جانبی، مطالعات آزمایشگاهی، تحلیلی و عددی متعددی انجام شده است [۹-۲۵]. اگر چه مطالعات انجام شده در ارتباط با سرریزهای جانبی در سالهای اخیر پیشرفت چشمگیری داشته است، اما با این وجود هنوز یک روش نهایی و کامل برای مقاصد طراحی، جامعیت پیدا نکرده است. با استفاده از تحلیل ابعادی در حالت کلی می‌توان نشان داد که تعداد پارامترهای موجود در معادله حاکم زیاد است. بنابراین ارائه دقیق معادلات مربوطه، ساده نیست. به این ترتیب برای شناخت بهتر مکانیسم رفتاری سرریزهای جانبی با فرم‌های هندسی مختلف و افزایش راندمان هیدرولیکی این سرریزها، لازم است مطالعات بیشتری صورت گیرد. بر این اساس در این مقاله با استفاده از مدل‌سازی تحلیلی و آزمایشگاهی به بررسی شرایط جریان روی سرریزهای جانبی و افزایش راندمان هیدرولیکی این سازه‌ها با استفاده از صفحات هادی و گروه شمع پرداخته شد. نتایج نشان داد که با تغییر وضعیت هیدرولیکی جریان در ناحیه عمل سرریز جانبی، با استفاده از گروه شمع و صفحات هادی و ایجاد مومنتم اضافی در راستای عبور جریان از روی سرریز، راندمان آن افزایش می‌یابد.

۲- مدل‌سازی تحلیلی جریان

با مراجعه به شکل ۲ و با نوشتن معادله اندازه حرکت بین مقاطع ۱ و ۲، رابطه ۴ حاصل می‌شود

(۴)

$$F_{p1} - F_{p2} - F_f - \sum F_i + Ws_0 = \rho(Q_2 V_2 - Q_w U_x - Q_1 V_1)$$

که در این رابطه

F_{p1} و F_{p2} نیروهای فشاری در دو مقطع ۱ و ۲، F_f نیروی ناشی از اصطکاک کف در طول سرریز، $\sum F_i$ نیروهای اعمالی از طرف صفحات هادی و گروه شمع بر حجم کنترل انتخابی، W وزن سیال المان حجم کنترل، s_0 شیب طولی کف کانال، ρ دانسیته سیال، Q_2 ، Q_1 ، Q_w دبی‌های مقاطع ۱، ۲ و عبوری از سرریز، V_1 و V_2 سرعت‌های جریان در مقاطع ۱ و ۲ و مؤلفه طولی سرعت جریان بر روی سرریز است. اگر صفحه‌ای در آب ساکن به صورت غوطه‌ور درآید، نیروی هیدرواستاتیکی P_s بر آن اعمال می‌شود. اگر این صفحه درون جریان سیال به صورت مستغرق درآید، نیروی هیدرودینامیکی P_d بر آن اعمال می‌شود که معادل است با

$$P_d = K_d P_s \quad (5)$$

که در این رابطه

K_d نسبت نیروی هیدرودینامیکی به نیروی هیدرواستاتیکی است. بنابراین برای گروهی از صفحات هادی و گروه شمع که درون کانال در مقابل جریان به صورت مستغرق نصب شده‌اند نیز می‌توان رابطه ۶ را نوشت

$$\sum F_i = K_d \gamma \Delta y \sum a_i \quad (6)$$

که در این رابطه

γ وزن مخصوص، Δy اختلاف عمق در دو طرف سازه و $\sum a_i$ جمع سطح تصویر صفحات هادی و گروه شمع در مقابل جریان است. با فرض مقطع مستطیلی برای کانال اصلی و در نظر گرفتن روابط زیر، معادله اندازه حرکت در فرم جدید قابل بسط است

$$W = \gamma BL \frac{y_1 + y_2}{2} \quad (7)$$

$$F_f = \tau_0 pL = \gamma R s_f pL = \gamma BL \frac{y_1 + y_2}{2} s_f \quad (8)$$

$$F_{p1} = B \gamma \frac{y_1^2}{2} \quad (9)$$

$$F_{p2} = B \gamma \frac{y_2^2}{2} \quad (10)$$

که در این روابط

τ_0 تنش برشی در کف و جداره المان حجم کنترل، p پیرامون تر شده جریان، L طول المان حجم کنترل و s_f شیب خط انرژی است. با مقایسه معادله دینامیکی حاکم بر جریان، حاصل از روش انرژی و اندازه حرکت و مقادیر نزدیک به واحد ضریب تصحیح انرژی جنبشی (α) و ضریب تصحیح مومنتم (β) در کانال‌های منظم باز و

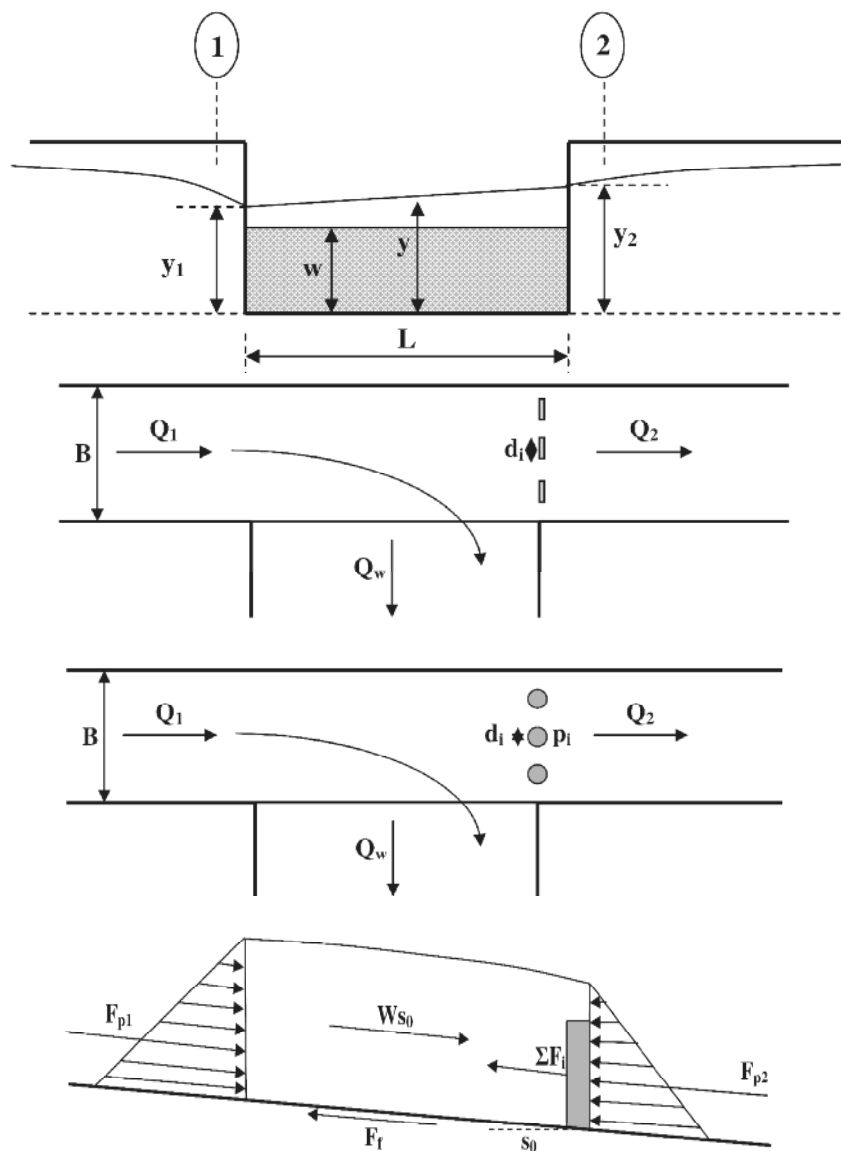
¹ Awasthy

² Thomson et al.

