

## مطالعه آزمایشگاهی پارامترهای هیدرولیکی شیب‌شکن قائم مجهز به صفحات مشبک افقی با فواصل نسبی متفاوت

رسول دانشفراز\*، محمد باقرزاده و محمد جعفری<sup>۱</sup>

(تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۸/۲۶؛ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۱/۱۴)

### چکیده

هدف از تحقیق حاضر بررسی و مقایسه نتایج آزمایشگاهی استهلاک انرژی و طول شیب‌شکن قائم مجهز به صفحات مشبک افقی با نتایج حوضچه‌های آرامش استاندارد نوع یک، دو، سه و چهار شیب‌شکن قائم ساده است. بدین منظور تعداد ۶۴ آزمایش مختلف روی شیب‌شکن قائم مجهز به صفحه مشبک افقی در فواصل نسبی ۰، ۰/۲۵، ۰/۵ و ۰/۷۵ از لبه شیب‌شکن، با تخلخل ۴۰ و ۵۰ درصدی صفحات مشبک و ارتفاع ۲۰ سانتی‌متری انجام شد. نتایج نشان داد که در تمامی آزمایش‌ها و در یک دبی ثابت، افزایش فاصله صفحه مشبک از لبه شیب‌شکن، تأثیری زیادی بر استهلاک انرژی جریان ندارد. به‌طور متوسط استهلاک انرژی پایین‌دست برای مطالعه حاضر در مقایسه با شیب‌شکن قائم ساده به میزان بیش از ۲۰ درصد افزایش یافته است که می‌تواند جایگزین مناسبی برای حوضچه آرامش پایین‌دست باشد. در میان مدل‌های تحقیق حاضر، بیشترین کاهش طول نسبی شیب‌شکن توسط مدل شیب‌شکن قائم با صفحه مشبک افقی با فاصله نسبی ۰/۷۵ اتفاق افتاد. به‌طور میانگین هنگام استفاده از صفحات مشبک افقی در چهار فاصله نسبی از لبه شیب‌شکن نیز نسبت به شیب‌شکن قائم مجهز به حوضچه آرامش استاندارد بیش از ۷۳ درصد از طول نسبی شیب‌شکن کاسته می‌شود.

واژه‌های کلیدی: شیب‌شکن قائم، محل قرارگیری صفحات مشبک افقی، مستهلک‌کننده انرژی، لبه شیب‌شکن، پرش هیدرولیکی

۱. گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه مراغه، مراغه، ایران

\*: مسئول مکاتبات: پست الکترونیکی: daneshfaraz@yahoo.com

## مقدمه

شیب‌شکن‌های قائم به دلیل سادگی ساخت، یکی از سازه‌های پرکاربرد در کانال‌های آبیاری، زهکشی، آبراهه‌های فرسایش‌پذیر، سیستم‌های جمع‌آوری و تصفیه آب و فاضلاب هستند. ایجاد سازه شیب‌شکن قائم در مسیر جریان عبوری از کانال باعث تغییر ناگهانی در عمق جریان می‌شود که به سبب آن، انرژی جنبشی مخرب اضافی پدید می‌آید و مستهلک نکردن این انرژی منجر به فرسایش دیواره و بستر کانال و تخریب سازه‌های پایین‌دست می‌شود. لازمه استهلاک انرژی ارائه راهکاری است که به واسطه آن تلاطم و آشفتگی در جریان افزایش یابد. یکی از روش‌های ایجاد تلاطم و آشفتگی در جریان تداخل آب با هوا است که در پرش هیدرولیکی اتفاق می‌افتد به‌همین منظور ساده‌ترین روش برای مستهلک کردن انرژی در سازه‌های هیدرولیکی ایجاد پرش هیدرولیکی در پایین‌دست است. با این حال در سال‌های اخیر روش‌های نوین برای بهبود عملکرد پرش هیدرولیکی و حوضچه آرامش و استفاده از سازه‌های الحاقی مانند صفحه مشبک برای استهلاک انرژی جریان بررسی شده است. صفحات مشبک از جمله این روش‌های جایگزین و نوین بوده که برای اولین بار به‌صورت قائم در مسیر جریان قرار گرفته و باعث استهلاک انرژی می‌شود. صفحات مشبک، صفحاتی با تخلخل مشخص هستند که به‌صورت قائم و یا افقی در مسیر جریان قرار گرفته و در هنگام عبور جریان از این صفحات انرژی آب مستهلک می‌شود. همچنین از این صفحات برای آرام کردن انواع سیالات، فیلتر، آشغال‌گیری در کارهای محیط زیستی، کانال‌های هدایت ماهی و ... استفاده می‌شود. اما کاربرد این سازه‌ها در مهندسی هیدرولیک به‌عنوان مستهلک‌کننده انرژی قدمت زیادی ندارد و برای اولین بار راجاراتنام و هورتیگ (۱۴) ایده استفاده از صفحات مشبک به‌عنوان مستهلک‌کننده انرژی در پایین‌دست سازه‌های هیدرولیکی را مطرح کردند. آنها با انجام دو سری مطالعات آزمایشگاهی تأثیر آرایش و درصد تخلخل صفحات مشبک را بر میزان درصد استهلاک انرژی بررسی کردند.

اسلانکارا (۱) در مطالعه‌ای آزمایشگاهی تأثیر آرایش چندتایی و عمق پایاب را بر مقادیر استهلاک انرژی جریان را مورد بررسی قرار داد. نتایج نشان داد که قرارگیری صفحات مشبک قائم به صورت چندتایی باعث افزایش استهلاک انرژی جریان می‌شود. صادق‌فام و همکاران (۱۷) نیز نشان دادند که صفحات مشبک دوتایی در مقایسه با صفحه مشبک منفرد استهلاک انرژی بیشتری دارد. کبیری سامانی و همکاران (۹) جریان روی شیب‌شکن قائم مجهز به مستهلک‌کننده شبکه‌ای را بررسی کردند. آنها نشان دادند که به‌کارگیری این صفحات باعث کاهش طول حوضچه در مقایسه با شیب‌شکن قائم ساده در حدود ۶۰ تا ۷۵ درصد می‌شود. شریف و کبیری سامانی (۱۶) نیز نشان دادند که با افزایش عمق پایاب در پایین‌دست شیب‌شکن قائم مجهز به مستهلک‌کننده شبکه‌ای، تداخل آب و هوا کاهش می‌یابد. نایب‌زاده و همکاران (۱۱) نیز با بررسی استهلاک انرژی شیب‌شکن قائم با واگرایی تدریجی و صفحه مشبک قائم پایین‌دست آن نشان دادند که در مقایسه با حالت بدون واگرایی و با افزایش زاویه واگرایی، استهلاک انرژی افزایش می‌یابد.

دانشفراز و همکاران (۳) به تحلیل آزمایشگاهی رفتار شیب‌شکن‌های مایل گابیونی در مقایسه با حوضچه‌های آرامش استاندارد (USBR) پرداختند. نتایج نشان داد که مقادیر انرژی نسبی باقی‌مانده، هنگام به‌کارگیری سازه گابیونی در ساختمان شیب‌شکن مایل و ایجاد شیب‌شکن مایل گابیونی با کاهش چشمگیر همراه بود. شیب‌شکن مایل گابیونی به‌ترتیب باعث کاهش ۳۰، ۳۳، ۳۰ و ۳۶ درصدی انرژی نسبی باقی‌مانده پایین‌دست در مقایسه با حوضچه آرامش نوع یک، دو، سه و چهار شد. میرزایی و همکاران (۱۰) به بررسی عددی استهلاک انرژی شیب‌شکن قائم با لبه دندانه‌ای افقی پرداختند. نتایج نشان داد که استفاده از شیب‌شکن قائم با لبه‌های دندانه‌ای افقی در مقایسه با شیب‌شکن قائم ساده، استهلاک انرژی، عمق نسبی پایین‌دست، طول ریزش جت و شدت آشفتگی ایجاد شده را افزایش می‌دهد. افزایش ابعاد لبه و کاهش تعداد آنها نیز

مورد بررسی قرار داده است. به عبارت دیگر نوآوری اصلی تحقیق حاضر استفاده از صفحات مشبک افقی در فواصل مختلف از لبه شیب‌شکن قائم برای تعیین موقعیت مناسب و بازده بالای استهلاک انرژی است.

## مواد و روش‌ها

### آنالیز ابعادی

با بررسی شرایط آزمایشگاهی، پارامترهای مورد نظر مطابق شکل ۱ روی مدل آزمایشگاهی مطالعه حاضر، متأثر از ویژگی سیال، مشخصات هندسی مدل آزمایشگاهی و شرایط هیدرولیکی جریان است که به صورت رابطه ۱ بیان می‌شود.

$$f_1(\rho, \mu, g, q, S, P, h, y_u, y_c, L_D, E_u, \Delta E) = 0 \quad (1)$$

در رابطه فوق،  $\rho$  چگالی آب،  $\mu$  لزجت آب،  $g$  شتاب گرانش،  $q$  دبی در واحد عرض،  $S$  فاصله صفحه مشبک افقی از لبه شیب‌شکن قائم،  $P$  تخلخل صفحه مشبک،  $h$  ارتفاع شیب‌کن،  $y_u$  عمق بالادست،  $y_c$  عمق بحرانی،  $L_D$  طول کل شیب‌شکن قائم مجهز به صفحه مشبک افقی (از ترکیب  $L_{mix}$  طول تلاطم و  $L_d$  طول ریزش جت روی صفحه مشبک حاصل می‌شود)،  $E_u$  انرژی بالادست شیب‌شکن و  $\Delta E$  استهلاک انرژی است. با انتخاب  $y_u$  عمق بالادست،  $\mu$  لزجت آب و  $g$  شتاب گرانش به‌عنوان سه پارامتر تکراری و استفاده از روش پی - باکینگهام رابطه ۲ حاصل شد.

$$f_2\left(\frac{q}{y_u \sqrt{gy_u}}, \frac{qp}{\mu}, P, \frac{h}{y_u}, \frac{y_c}{y_u}, \frac{S}{y_u}, \frac{L_D}{y_u}, \frac{E_u}{y_u}, \frac{\Delta E}{y_u}\right) = 0 \quad (2)$$

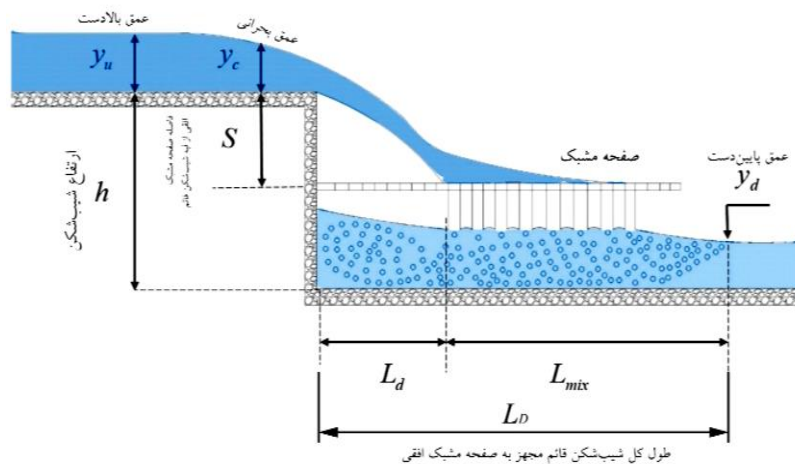
با ساده‌سازی و تقسیم برخی پارامترها برهم، تعداد پارامترهای بی‌بعد کاهش یافت و سپس پارامترهای مستقل و وابسته از هم جدا و رابطه ۳ استخراج شد:

$$\frac{\Delta E}{E_u}, \frac{L_D}{h} = f_3\left(\frac{q}{y_u \sqrt{gy_u}}, \frac{qp}{\mu}, P, \frac{h}{y_u}, \frac{y_c}{h}, \frac{y_c}{S}, \frac{S}{h}\right) \quad (3)$$

در رابطه فوق، عبارت  $(q/y_u \sqrt{gy_u})$  و  $(qp/\mu)$  به ترتیب از نظر ابعادی بیانگر عدد فرود در بالادست شیب‌شکن ( $Fr_u$ ) و عدد رینولدز ( $Re$ ) هستند. با توجه به اینکه در تحقیق حاضر

استهلاک انرژی جریان را افزایش داده و محدوده عدد فرود پایین‌دست را کاهش می‌دهد. دانشفراز و همکاران (۴) در مطالعه‌ای آزمایشگاهی، تأثیر صفحه مشبک افقی روی پارامترهای هیدرولیکی شیب‌شکن قائم را بررسی کردند. در مجموع ۱۰۵ آزمایش برای سه ارتفاع شیب‌شکن و دو نسبت تخلخل انجام شد. نتایج نشان داد که استفاده از صفحات مشبک افقی در شیب‌شکن قائم می‌تواند عمق استخر نسبی، عمق نسبی پایین‌دست و استهلاک انرژی نسبی را در مقایسه با شیب‌شکن قائم ساده افزایش دهد. همچنین مشخص شد که صفحه مشبک به‌طور قابل توجهی عدد فرود پایین‌دست شیب‌شکن قائم را از بازه  $6-3/7$  به  $1-0/67$  کاهش می‌دهد. همچنین مقایسه تخلخل صفحات نیز نشان می‌دهد که تخلخل صفحات بر عملکرد شیب‌شکن قائم تأثیر ناچیزی دارد. باقرزاده و همکاران (۲) به مقایسه آزمایشگاهی پارامترهای هیدرولیکی شیب‌شکن مایل ساده و گابیونی به‌همراه حوضچه آرامش در پایین‌دست سازه پرداختند. نتایج نشان داد که استفاده از شیب‌شکن مایل گابیونی در مقایسه با شیب‌شکن مایل ساده سبب کاهش عدد فرود حوضچه آرامش پایین‌دست از بازه  $4/49$  تا  $8/35$  به بازه  $1/28$  تا  $2/64$  شد.