³ El-Khashab

⁴ Smith

⁵ Ranga Raju et al.



شکل ۲- مشخصات جریان روی سرریزهای جانبی در حضور صفحات هادی و گروه شمع

مطابق با شکل‌های ۱ و ۲، چنانچه Q و V مقادیر دبی و سرعت در مقطع ۱، $Q+\Delta Q$ و $V+\Delta V$ مقادیر دبی و سرعت در مقطع ۲ (ΔQ و ΔV نرخ تغییرات دبی و سرعت هستند)، U سرعت جریان انشعابی و U_x مؤلفه طولی سرعت جریان انشعابی باشد، روابط زیر به دست می‌آید

$$M_1 = \rho\beta QV \quad (13)$$

$$M_w = \rho \frac{dQ}{dx} \Delta x U_x \quad (14)$$

$$M_2 = \rho\beta(Q + \Delta Q)(V + \Delta V) \quad (15)$$

فلوم‌ها می‌توان نشان داد که $U_x \cong V_1$ است. با جایگذاری در معادله مومنتم و ساده‌سازی می‌توان نوشت

(۱۱)

$$K_d = \frac{B(y_1 + y_2)[y_1 - y_2 + L(s_0 - s_f)] - \frac{2}{Bg} \left[\frac{Q_2^2}{y_2} - \frac{Q_w Q_1}{y_1} - \frac{Q_1^2}{y_1} \right]}{\frac{1}{2}(y_1 - y_2) \sum a_i}$$

در صورتی که $(s_0 - s_f) = 0$ باشد، رابطه بالا به صورت زیر ساده می‌شود

$$K_d = \frac{B(y_1^2 - y_2^2) - \frac{2}{Bg} \left[\frac{Q_2^2}{y_2} - \frac{Q_w Q_1}{y_1} - \frac{Q_1^2}{y_1} \right]}{\frac{1}{2}(y_1 - y_2) \sum a_i} \quad (12)$$

با استفاده از معادله مومنتم می توان نوشت

$$M_2 - M_w - M_1 = P_1 - P_2 + W \sin \theta - F_f - \sum F_i \quad (16)$$

که در این رابطه

$\sum F_i$ برای نیروهای وارده از طرف صفحات هادی یا گروه شمع موجود در انتهای سرریز بر حجم کنترلی است. برای Δx های کوچک، مقدار $P_1 - P_2$ از رابطه ۱۷ به دست می آید

$$P_1 - P_2 = -\gamma A \Delta y \quad (17)$$

که در آن Δy اختلاف عمق دو مقطع است. از طرفی

$$W \sin \theta = \gamma A S_o \Delta x \quad (18)$$

$$F_f = \tau_o p \Delta x = \gamma R S_f p \Delta x = \gamma A S_f \Delta x \quad (19)$$

$$P_d = K_d P_s \quad (20)$$

بنابراین برای گروه صفحات هادی و گروه شمع رابطه زیر نوشته می شود

$$\sum F_i = K_d \gamma \Delta y \sum a_i \quad (21)$$

که در این رابطه

τ_o تنش برشی متوسط وارد بر جدارها و کف در جهت x ، p پیرامون تر شده، R شعاع هیدروویکی و γ وزن مخصوص سیال است. با جایگزینی روابط بالا در رابطه ۱۶ رابطه زیر به دست می آید:

$$\begin{aligned} \rho \beta (Q + \Delta Q)(V + \Delta V) - \rho \frac{dQ}{dx} \Delta x U_x - \beta \rho Q V \\ = -\gamma A \Delta y + \gamma A S_o \Delta x - F_f - \sum F_i \end{aligned} \quad (22)$$

با تقسیم طرفین رابطه ۲۲ بر $\rho g A$ و حذف ترم های مرتبه بالا رابطه زیر ایجاد می شود

$$\begin{aligned} \frac{1}{g} \left[\beta (V \Delta V + \frac{V}{A} \Delta Q) - \frac{dQ}{dx} \Delta x \frac{U_x}{A} \right] \\ = -\Delta y + S_o \Delta x - S_f \Delta x - \frac{K_d}{B} \frac{\Delta y}{y} \sum a_i \end{aligned} \quad (23)$$

با تقسیم رابطه ۲۳ به Δx وقتی که Δx به سمت صفر میل می کند رابطه ۲۴ به دست می آید

$$\begin{aligned} \beta \frac{V dV}{g dx} + \frac{dy}{dx} = -\beta \frac{V}{g A} \frac{dQ}{dx} + S_o \\ - S_f + \frac{dQ}{dx} \frac{U_x}{g A} - \frac{K_d}{A} \sum a_i \frac{dy}{dx} \end{aligned} \quad (24)$$

از طرفی

$$\frac{dQ}{dx} = \frac{d(VA)}{dx} = V \frac{dA}{dx} + A \frac{dV}{dx} \quad (25)$$

با ضرب کردن V/gA در طرفین رابطه ۲۵، رابطه زیر حاصل می شود

$$\frac{V}{g} \frac{dV}{dx} = \frac{V}{g A} \left(\frac{dQ}{dx} - V \frac{dA}{dx} \right) \quad (26)$$

و یا

$$\frac{V}{g} \frac{dV}{dx} = \frac{V}{g A} \left(\frac{dQ}{dx} - \frac{Q}{A} B \frac{dy}{dx} \right) \quad (27)$$

با ضرب طرفین رابطه ۲۷ در β و جایگذاری $V=Q/A$ در ترم آخر آن، رابطه ۲۸ به دست می آید

$$\beta \frac{V}{g} \frac{dV}{dx} = \beta \frac{V}{g A} \frac{dQ}{dx} - \beta \frac{Q^2}{g A^3} B \frac{dy}{dx} \quad (28)$$

حال با جایگزینی رابطه ۲۸ در رابطه ۲۳، رابطه زیر حاصل می شود

$$\begin{aligned} \beta \frac{V}{g A} \frac{dQ}{dx} - \beta \frac{Q^2}{g A^3} B \frac{dy}{dx} + \frac{dy}{dx} = -\beta \frac{V}{g A} \frac{dQ}{dx} \\ + S_o - S_f + \frac{dQ}{dx} \frac{U_x}{g A} - \frac{K_d}{A} \sum a_i \frac{dy}{dx} \end{aligned} \quad (29)$$

و در نهایت

$$\frac{dy}{dx} = \frac{S_o - S_f - (2\beta V - U_x) \frac{dQ}{g A dx}}{1 - \frac{\beta Q^2 B}{g A^3} + \frac{K_d}{A} \sum a_i} \quad (30)$$

با فرض $\beta=1$ و با تعریفی که قبلاً برای U_x ارائه شد و با فرض برابر صفر بودن $S_o - S_f$ می توان رابطه بالا را ساده تر نمود

$$\frac{dy}{dx} = \frac{-\frac{Q dQ}{g A^2 dx}}{1 - \frac{Q^2 B}{g A^3} + \frac{K_d}{A} \sum a_i} \quad (31)$$

با مقایسه رابطه اخیر و معادله دینامیکی حاکم بر جریان متغیر مکانی با کاهش دبی می توان دریافت که با استفاده از صفحات هادی و گروه شمع می توان دبی جریان از سرریزهای کناری را افزایش داد.