با بررسی منابع گذشته مشخص شد که همواره ارائه روش‌هایی توسط محققین حوزه هیدرولیک برای افزایش راندمان استهلاک انرژی و کاهش انرژی نسبی باقی‌مانده در حوضچه آرامش شیب‌شکن قائم مورد توجه بوده است. در واقع استفاده از صفحات مشبک به‌عنوان یک روش جایگزین حوضچه‌های آرامش برای استهلاک انرژی جریان در پایین‌دست شیب‌شکن قائم مورد بررسی قرار گرفته است. با دقت بر این موضوع که تا به حال در زمینه مقایسه مستهلاک کننده‌ها با انواع حوضچه آرامش تحقیقات محدودی صورت پذیرفته است، بنابراین تحقیق حاضر تأثیر محل قرارگیری صفحات مشبک افقی از لبه شیب‌شکن قائم و میزان تأثیر آن روی پارامترهای هیدرولیکی و مقایسه نتایج حاصل شده با به کارگیری حوضچه آرامش در پایین‌دست شیب‌شکن قائم را



شکل ۱. شکل نمادین جریان روی مدل شیب‌شکن قائم

جریان به صورت زیر بحرانی (محدوده عدد فرود در بالادست شیب‌شکن بین ۰/۶ تا ۰/۹) و آشفته (محدوده عدد رینولدز ۸۰۰۰ تا ۴۵۰۰۰) است، بنابراین مطابق مطالعه راجاراتنام (۱۵) و همچنین دانشفراز و همکاران (۵) می‌توان از تأثیر این دو پارامتر صرف‌نظر کرد. پارامتر  $(h/y_u)$  نیز به دلیل محدوده کم تغییرات و زیر بحرانی بودن جریان در بالادست شیب‌شکن قابل صرف‌نظر است (۶). بنابراین رابطه ۳ را می‌توان به صورت رابطه ۴ خلاصه کرد:

پایین‌دست شیب‌شکن،  $h$  ارتفاع شیب‌شکن،  $y_c$  عمق بحرانی،  $y_d$ : عمق پایین‌دست شیب‌شکن،  $g$  شتاب گرانش زمین،  $q$  دبی واحد عرض است. محدوده پارامترهای بی‌بعد مستقل در جدول ۱ ارائه شده است. برای محاسبه عمق پایین‌دست شیب‌شکن مجهز به حوضچه‌های آرامش نوع یک و سه از رابطه معروف بلانگر (رابطه ۸) استفاده شد. مطابق مطالعات پترکا (۱۲) برای محاسبه عمق پایین‌دست حوضچه نوع دو و چهار نیز به ترتیب  $1/5$  و  $1/1$  برابر رابطه ۸ در نظر گرفته می‌شود. همچنین طول و عمق ثانویه پرش در حوضچه آرامش پایین دست شیب‌شکن برای حالتی در نظر گرفته شده است که جت سقوطی شیب‌شکن قائم مستغرق نشود:

$$\frac{\Delta E}{E_u}, \frac{L_D}{h} = f_4(P, \frac{y_c}{h}, \frac{S}{h}) \quad (4)$$

مطابق رابطه ۴، استهلاك انرژی کل و طول کل شیب‌شکن قائم مجهز به صفحه مشبک افقی تابعی از تخلخل صفحات مشبک، عمق بحرانی نسبی و فاصله نسبی صفحه تا لبه شیب‌شکن است. همچنین در تحقیق حاضر برای محاسبه انرژی در بالادست و پایین‌دست شیب‌شکن قائم و استهلاك انرژی نسبی از روابط زیر استفاده شد:

$$\frac{y_2}{y_1} = \frac{1}{2}(-1 + \sqrt{1 + 8Fr_1^2}) \quad (8)$$

برای محاسبه  $Fr_1$  عدد فرود در پایین‌دست شیب‌شکن قائم از رابطه ۹ استفاده شد (۸):

$$Fr_1 = 2.985 \left(\frac{y_c}{H}\right)^{-0.278} \quad (9)$$

طول کل شیب‌شکن قائم ساده ( $L_D$ ) از مجموع طول شیب‌شکن ( $L_d$ ) و طول حوضچه آرامش ( $L_{sb}$ ) یا همان طول پرش هیدرولیکی ( $L_j$ ) حاصل می‌شود. بنابراین، طول کل نسبی شیب‌شکن قائم ساده به صورت زیر قابل بیان است:

$$\frac{L_D}{h} = \frac{L_d + L_{sb}}{h} \quad (10)$$

$$E_u = h + 1.5y_c \quad (5)$$

$$E_d = y_d + \frac{q^2}{2gy_d^2} \quad (6)$$

$$\frac{\Delta E}{E_u} = \frac{E_u - E_d}{E_u} \quad (7)$$

که در آن:  $E_u$  انرژی در بالادست شیب‌شکن،  $E_d$  انرژی در

جدول ۱. محدوده پارامترهای بی‌بعد مستقل

محدوده (Range)	پارامتر مستقل (dimensionless parameters)
۰/۴۰ و ۰/۵۰	تخلخل صفحات (P)
۰/۰-۲۹/۱۱	عمق بحرانی نسبی (yc/h)
۰/۷۵ و ۰/۵، ۰/۲۵، ۰	فاصله نسبی صفحه تا لبه شیب‌شکن (S/h)

صفحات مشبک و ساخت شیب‌شکن قائم صفحات مشبک به ترتیب به فواصل ۰، ۵، ۱۰ و ۱۵ سانتی‌متری از لبه شیب‌شکن قرار داده شدند. جریان در بالادست شیب‌شکن زیربحرانی در نظر گرفته شد. در تمامی مدل‌های آزمایشگاهی محدوده دبی بین ۰/۰۰۳۳ تا ۰/۰۱۳۳ مترمکعب بر ثانیه (۲۰۰ تا ۸۰۰ لیتر در دقیقه) و دریچه پایین‌دست نیز به صورت کاملاً باز در نظر گرفته شد. برای اندازه‌گیری عمق در بالادست و پایین‌دست شیب‌شکن از یک عمق‌سنج نقطه‌ای با دقت یک میلی‌متر استفاده شد و به‌منظور کاهش خطای اندازه‌گیری در ۵ نقطه از مقطع عرضی مقادیر مربوطه اندازه‌گیری شده و مقدار متوسط آنها در نظر گرفته شد (۷).