بر اساس معادله دی مارچی رابطه تغییرات دبی جریان را می توان به صورت زیر بیان نمود

$$\frac{dQ}{dx} = \frac{2}{3} C_M \sqrt{2g} (y - w)^{1.5} \quad (32)$$

اگر رابطه دبی جریان به صورت زیر فرض شود

$$\Phi_2 = -\left(\sqrt{\frac{y-w}{E-y}} + \sin^{-1}\left[\sqrt{\frac{E-y}{E-w}}\right]\right) \quad (44)$$

$$\Phi_3 = \frac{4}{3} \frac{C_M}{B} x \quad (45)$$

بنابراین

$$x = \frac{3B}{2C_M} \left\{ \frac{\left(E + \frac{K_d}{B} \sum a_i\right) \sqrt{E-y}}{E-w} \sqrt{y-w} + 3\left(\sqrt{\frac{y-w}{E-y}} + \sin^{-1}\left[\sqrt{\frac{E-y}{E-w}}\right]\right) \right\} \quad (46)$$

۳- تحلیل ابعادی، تجهیزات آزمایشگاهی و پارامترهای اندازه‌گیری شده

متغیرهای مؤثر بر ضریب دبی سرریز جانبی در حضور صفحات هادی و گروه شمع عبارت‌اند از:

الف- مشخصات فیزیکی سیال شامل جرم مخصوص (ρ)، لزجت دینامیکی (μ) و کشش سطحی (σ)

ب- مشخصات هیدرولیکی جریان شامل دبی (Q)، عمق (y) و سرعت جریان (V) در کانال اصلی

ج- مشخصات هندسی کانال، سرریز و صفحات هادی و گروه شمع شامل طول بازشدگی سرریز (L)، ارتفاع سرریز (w)، عرض کانال اصلی (B)، شیب کف کانال (s_0) و سطح صفحات هادی یا سطح تصویر گروه شمع ($\sum a_i$)

د- مشخصات عمومی مانند شتاب ثقل (g)

بر این اساس رابطه بین متغیرهای مؤثر بر مسئله به صورت زیر نوشته می‌شود

$$\Phi(\rho, \mu, g, \sigma, y_1, V_1, L, B, w, S_0, \sum a_i, C_M) = 0 \quad (47)$$

بر اساس تئوری π باکینگهام و با ترکیب متغیرهای حاصل، پارامترهای بی‌بعد زیر حاصل می‌شوند

$$(48)$$

$$C_M = \Phi\left(\frac{V_1^2}{gy_1}, \frac{\mu}{\rho y_1 V_1}, \frac{\sigma}{\rho y_1 V_1^2}, \frac{L}{y_1}, \frac{w}{y_1}, \frac{B}{y_1}, S_0, \frac{\sum a_i}{By_1}\right)$$

در هیدرولیک کانال‌های باز، هنگامی که جریان آشفته باشد تأثیر نیروی لزجت در مقایسه با نیروهای اینرسی ناچیز و اندک است و از آنجا که اصولاً وضعیت جریان در کانال‌ها به صورت آشفته است، از تأثیر نیروی لزجت یا همان عدد رینولدز صرف نظر می‌شود. تأثیر نیروی کشش سطحی در مواردی که عمق آب روی سرریز کمتر از ۴ سانتی‌متر است، مطرح است و از آنجا که در تمامی آزمایشهای انجام شده عمق آب روی سرریز بیشتر از ۴

$$Q = By\sqrt{2g(E-y)} \quad (33)$$

E انرژی مخصوص جریان است. با توجه به اینکه

$$Fr^2 = \frac{Q^2}{gy^3B^2} \quad (34)$$

Fr عدد فرود است. با جایگذاری در رابطه دینامیکی حاکم بر

جریان رابطه زیر ایجاد می‌شود

$$\frac{dy}{dx} = \frac{-\frac{4}{3} \frac{Q}{gB^2y^2} C_M \sqrt{2g}(y-w)^{1.5}}{\left(1 - \frac{Q^2}{gy^3B^2}\right) + K_d \frac{1}{A} \sum a_i} \quad (35)$$

و یا

$$\frac{dy}{dx} = \frac{-\frac{4}{3} \frac{By\sqrt{2g(E-y)}}{gB^2y^2} C_M \sqrt{2g}(y-w)^{1.5}}{\left(1 - \frac{B^2y^2[2g(E-y)]}{gy^3B^2}\right) + K_d \frac{1}{A} \sum a_i} \quad (36)$$

با ساده‌سازی رابطه بالا، رابطه زیر حاصل می‌شود:

$$\frac{dy}{dx} = \frac{-\frac{8}{3} \frac{\sqrt{(E-y)}}{B} C_M (y-w)^{1.5}}{3y - 2E + K_d \frac{1}{B} \sum a_i} \quad (37)$$

با فرض

$$(38)$$

$$R_1 = -\frac{8}{3} \frac{C_M}{B} \text{ and } R_2 = K_d \frac{1}{B} \sum a_i \text{ and } U^2 = E - y$$

می‌توان نوشت

$$\frac{dy}{dx} = \frac{R_1(E - U^2 - w)^{1.5}}{-2(E - 3U^2 + R_2)} \quad (39)$$

و با فرض

$$E - w = N_1 \text{ and } E + R_2 = N_2 \quad (40)$$

$$2 \frac{N_2 U}{(N_1 - U^2)^{1.5}} dU - 6 \frac{U^3}{(N_1 - U^2)^{1.5}} dU = R_1 dx \quad (41)$$

$$2d\Phi_1 - 6d\Phi_2 = d\Phi_3 \quad (42)$$

با انتگرال‌گیری از روابط بالا، روابط زیر به دست می‌آید

$$\Phi_1 = \frac{\left(E + \frac{K_d}{B} \sum a_i\right) \sqrt{E-y}}{E-w} \quad (43)$$

سانتی متر است، از تأثیر نیروی کشش سطحی یا همان عدد وبر نیز صرف نظر می شود. همچنین برخی از محققان اثر شیب کف در جریان های زیر بحرانی را ناچیز دانسته اند، در نتیجه از تأثیر s_0 نیز صرف نظر می شود [۱۵ و ۱۷]. بنابراین

$$C_M = \Phi \left(Fr_1, \frac{L}{y_1}, \frac{w}{y_1}, \frac{B}{y_1}, \frac{\sum a_i}{By_1} \right) \quad (49)$$