## نتایج و بحث

### مشاهدات آزمایشگاهی

در تحقیق حاضر به بررسی تجربی تأثیر فاصله قرارگیری صفحه مشبک افقی از لبه شیب‌شکن قائم روی پارامترهای هیدرولیکی و استهلاک انرژی جریان پرداخته شد. در مجموع ۶۴ آزمایش در چهار فاصله ۰، ۵، ۱۰ و ۱۵ سانتی‌متری از لبه شیب‌شکن قائم و دو تخلخل ۴۰ و ۵۰ درصد صفحه مشبک انجام شد. در تمامی آزمایش‌ها و برای یک دبی ثابت، مشاهده شد که با افزایش فاصله صفحه مشبک از لبه شیب‌شکن، تداخل آب و هوا کاهش می‌یابد. این امر با کاهش سفیدی رنگ جت‌های ریزشی پس از عبور از صفحه مشبک قابل مشاهده بود. همچنین برای حالتی که فاصله صفحه مشبک از لبه شیب‌شکن بیش از نصف ارتفاع شیب‌شکن بود ( $S=15 \text{ cm}$ )، صفحه مشبک به‌صورت یک آرام‌کننده جریان عمل کرده و

در رابطه بالا، طول شیب‌شکن ( $L_d$ ) از رابطه ۱۱ ارائه شده توسط رند (۱۳) محاسبه شد:

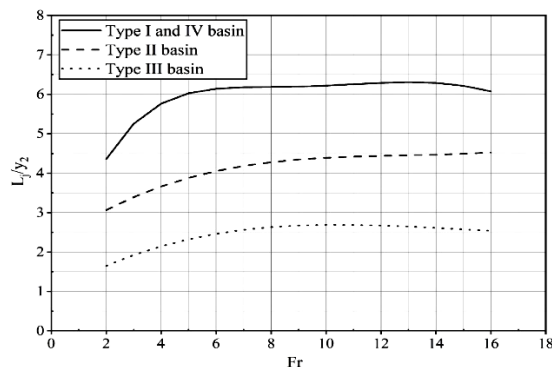
$$\frac{L_d}{h} = 4.30 \left( \frac{y_c}{h} \right)^{0.81} \quad (11)$$

از طرفی مطابق مطالعات پترکا (۱۲) طول حوضچه‌های آرامش استاندارد یک، دو، سه و چهار ( $L_{sb}$ ) از شکل ۲ به‌دست می‌آید. همچنین در تحقیق حاضر محاسبه طول کل شیب‌شکن قائم مجهز به صفحه مشبک افقی با فواصل مختلف از لبه، از مجموع دو پارامتر طول ریزش جت روی صفحه مشبک ( $\frac{L_d}{h}$ ) و طول تلاطم ( $\frac{L_{mix}}{h}$ ) به‌دست می‌آید:

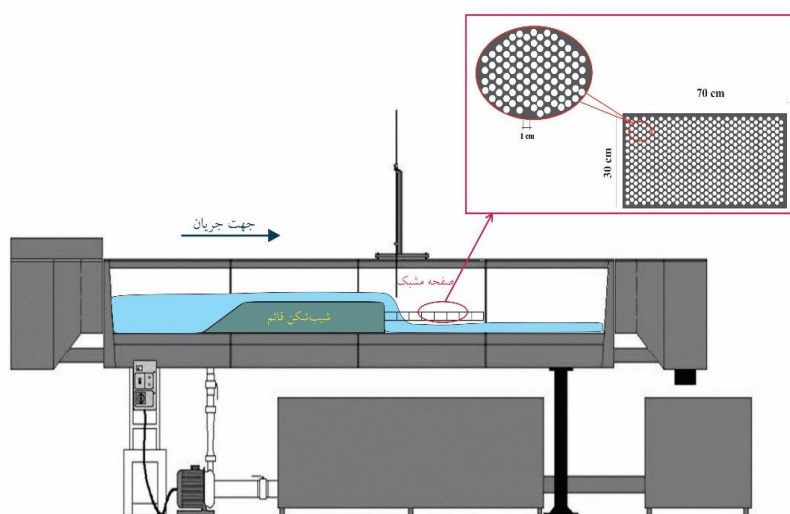
$$\frac{L_D}{h} = \frac{L_d + L_{mix}}{h} \quad (12)$$

### تجهیزات آزمایشگاهی

از یک فلوم آزمایشگاهی به‌طول ۶ متر، عرض ۰/۳ متر و ارتفاع ۰/۴۵ متر با شیب کف صفر به‌منظور انجام آزمایش‌های تحقیق حاضر استفاده شد (شکل ۳). این فلوم دارای دو عدد پمپ با دبی پمپاژ هر کدام ۷/۵ لیتر بر ثانیه و با خطای نسبی ۲ درصد بوده و دو مخزن ذخیره نیز در قسمت پایینی آن وجود دارد. با روشن شدن پمپ، جریان از مخزن پایینی به مخزن ابتدایی فلوم پمپاژ شده و پس از طی طول فلوم به‌صورت چرخشی از طریق مخزن انتهایی دوباره وارد مخزن پایینی می‌شود. شیب‌شکن قائم در ابتدای فلوم از جنس شیشه به ارتفاع ۲۰ سانتی‌متر ساخته شد. صفحات مشبک از جنس پلی‌اتیلن به ضخامت یک سانتی‌متر با شکل روزنه‌های دایره‌ای به قطر یک سانتی‌متر، با آرایش زیگزاگی و دو تخلخل ۴۰ و ۵۰ درصد تهیه شدند. پس از تهیه



شکل ۲. طول پرش هیدرولیکی در حوضچه آرامش طبق مطالعه پترکا (۱۲)

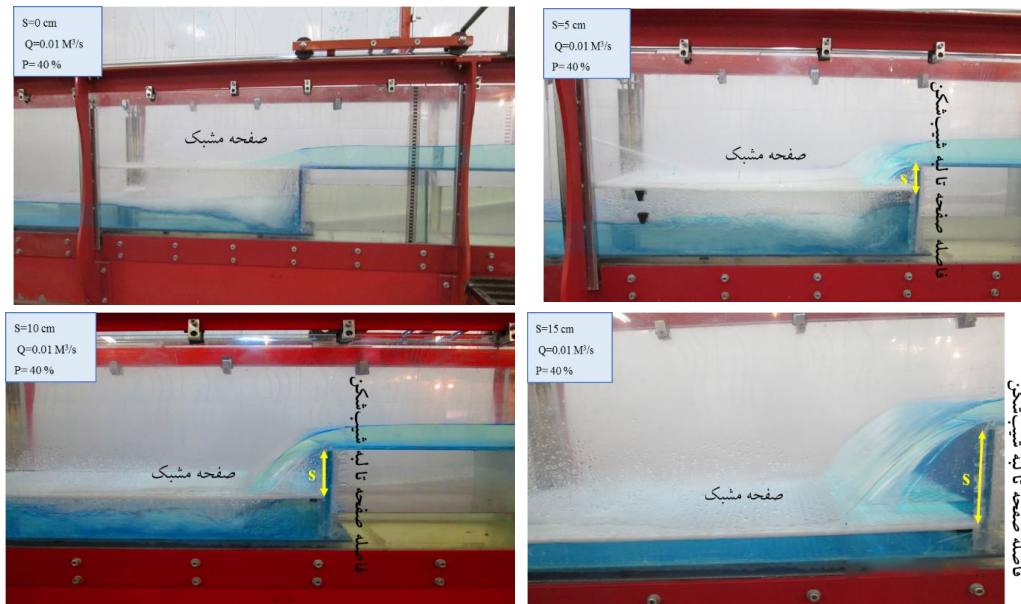


شکل ۳. شکل نمادین از فلوم تحقیق حاضر

طرفی با استفاده از صفحات مشبک افقی پرش‌های هیدرولیکی کوچک و متعددی در پایین دست تشکیل می‌شود که سبب زیرجرانی شدن رژیم جریان پایین دست می‌شود. هدف از نصب این سازه‌ها در سیستم حوضچه آرامش، استهلاک بیشتر انرژی با ایجاد تلاطم و آشفتگی و به تبع آن کاهش طول حوضچه و افزایش راندمان استهلاک انرژی درون حوضچه است. همچنین در اثر ریزش تیغه‌های آب از میان روزنه‌های صفحات مشبک به داخل حوضچه سبب تداخل آب و هوا می‌شود و شرایط برای مکش طبیعی هوا و اکسیژن‌دهی آن مهیا می‌شود که این موضوع در استخرهای پرورش ماهی و تصفیه‌خانه‌های آب حائز اهمیت است. لذا به‌کارگیری این صفحات می‌تواند باعث حذف نیاز به حوضچه آرامش در

تمام طول صفحه مشبک توسط جریان مستغرق شد این حالت به‌خصوص در دبی‌های بالا رخ داده و جریان پس از طی طول صفحه مشبک به‌صورت نوسانی و همراه با موج‌های کوتاه به پایین دست منتقل می‌شود. شکل ۴ نمایی از جریان روی مدل‌های تحقیق حاضر و تشکیل محیط ۲ فاز تداخل آب و هوا ناشی از حضور صفحات مشبک روی مدل تحقیق حاضر را نشان می‌دهد.

**نتایج مقایسه با حوضچه‌های آرامش استاندارد USBR**  
معمولاً از حوضچه‌های آرامش تیپ که توسط USBR برای مستهلک کردن انرژی جریان در پایین دست شیب‌شکن‌های قائم تعیین شده برای استهلاک انرژی استفاده می‌شود. از



شکل ۴. نمایی از جریان روی مدل‌های تحقیق حاضر (رنگی در نسخه الکترونیکی)

افقی با فواصل مختلف از لبه در مقایسه با حوضچه‌های آرامش، انرژی بیشتری را مستهلک کرده است که نمود بیشتر این نتیجه در اعماق بحرانی بالاتر کاملاً واضح است. تغییر فاصله صفحات مشبک از لبه شیب‌شکن قائم سبب افزایش میزان تداخل آب و هوا در جریان می‌شود و بر میزان استهلاک انرژی جریان تأثیر چندانی ندارد. استفاده از این صفحات مشبک افقی سبب افزایش میزان تداخل آب و هوا و ایجاد پرش‌های متعدد و تو در تو و در نهایت افزایش استهلاک انرژی نسبت به حالت شیب‌شکن قائم ساده مجهز به حوضچه‌های آرامش استاندارد شده است. به‌طور کلی شیب‌شکن قائم مجهز به صفحات مشبک افقی در مقایسه با حوضچه آرامش نوع یک، دو، سه و چهار به ترتیب باعث افزایش ۱۸، ۲۱، ۱۸ و ۲۵ درصدی استهلاک انرژی پایین‌دست می‌شود. همچنین با مقایسه استهلاک انرژی در دو تخلخل نیز چنین استنباط می‌شود که تخلخل صفحات مشبک نیز تأثیری چندانی بر استهلاک انرژی کل شیب‌شکن قائم ندارد.