که در این رابطه

Fr_1 عدد فرود جریان در مقطع ۱ از المان حجم کنترلی است. با استفاده از روش آنالیز ابعادی ناقص (ISS) می توان یکی از اعداد بی بعد حاصل را کم کرد [۲۶]. برای این کار با توجه به وجود شرایط لازم برای اعمال روش ISS، از تقسیم پارامتر L/y_1 بر B/y_1 پارامتر L/B حاصل می شود. لذا به جای پارامترهای بی بعد B/y_1 و L/y_1 در رابطه ۴۹ از پارامتر بی بعد L/B استفاده می شود. بنابراین

$$C_M = \Phi \left(Fr_1, \frac{w}{y_1}, \frac{L}{B}, \frac{\sum a_i}{By_1} \right) \quad (50)$$

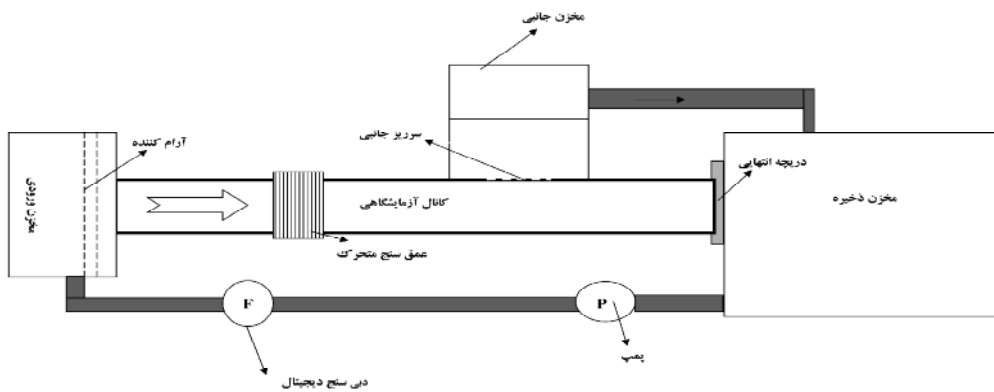
در بخش نتایج، ارتباط پارامترهای بی بعد مورد اشاره در رابطه بالا با ضریب دبی (C_M) مورد بررسی قرار گرفته و سپس با استفاده از نرم افزار SPSS روابط حاکم بر تغییرات C_M با پارامترهای بی بعد مستقل بر اساس داده های آزمایشگاهی برای حالت های مختلف استخراج می گردد.

آزمایش های مربوط به این تحقیق در یک کانال با دیواره شیشه ای و مقطع مستطیلی به عرض ۴۰ سانتی متر و طول مفید ۸ متر انجام شد. دیواره کانال از جنس پلکسی گلاس^۲ شفاف و دارای ارتفاع ۶۰ سانتی متر بود. در شکل ۳ شمای کلی مدل آزمایشگاهی مورد استفاده در این تحقیق نشان داده شده است. آب توسط پمپ با حداکثر ظرفیت ۵۰ لیتر در ثانیه، از مخزن اصلی به کانال با دیواره شیشه ای هدایت می شد. قسمتی از جریان داخل کانال پس از

رسیدن به سرریز مورد آزمایش، به صورت جانبی از مسیر اصلی منحرف و در مخزن جانبی تخلیه می گردید. جریان باقیمانده در کانال در مسیر اصلی در انتهای کانال و پس از عبور از زیر دریچه کنترل دبی و سطح آب وارد مخزن اصلی می شد. آب خروجی از مخزن جانبی و انتهایی در نهایت وارد مخزن اصلی شده و دوباره توسط پمپ به کانال هدایت می گردید. آب پس پمپاژ از مخزن اصلی از طریق خط لوله با عبور از دبی سنج دیجیتال به مخزن ورودی در ابتدای کانال هدایت می گردید. به منظور آرام نمودن جریان در مخزن بالادست از صفحات مشبک آرام کننده درون این مخزن استفاده شد. با توجه به پروفیل های سرعت به دست آمده در طول کانال مشخص گردید که جریان در فاصله ۳/۵ متری از ابتدای کانال توسعه یافته است و در نتیجه برای اطمینان بیشتر، سرریز جانبی در فاصله ۴/۵ متری از ابتدای کانال نصب گردید. اندازه گیری دبی جریان قبل از سرریز جانبی (Q_1) با استفاده از دبی سنج دیجیتال و اسنجی شده که در فاصله بین پمپ و مخزن بالادست قرار داشت، صورت گرفت. با استفاده از دریچه کشویی در انتهای کانال، سطح آب در کانال تنظیم گردید. از این دریچه، برای اندازه گیری دبی جریان پس از سرریز جانبی (Q_2) نیز استفاده شد. از تفاضل دبی جریان قبل از سرریز جانبی و پس از آن ($Q_2 - Q_1$)، دبی عبوری از سرریز جانبی (Q_w) محاسبه شد. در آزمایش های انجام شده، شیب کف کانال صفر ($s_0=0$) بود و جریان به صورت آزاد از روی سرریز عبور می کرد. در جدول ۱ اطلاعات مربوط به متغیرهای هندسی و هیدرولیکی مورد اشاره، ارائه گردیده است. عدد فرود بالادست سرریز (Fr_1) در همه حالات کمتر از ۱ و در محدوده بین ۰/۱۵ تا ۰/۵ بود که شرایط جریان زیر بحرانی را ارضا می نمود. صفحات هادی و گروه شمع در انتهای سرریز درون کانال و به صورت کاملاً متقارن نصب گردیدند. ابعاد این صفحات به گونه ای انتخاب گردید که در بالا دست سرریز، در جریان

¹ Incomplete Self-Similarity

² Plexiglass



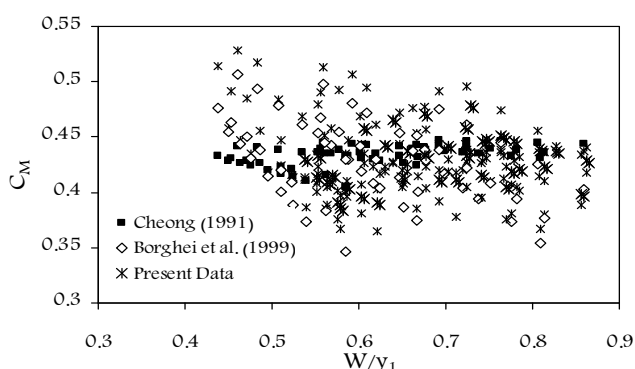
شکل ۳- شمایی از مدل آزمایشگاهی

جدول ۱- محدوده‌های اندازه‌گیری پارامترهای مؤثر

دبی بالادست Q (lit/s)	ارتفاع سرریز (w)	عرض سرریز (L)	فرود بالادست (Fr ₁)
۱۰-۴۵	۲۰ و ۱۵، ۱۰	۷۵ و ۵۰، ۲۶	۰/۵-۰/۱۵

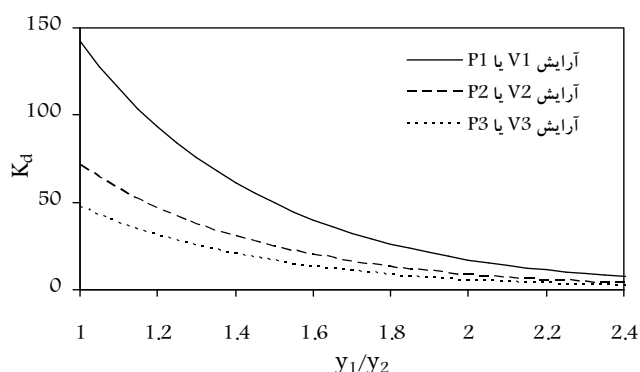
جدول ۲- کلیاتی از نحوه استفاده از صفحات هادی و گروه شمع

شماره آزمایش	صفحات هادی			گروه شمع		
	V ₁	V ₂	V ₃	P ₁	P ₂	P ₃
تعداد	۱	۲	۳	۱	۲	۳
نحوه آرایش						



شکل ۵- مقایسه نتایج تحقیق حاضر و نتایج دیگر محققان در خصوص سرریز جانبی ساده (C_M بر حسب w/y_1)

محققان، بر حسب پارامترهای بی بعد w/y_1 و Fr_1 مقایسه شد. مقایسه نتایج نشان می‌دهد که، روند تغییرات نتایج حاصل از این تحقیق با نتایج تحقیقات پیشین و به خصوص نتایج برقی و همکاران از تطابق خوبی برخوردار است [۱۶]. در شکل‌های ۶ و ۷، نمودارهای تغییرات ضریب K_d حاصل از

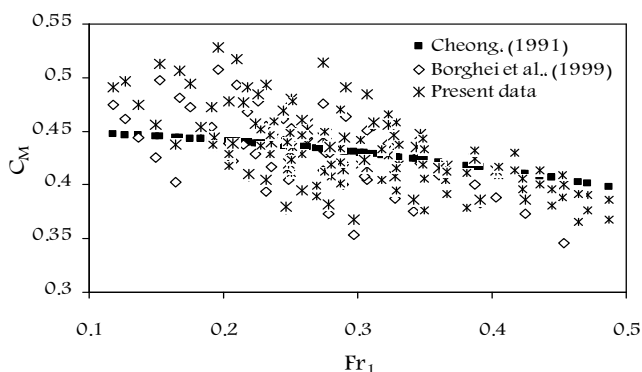


شکل ۶- تغییرات ضریب K_d حاصل از رابطه ۱۲ در مقابل y_1/y_2

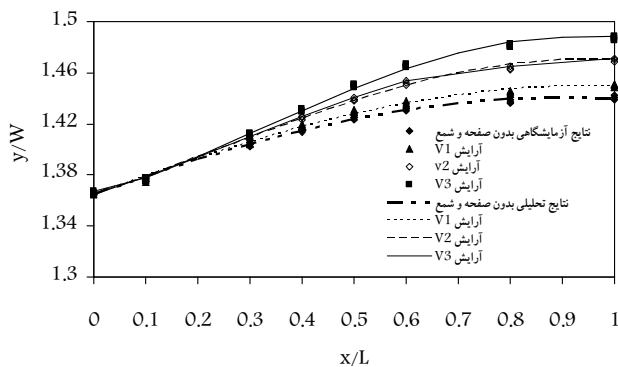
پس‌زدگی اتفاق نیفتد (شمع‌های به قطر ۲ سانتی‌متر و صفحات هادی به عرض ۲ سانتی‌متر که ارتفاع همه معادل با ارتفاع سرریز مورد استفاده بود). ضمناً در تمامی حالات به خاطر کاهش افت انرژی و جلوگیری از تشکیل جریان‌های ثانویه سطحی، صفحات و شمعها به صورت مستغرق در آب بودند. تعداد صفحات هادی و گروه شمع مورد استفاده، یک، دو و سه عدد در یک راستای عرضی بود. جدول ۲ کلیاتی از نحوه به‌کارگیری صفحات هادی و گروه شمع را نشان می‌دهد. در مجموع ۳۲۰ آزمایش در این ارتباط انجام شد.

۴- نتایج

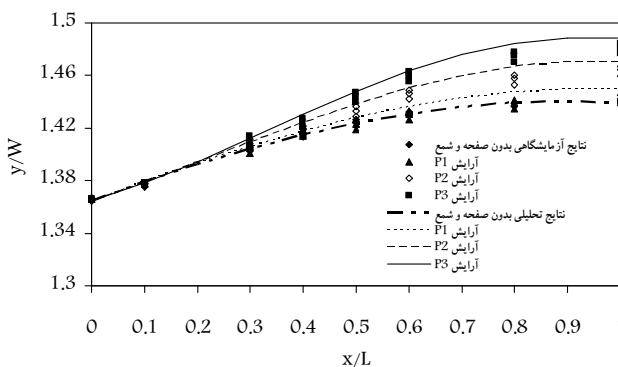
ضریب دبی سرریزهای جانبی ساده با استفاده از پروفیل سطح آب، معادله دبی عبوری در واحد طول سرریز جانبی (رابطه ۳۲) و استفاده از روابط ۱۲ و ۴ محاسبه گردید. در شکل‌های ۴ و ۵ مقادیر ضریب دبی به دست آمده در تحقیق حاضر در شرایط عدم حضور صفحات هادی و گروه شمع با نتایج ارائه شده توسط دیگر



شکل ۴- مقایسه نتایج تحقیق حاضر و نتایج دیگر محققان در خصوص سرریز جانبی ساده (C_M بر حسب Fr_1)



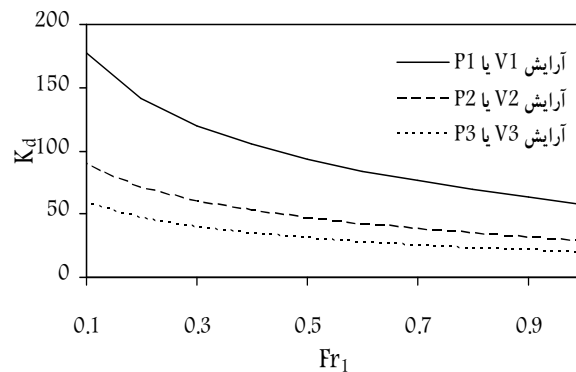
شکل ۸- پروفیل‌های سطح آب تئوریک و آزمایشگاهی برای سرریز ساده و سرریز ساده در حضور تعداد یک (V_1)، دو (V_2) و یا سه (V_3) عدد صفحه هادی



شکل ۹- نتایج تئوریک و آزمایشگاهی پروفیل سطح آب برای سرریز ساده و سرریز در حضور تک شمع (P_1) و گروه دو تایی (P_2) و سه تایی (P_3)

سرریز ساده با گروه شمع تا حدود ۲۰ درصد بیشتر از حالت سرریز ساده بود که دلیل این امر، ایجاد مومنتم اضافی توسط صفحات هادی و گروه شمع در جریان انحرافی است.