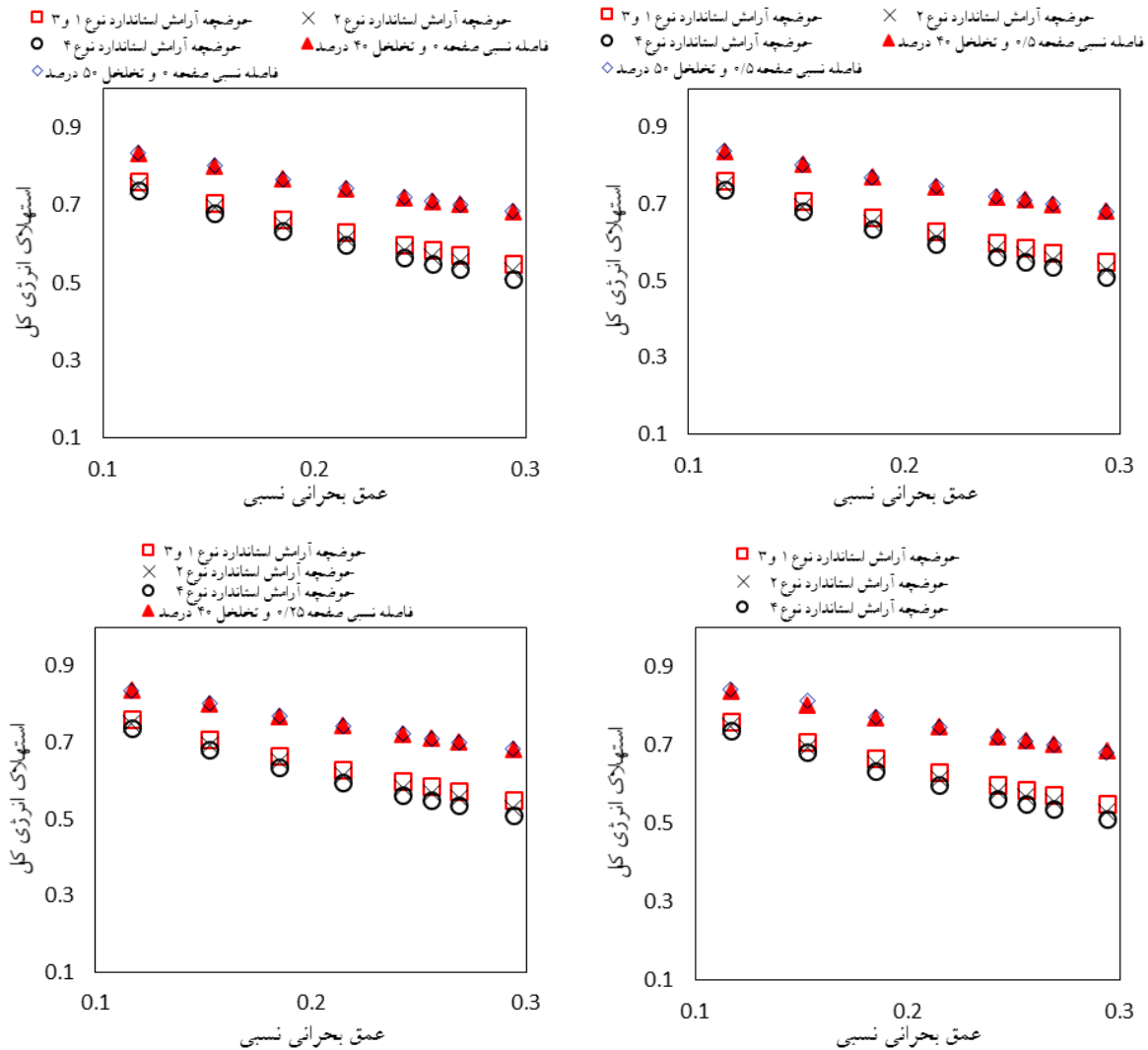
#### طول کل شیب‌شکن قائم

همانگونه که اشاره شد، مجموع طول شیب‌شکن قائم ساده و

پایین دست شود. با این تفاوت که برای تشکیل پرش در این سازه‌ها نیازی به عمق پایاب و یا تغییر در تراز کف حوضچه نیست که همین امر می‌تواند حسن استفاده از صفحات مشبک را نشان دهد. در ادامه در مطالعه حاضر، نتایج به‌دست آمده از شیب‌شکن قائم مجهز به صفحات مشبک افقی با فاصله‌های مختلف از لبه شیب‌شکن را با نتایج مربوط به بکارگیری حوضچه‌های آرامش نوع یک، دو، سه و چهار در این سازه مورد مقایسه قرار گرفت.

#### استهلاک انرژی کل

در شکل ۵ تغییرات استهلاک انرژی شیب‌شکن قائم مجهز به صفحه مشبک افقی با فواصل مختلف از لبه در مقابل عمق بحرانی نسبی ارائه و تغییرات استهلاک انرژی حاصل از نتایج تحقیق حاضر و شیب‌شکن قائم مجهز به حوضچه‌های آرامش مقایسه شده است. با بررسی دقیق شکل ۵ مشاهده می‌شود که تمامی مدل‌های مطالعات انجام شده رفتاری یکسان و مشابه همدیگر دارند و با افزایش عمق بحرانی نسبی جریان، استهلاک انرژی کل روند کاهشی دارد. در تمامی آزمایشات تحقیق حاضر، استهلاک انرژی شیب‌شکن قائم مجهز به صفحه مشبک

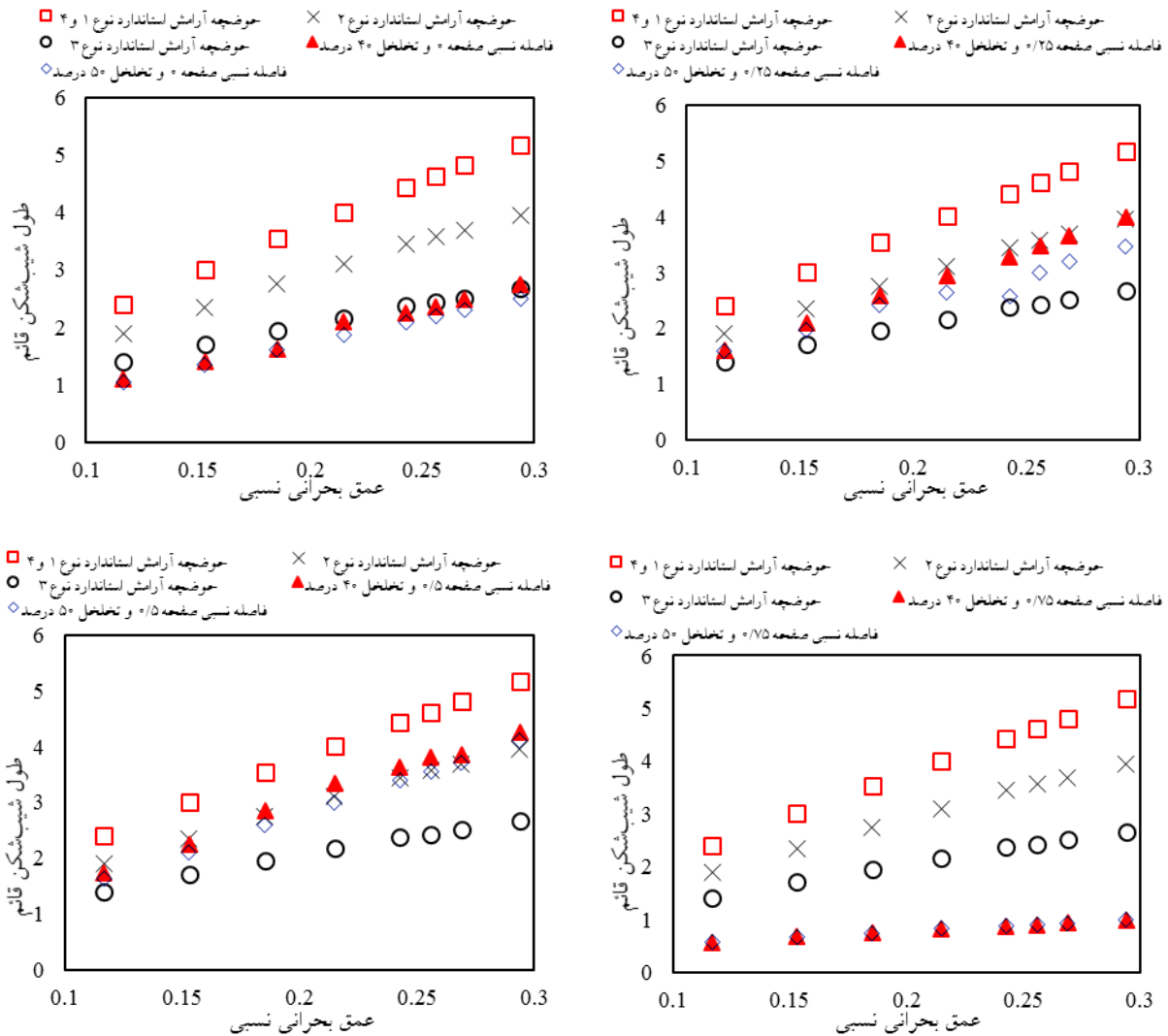


شکل ۵. مقایسه تغییرات استهلاک انرژی مدل‌های تحقیق حاضر با انواع حوضچه‌های آramش (رنگی در نسخه الکترونیکی)