صفحات هادی و گروه شمع با ایجاد مومنتم اضافی در راستای سرریز جانبی، باعث افزایش ضریب دبی و به تبع آن باعث افزایش دبی عبوری از روی سرریز می‌شوند به طوری که ضریب دبی با استفاده از گروه شمع به طور متوسط ۱۰ تا ۲۰ درصد و با کاربرد صفحات هادی به طور متوسط ۱۰ تا ۳۰ درصد افزایش می‌یابد. شکل‌های ۱۱ تا ۱۴ مقایسه میزان اثرپذیری ضریب دبی از حضور صفحات هادی و گروه شمع در سرریز جانبی ساده را نشان می‌دهد. شکل‌های ۱۱ و ۱۲، تغییرات C_M به ترتیب در مقابل Fr_1 و w/y_1 برای شرایط سرریز ساده و سرریز ساده در حضور ۳ صفحه هادی مستغرق را نشان می‌دهد. در شکل‌های ۱۳ و ۱۴ نیز تأثیر حضور گروه شمع سه تایی بر افزایش ضریب دبی جریان به ترتیب در مقابل Fr_1 و w/y_1 ترسیم شده است. با توجه به این شکل‌ها به سادگی می‌توان دریافت که با حضور صفحات هادی و گروه شمع، ضریب دبی به میزان قابل ملاحظه‌ای افزایش می‌یابد. بنابراین در صورت



شکل ۷- تغییرات ضریب K_d حاصل از رابطه ۱۲ در مقابل Fr_1

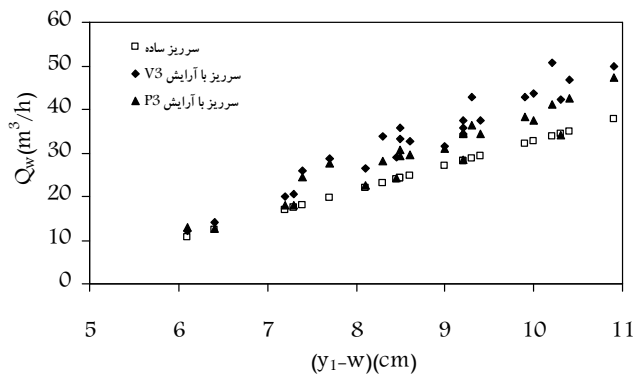
رابطه ۱۲ به ترتیب بر حسب پارامترهای بدون بعد Fr_1 و y_1/y_2 ترسیم شده است. ملاحظه می‌شود که با افزایش مقادیر هر دو پارامتر فوق‌الذکر، ضریب K_d کاهش می‌یابد و نهایتاً به سمت عدد یک همگرا می‌شود. از مقادیر K_d به دست آمده از این شکل‌ها برای به دست آوردن پروفیل‌های سطح آب و ضریب دبی در حالت تئوریک استفاده شد.

شکل ۸ پروفیل‌های سطح آب تئوریک و آزمایشگاهی را برای سرریز ساده و حالت‌های سرریز ساده در حضور تعداد یک، دو و یا سه عدد صفحه هادی نشان می‌دهد. در شکل ۹ نیز نتایج تئوریک و آزمایشگاهی مربوط به پروفیل سطح آب برای سرریز ساده و سرریز در حضور تک شمع و گروه دو تایی و سه تایی نشان داده شده است. مقایسه پروفیل سطح آب در حالت سرریز ساده با صفحات هادی و گروه شمع، نشان می‌دهد که نتایج تئوریک و آزمایشگاهی تغییرات پروفیل سطح آب در دو حالت از سازگاری خوبی برخوردارند. البته خطایی در حد کمتر از ۵ درصد در هر دو شکل و به خصوص در شکل ۹ قابل مشاهده است. لازم به ذکر است که در محدوده اطراف شمع به خاطر خطوط جریانی شدن، سطح آب ثابتی به وجود نمی‌آید و بنابراین تعیین دقیق عمق آب در اطراف شمع به شخص اندازه‌گیر بستگی دارد. حال آنکه در مورد صفحات هادی تقریباً سطح نسبتاً همواری در جلوی سازه به وجود می‌آید که اندازه‌گیری عمق را تسهیل می‌نماید. ضمناً ملاحظه می‌شود که بالا آمدگی پروفیل سطح آب در حالت سرریز ساده با صفحات هادی بیشتر از حالت سرریز ساده با گروه شمع است.

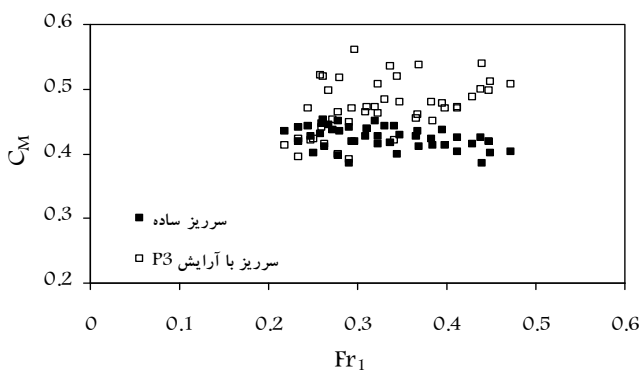
برای بررسی تأثیر صفحات هادی و گروه شمع در افزایش دبی عبوری از سرریز جانبی ساده، تغییرات دبی عبوری بر حسب ارتفاع بالادست سرریز مورد بررسی قرار گرفت (شکل ۱۰). در شکل ۱۰ به مقایسه دبی عبوری از سرریز در سه حالت سرریز ساده، سرریز ساده با سه صفحه هادی و سرریز ساده با گروه شمع سه تایی پرداخته شد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، مقدار دبی عبوری در حالت سرریز ساده با صفحات هادی، تا حدود ۳۰ درصد و در حالت



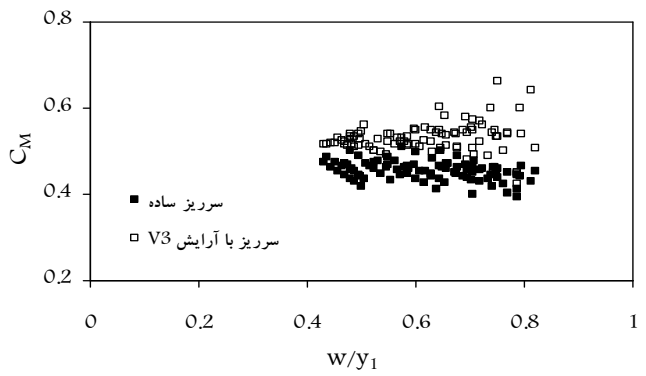
شکل ۱۳- تغییرات C_M در دو حالت؛ سریز جانبی ساده سریز جانبی ساده در حضور گروه شمع بر حسب نسبت w/y_1



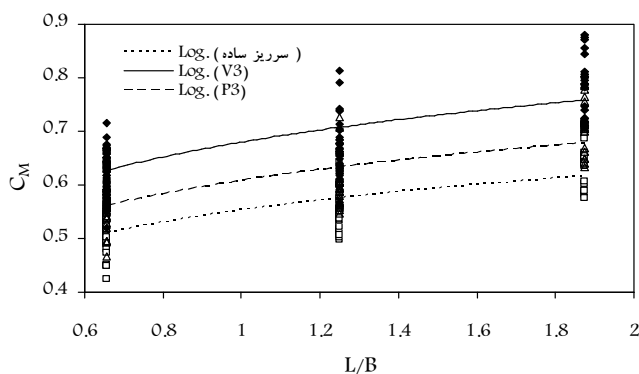
شکل ۱۰- مقایسه دبی عبوری از سریز در سه حالت سریز ساده، سریز ساده با سه صفحه هادی (V_3) و سریز ساده با گروه شمع سه تایی (P_3)



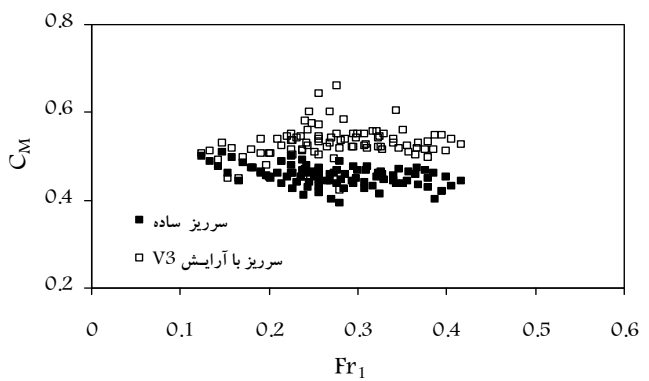
شکل ۱۴- C_M در دو حالت سریز جانبی ساده و سریز جانبی ساده در حضور گروه شمع بر حسب Fr_1



شکل ۱۱- تغییرات C_M در دو حالت سریز جانبی ساده و سریز جانبی ساده با استفاده از صفحات هادی بر حسب نسبت w/y_1



شکل ۱۵- تغییرات C_M بر حسب L/B برای سه حالت سریز ساده، سریز در حضور سه صفحه هادی و سریز در حضور گروه شمع سه تایی



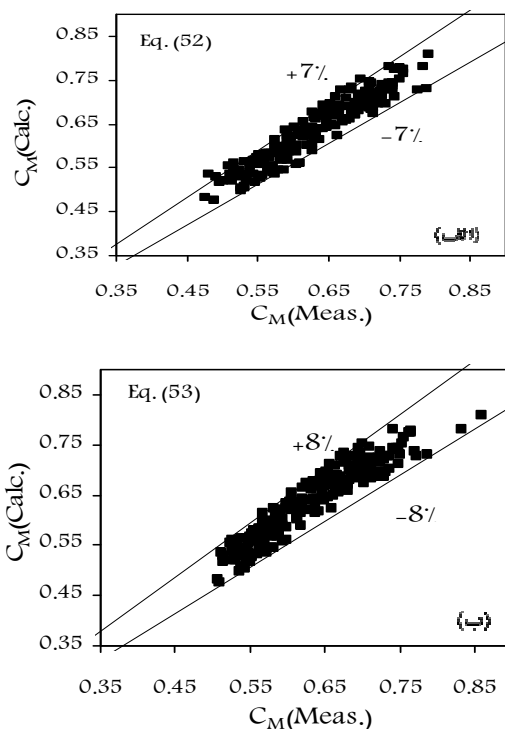
شکل ۱۲- تغییرات C_M در دو حالت سریز جانبی ساده و سریز جانبی ساده با استفاده از صفحات هادی بر حسب Fr_1

ملاحظه می‌شود که با افزایش نسبت L/B در هر سه حالت، ضریب دبی افزایش می‌یابد. ضمن اینکه در صورت استفاده از صفحات هادی در نسبت L/B ثابت، ضریب دبی بیشتر از بقیه حالات می‌شود.

بررسی نتایج مربوط به اثر پارامتر $\Sigma a_i / By_1$ نشان می‌دهد که با افزایش تعداد صفحات هادی و گروه شمع، ضریب دبی تقریباً

استفاده از این سازه‌ها در شرایطی که در کانال بالا دست پس‌زدگی رخ ندهد، می‌توان دبی انحرافی را افزایش داد و یا در شرایط ثابت برای عبور دبی مشخص با استفاده از این سازه‌ها طول سریز جانبی مورد نیاز را کاهش داد. در شکل ۱۵ نیز تغییرات C_M بر حسب L/B برای سه حالت سریز ساده، سریز در مجاورت سه صفحه هادی و سریز در حضور گروه شمع سه تایی ارائه گردیده است.

در شکل‌های ۱۶-الف و ۱۶-ب به ترتیب به مقایسه نتایج محاسباتی حاصل از روابط ۵۲ و ۵۳ و نتایج آزمایشگاهی در دو حالت سرریز در مجاورت صفحات هادی و سرریز در مجاورت گروه شمع پرداخته شده است. ملاحظه می‌شود که روابط پیشنهادی از دقت تخمین نسبتاً خوبی برخوردار هستند.



شکل ۱۶- مقایسه نتایج حاصل از روابط تخمینی با مقادیر اندازه‌گیری شده بر اساس الف- رابطه ۵۲-ب- رابطه ۵۳

۵- نتیجه‌گیری

در این مقاله به بررسی جامع سرریزهای جانبی ساده به منظور افزایش ضریب دبی جریان در دو حالت حضور و عدم حضور صفحات هادی و گروه شمع پرداخته شد. برای این منظور با استفاده از معادله بقای اندازه‌ی حرکت ابتدا معادلاتی به صورت تحلیلی برای تعیین ضریب دینامیکی نیروی اعمالی بر صفحات هادی و گروه شمع، پروفیل سطح آب و ضریب دبی جریان ارائه گردید و سپس با بهره‌گیری از نتایج مدل آزمایشگاهی، نتایج تحلیلی مورد بررسی قرار گرفت و در انتها روابطی برای تعیین ضریب دبی جریان در دو حالت استفاده از گروه صفحات هادی (تک، دو تایی و سه تایی) و نیز گروه شمع (تک، دو تایی و سه تایی) ارائه گردید. بررسی نتایج نشان داد که استفاده از صفحات هادی به طور متوسط تا حدود ۳۰ درصد و گروه شمع نیز تا حدود ۲۰ درصد دبی و

به صورت خطی اضافه می‌شود. به نحوی که میزان تأثیر دو صفحه هادی معادل ۲ برابر تأثیر یک صفحه هادی است. برای تقریب تابع ضریب دبی جریان متغیر مکانی با کاهش دبی در شرایط استفاده از صفحات هادی و گروه شمع، از نرم‌افزار ریاضی SPSS استفاده شد. این نرم‌افزار یک نرم‌افزار کاربردی با قابلیت تقریب تابع بین دو یا چند متغیر است و توابع از پیش تعریف شده و مدل‌های آماری و استوکاستیک دارد. با فرض توابع مختلف برای متغیر C_M به عنوان متغیر وابسته در ارتباط با متغیرهای مستقل نظیر L/B , w/y_1 , Fr_1 ، استخراج گردید و $\Sigma a_i/By_1$ معادلاتی برای تخمین ضریب C_M ، استخراج گردید و سپس با استفاده از تابع خطای NRMSE و R^2 مقدار خطای نتایج محاسباتی و اندازه‌گیری تعیین گردید

(۵۱)

$$NRMSE = \sqrt{\frac{\sum [f(x_1, x_2, \dots, x_n) - F(x_1, x_2, \dots, x_n)]^2}{\sum [f(x_1, x_2, \dots, x_n) - \bar{f}]^2}}$$