نسبی ۰ و ۰/۷۵ از لبه نسبت به حوضچه‌های آramش نوع یک، دو و چهار دارای مقادیر کمتر طول شیب‌شکن هستند. این امر به دلیل تلاطم و تداخل آب و هوایی است که از نزدیک دیواره شیب‌شکن با سقوط جت‌های نواری از صفحات مشبک ایجاد می‌شود، درحالی که برای حوضچه‌های آramش تداخل آب و هوایی ایجاد شده در پرش هیدرولیکی پایین‌تر از دیواره شیب‌شکن اتفاق می‌افتد. در صفحه مشبک با فاصله نسبی ۰/۲۵ از لبه شیب‌شکن نسبت به حوضچه آramش نوع سه، طول شیب‌شکن بیشتری دارد که در اعماق بحرانی انتهایی کاملاً مشهود است. در فاصله نسبی ۰/۵ صفحه مشبک از لبه

طول حوضچه آramش پایین‌دست آن، به‌عنوان طول کل شیب‌شکن در نظر گرفته می‌شود. مقادیر طول نسبی شیب‌شکن قائم مجهز به صفحات مشبک افقی و حوضچه‌های آramش در مقابل عمق بحرانی نسبی در شکل ۶ نمایش داده شده است. مشاهده می‌شود که برای تمامی مدل‌ها با افزایش عمق بحرانی نسبی، طول نسبی شیب‌شکن قائم افزایش می‌یابد. مقایسه نتایج طول نسبی شیب‌شکن قائم مجهز به صفحات مشبک در دو تخلخل نشان داد که با افزایش تخلخل صفحات مشبک، طول کل نسبی شیب‌شکن کاهش می‌یابد. همچنین با مقایسه طول نسبی شیب‌شکن قائم مجهز به صفحات مشبک افقی با فاصله





شکل ۶. مقایسه تغییرات طول کل شیب‌شکن قائم مدل‌های تحقیق حاضر با انواع حوضچه‌های آرامش (رنگی در نسخه الکترونیکی)

صفحه مشبک افقی با فواصل مختلف از لبه نسبت به طول کل شیب‌شکن قائم مجهز به حوضچه‌های آرامش یک، دو، سه و چهار محاسبه شده و مقادیر متوسط آن در جدول ۲ ارائه شده است. مطابق جدول ۲ می‌توان استنباط کرد که افزایش فاصله صفحه مشبک از لبه شیب‌شکن تا اندازه ۱۰ سانتی‌متر (فاصله نسبی ۰/۵) سبب افزایش طول شیب‌شکن شده است و در فاصله نسبی ۰/۷۵ نیز به دلیل استغراق صفحه مشبک سبب کاهش چشمگیر طول شیب‌شکن شده است. برای مدل‌هایی که صفحه مشبک با فاصله نسبی ۰/۲۵ و ۰/۵ از لبه واقع شده است به‌طور میانگین و به ترتیب ۲۸ و ۴۲ درصد طول شیب‌شکن در

شیب‌شکن نیز به مراتب طول بیشتری در مقایسه با حوضچه آرامش نوع سه لازم هست و مقادیری مشابه حوضچه آرامش نوع دو دارد. همچنین صفحه در فاصله نسبی ۰/۷۵ به دلیل مستغرق شدن صفحه مشبک در این ناحیه، پارامتر طول تلاطم تشکیل نیافت. به عبارتی دیگر صفحه مشبک در این ناحیه همانند یک آرام‌کننده جریان عمل کرد. بنابراین این مدل نسبت به دیگر مدل‌های آزمایشگاهی، طول شیب‌شکن کمتری در مقایسه با حوضچه‌های آرامش را دارا است که می‌تواند در طراحی سازه‌های هیدرولیکی مدنظر قرار گیرد.

میزان افزایش و کاهش طول کلی شیب‌شکن مجهز به

## جدول ۲. متوسط کاهش طول کل نسبی شیب‌شکن

افزایش یا کاهش طول نسبی کل شیب‌شکن قائم مجهز به صفحه مشبک افقی (درصد)						تخلخل صفحات (درصد)	فاصله نسبی قرارگیری از لبه شیب‌شکن
نسبت به حوضچه نوع یک و چهار		نسبت به حوضچه نوع دو		نسبت به حوضچه نوع سه			
کاهش	افزایش	کاهش	افزایش	کاهش	افزایش		
۵۰	-	۳۶	-	۸	-	۴۰	فاصله نسبی ۰
۵۳	-	۴۰	-	۱۴	-	۵۰	
۲۷	-	۶	-	-	۳۵	۴۰	فاصله نسبی ۰/۲۵
۳۴	-	۱۶	-	-	۲۰	۵۰	
۲۰	-	-	۳	-	۴۷	۴۰	فاصله نسبی ۰/۵
۲۵	-	۴	-	-	۳۷	۵۰	
۷۹	-	۷۳	-	۶۲	-	۴۰	فاصله نسبی ۰/۷۵
۷۹	-	۷۳	-	۶۲	-	۵۰	

مقایسه با حوضچه آرامش نوع سه افزایش یافته است. همچنین نتایج جدول ۲ نشان می‌دهد برای مدل با فاصله نسبی ۰/۷۵ ساتی‌متری از لبه دارای کمترین طول نسبی شیب‌شکن است. متوسط کاهش طول نسبی شیب‌شکن در این مدل نسبت به حوضچه‌های آرامش نوع یک، دو، سه و چهار نیز به ترتیب برابر ۷۹، ۷۳، ۶۲ و ۷۹ درصد به دست آمده است.