که در این رابطه

f معرف مقادیر اندازه‌گیری شده، F مقادیر محاسباتی و \bar{f} متوسط مقادیر اندازه‌گیری شده است. پس از سعی و خطای طولانی و استفاده از فرم‌های مختلف توابع در نرم‌افزار SPSS، روابط ۵۲ و ۵۳ به ترتیب برای تخمین مقدار C_M در حضور صفحات هادی و گروه شمع استخراج گردیدند. شایان ذکر است که روابط ارائه شده، دقیق‌ترین روابط در میان تعداد نسبتاً زیاد روابط استخراج شده از سعی و خطای انجام شده در این خصوص هستند

(۵۲)

$$C_M = (1.1 + 1.5 \frac{\sum a_i}{By_1}) \left[\begin{array}{l} 0.69 - 0.27(\frac{w}{y_1}) \\ - 0.45 Fr_1 + 0.06(\frac{L}{B}) \end{array} \right]$$

$$C_M = (1.1 + 0.95 \frac{\sum a_i}{By_1}) \left[\begin{array}{l} 0.69 - 0.27(\frac{w}{y_1}) - 0.45 Fr_1 + 0.06(\frac{L}{B}) \end{array} \right]$$

(۵۳)

مقادیر توابع خطا بر اساس نتایج اندازه‌گیری‌های انجام شده روی مدل آزمایشگاهی برای روابط بالا در جدول ۳ ارائه شده است.

جدول ۳- مقادیر توابع خطا بر اساس نتایج اندازه‌گیری‌های انجام شده

شماره معادله	NRMSE	R^2
۵۲	۰/۱۶	۰/۹۶
۵۳	۰/۱۸	۰/۹۴

دقت نسبتاً خوب برای تعیین ضریب دبی جریان سرریز جانبی در دو حالت به ترتیب در حضور صفحات هادی و گروه شمع ارائه گردید.

ضریب دبی جریان را افزایش می دهند. ضمناً تأثیر کاربرد گروه صفحات هادی بر میزان دبی انحراف در مقایسه با گروه شمع در شرایط مشابه به مراتب بیشتر است. در نهایت روابط ۵۲ و ۵۳ با

۶- مراجع

- 1- Faghfoor Maghrebi, M., and Reazie-Nasab, M. S. (2005). "Discharge estimation of circular sewer using combined device of weir-sluice gat." *J. of Water and Wastewater*, 55, 60-68. (In Persian)
- 2- De-Marchi, G. (1934). "Essay on the performance of lateral weirs." *L., Energia Elettrica*, 11 (11), 849-860.
- 3- Ackers, P. (1957). "A theoretical consideration of side weirs on storm water overflows." *Proc. Institution of Civil Engineers*, London, England, 6, 305 -328.
- 4- Frazer, W. (1957). "The behaviour of side weirs in prismatic rectangular channels." Ph.D Thesis, Dept. of Civil Eng., Glasgow University, U.K.
- 5- Subramanya, K., and Awasthy, S.C. (1972). "Spatially varied flow over side weirs." *J. Hydr. Eng.*, 98(1), 1-10.
- 6- Thomson, T., and Nadesamoorthy, A. (1972). "Discussion of spatially varied flow over side weir." *J. Hydr. Eng.*, 98(2), 2234-2235.
- 7- El-Khashab, A., and Smith, K.V.H. (1976). "Experimental investigation of flow over side weirs." *J. Hydr. Eng.*, 102 (9), 1255-1268.
- 8- Ranga Raju, K.G., Gupta, S.K., and Prasad, B. (1979). "Side weir in rectangular channel." *J. Hydr. Eng.*, 105(5), 547-554.
- 9- Ramamurthy, A. S., and Carballada, L. (1980). "Lateral weir flow model." *J. Irrig. Drain. Eng.*, 112(1), 130-138.
- 10- Muslu, Y., and Uyurnaz, A. (1985). "Flow over side weirs in circular channels." *J. Hydr. Eng.*, 111(1), 144-160.
- 11- Eftekhazadeh, S., Clements, A. J., and Eangmeier, D.D. (1987). "Furrow irrigation using canal side weirs." *J. Irrig. Drain. Eng.*, 113(2), 251-265.
- 12- Ramamurthy, A.S., Subramanya, K., and Carballada, L. (1988). "Uniformly discharging lateral weirs." *J. Irrig. Drain. Eng.*, 104(4), 9-26.
- 13- Cheong, H.F. (1991). "Discharge coefficient of lateral diversion from trapezoidal channel." *J. Irrig. Drain. Eng.*, 117(4), 461-475.
- 14- Swamee, P. K., and Pathak, S.K., and Ali, S. M. (1994). "Side wier analysis using elementary discharge coefficient." *J. Irrig. Drain. Eng.*, 120(4), 742 -755.
- 15- Jalili, M. R., and Borghei, S. M. (1996). "Discussion of discharge coefficient of rectangular side weirs, by R.Singh, D.Manivannan and T.Satyanarayana." *J. Irrig. Drain. Eng.*, 122(2), 132.
- 16- Agaccioglu, H., and Yuksel, Y. (1998). "Side-weir flow in curved channels." *J. Irrig. Drain. Eng.*, 124, (3) 163-175.
- 17- Borghei, S. M., Jalili, M.R., and Ghodsian, M. (1999). "Discharge coefficient for sharp crested side weirs in subcritical flow." *J. Hydr. Eng.*, 125 (10), 1051-1056.
- 18- Ura, M., Kita, Y., Akiyama, J., Moriyama, H., and Kumar, J. A. (2001). "Discharge coefficient of oblique side weirs." *J. Hydroscience and Hydraulic Eng.*, 19(1), 85-96.
- 19- Muslu, Y. (2001). "Lateral weir flow model using a curve fitting analysis." *J. Hydr. Eng.*, 128(7), 712-715.
- 20- Muslu, Y., Tozlu, H., and Yuksel, E. (2003). "Effect of lateral water surface profile on side weir discharge." *J. Irrig. Drain. Eng.*, 129(5), 371-375.

- 21- Taheri, N. (2004). "Discharge coefficient of oblique side weirs using experimental model." M.Sc. Thesis, Dept. of Civil Eng., Sharif University of Tech., Tehran, Iran. (In Persian)
- 22- Borghei, S. M., and kabiri- Samani, A. R. (2005). "Discharge coefficient of side weirs using experimental and incomplete self-similarity method model." *Proc. 5th Iranian National Hydraulic Conference*, Kerman, Iran, 1597-1604. (In Persian)
- 23- Nekoe, M. A. (2006). "Discharge coefficient of lagyriuth side weirs using Experimental model." M.Sc. Thesis, Dept. of Civil Eng., Sharif University of Tech., Tehran, Iran. (In Persian)
- 24- Berahmand, N. A. (2007). "Discharge coefficient of side weirs using artificial neural network." *Proc. 6th Iranian National Hydraulic Conference*, Shahrekord, Iran, 252-262. (In Persian)
- 25- Izadnia, E., Heidrapour, M., and Kabiri-Samani, A. R. (2008). "The effect of weir downstream slope on discharge coefficient of circular crested side weir." *Proc. 7th Iranian National Hydraulic Conference*, Tehran, Iran, 252-262. (In Persian)
- 26- Barenblatt, G. I. (1987). *Dimensional analysis*, 1st Ed., Gordon and Breach, Science Pub., Amsterdam, The Netherlands.