## نتیجه‌گیری کلی

در تحقیق حاضر، بررسی تأثیر فاصله قرارگیری صفحه مشبک افقی از لبه شیب‌شکن قائم با جریان زیربحرانی در بالادست به صورت آزمایشگاهی روی استهلاک انرژی جریان و عمق استخر انجام شد. آزمایش‌ها در دو تخلخل صفحه مشبک ۴۰ و ۵۰ درصدی، چهار فاصله نسبی ۰، ۰/۲۵، ۰/۵ و ۰/۷۵ و محدوده عمق بحرانی نسبی (yc/h) ۰/۱۱ تا ۰/۲۹ انجام شد. نتایج به دست آمده از شیب‌شکن قائم مجهز به صفحه مشبک با فواصل مختلف از لبه تحقیق حاضر با نتایج حاصل از به کارگیری حوضچه‌های آرامش استاندارد نوع یک، دو، سه و چهار مورد مقایسه قرار گرفت. نتایج نشان داد که با افزایش پارامتر عمق بحرانی نسبی، پارامتر استهلاک انرژی کل روندی

کاهشی دارد. در هر دو تخلخل ۴۰ و ۵۰ درصدی صفحات به کار رفته، افزایش فاصله نسبی صفحه از لبه شیب‌شکن باعث کاهش تداخل آب و هوا شد اما با این حال تأثیری بر استهلاک انرژی جریان نداشت. همچنین تخلخل صفحات مشبک نیز همچون فاصله نسبی آن از لبه شیب‌شکن تأثیری بر استهلاک انرژی کل شیب‌شکن قائم ندارد و تنها باعث کاهش ابعاد حوضچه آرامش می‌شود. شیب‌شکن قائم مجهز به صفحات مشبک افقی مطالعه حاضر در مقایسه با شیب‌شکن قائم مجهز به حوضچه آرامش استاندارد نوع یک، دو، سه و چهار، به ترتیب باعث افزایش ۱۸، ۲۱، ۱۸ و ۲۵ درصدی استهلاک انرژی پایین دست شد. شیب‌شکن قائم مجهز به صفحات مشبک افقی با فاصله نسبی ۰/۷۵ در مقایسه با شیب‌شکن قائم ساده مجهز به حوضچه آرامش استاندارد نوع یک، دو، سه و چهار، طول نسبی شیب‌شکن را به ترتیب ۷۹، ۷۳، ۶۲ و ۷۹ درصد کاهش داد. با توجه به نتایج به دست آمده از تحقیق حاضر، از صفحات مشبک افقی می‌توان به صورت سازه الحاقی یا جایگزین حوضچه‌های آرامش در پایین دست شیب‌شکن قائم استفاده کرد. در زمینه به کارگیری این صفحات بایستی تمهیدات مناسب برای جلوگیری از انسداد روزه‌های این صفحات در برابر جریان آواری (جریان

حای شایخ و برگ درختان و رسوب) اتخاذ کرد. البته برای صفحات را بزرگ‌تر در نظر گرفت و همچنین شیب قرارگیری جلوگیری از انسداد صفحات مشبک افقی می‌توان قطر این صفحات را تا شیب ۳ درصد در نظر گرفت (۱۸).

### منابع مورد استفاده

1. Aslankara, V. 2007. Experimental investigation of tailwater effect on the energy dissipation through screens, Doctoral dissertation, MS thesis, Middle East Technical Univ. Ankara, Turkey.
2. Bagherzadeh, M., M. Mohammadi, R. Daneshfaraz and M. Dasineh. 2021. Comparison of hydraulic parameters of simple and gabion inclined drops with stilling basin in the downstream of the structure. In International Science and Innovation Congress, Turkey.
3. Daneshfaraz, R., M. Majedi Asl and M. Bagherzadeh. 2020. Experimental analysis of inclined gabion drop behavior in comparison to the standard stilling basins (USBR). *Iranian Journal of Soil and Water Research* 51(10): 2531-2541. doi: 10.22059/ijswr.2020.303078.668625. (in Farsi).
4. Daneshfaraz, R., V. Hasannia, R. Norouzi, P. Sihag, S. Sadeghfam and J. Abraham. 2021a. Investigating the Effect of Horizontal Screen on Hydraulic Parameters of Vertical Drop. *Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Civil Engineering* 1-9.
5. Daneshfaraz, R., E. Aminvash, A. Ghaderi, J. Abraham and M. Bagherzadeh. 2021b. SVM performance for predicting the effect of horizontal screen diameters on the hydraulic parameters of a vertical drop. *Applied Sciences* 11(9): 4238.
6. Daneshfaraz, R., M. Bagherzadeh, R. Esmaeeli, R. Norouzi and J. Abraham. 2021c. Study of the performance of support vector machine for predicting vertical drop hydraulic parameters in the presence of dual horizontal screens. *Water Supply* <https://doi.org/10.2166/ws.2020.279>.
7. Daneshfaraz, R., M. Bagherzadeh, A. Ghaderi, S. Di Francesco and M. M. Asl. 2021d. Experimental investigation of gabion inclined drops as a sustainable solution for hydraulic energy loss. *Ain Shams Engineering Journal* 12(4): 3451-3459.
8. Esen, I. I., J. M. Alhumoud and K. A. Hannan. 2004. Energy loss at a drop structure with a step at the base. *Water international* 29(4): 523-529.
9. Kabiri-Samani, A. R., E. Bakhshian and M. R. Chamani. 2017. Flow characteristics of grid drop-type dissipators. *Flow Measurement and Instrumentation* 54: 298-306.
10. Mirzaee, R., K. Hosseini and F. Mousavi. 2021. Numerical investigation on energy loss in vertical drop with horizontal serrated edge. *Journal of Hydraulics* 16(1): 23-36. doi: 10.30482/jhyd.2021.256774.1486 (in Farsi).
11. Nayebedeh, B., M. Lotfollahi-yaghin and R. Daneshfaraz. 2019. Experimental study of energy dissipation at a vertical drop equipped with vertical screen with gradually expanding at the downstream. *Amirkabir Journal of Civil Engineering* 52(12): 7-7. doi: 10.22060/ceej.2019.16493.6265.
12. Peterka, A. J. 1978. Hydraulic design of stilling basins and energy dissipators (No. 25). Department of the Interior, Bureau of Reclamation.
13. Rand, W. 1955. Flow geometry at straight drop spillways. In Proceedings of the American Society of Civil Engineers 81(9): 1-13.
14. Rajaratnam, N. and K. I. Hurlig. 2000. Screen-type energy dissipator for hydraulic structures. *Journal of Hydraulic Engineering* 126(4): 310-312.
15. Rajaratnam, N. 1976. Turbulent Jets (vol. 5). Elsevier.
16. Sharif, M. and A. Kabiri-Samani. 2018. Flow regimes at grid drop-type dissipators caused by changes in tail-water depth. *Journal of Hydraulic Research* 1-12.
17. Sadeghfam, S., A. A. Akhtari, R. Daneshfaraz and G. Tayfur. 2015. Experimental investigation of screens as energy dissipators in submerged hydraulic jump. *Turkish Journal of Engineering and Environmental Sciences* 38(2): 126-138.
18. U.S. Bureau of Reclamation, 1987. Design of small dams, 3rd Edition, U.S. Departemnt of the Interior.

## Experimental Study on Hydraulic Parameters of Vertical Drops Equipped to Horizontal Screen with Different Relative Distances

R. Daneshfaraz<sup>1\*</sup>, M. Bagherzadeh<sup>2</sup> and M. Jafari<sup>1</sup>

(Received: November 17-2021; Accepted: April 3-2022)

### Abstract

The present study aimed to investigate and compare the laboratory results of energy dissipation and length of vertical Drops equipped with horizontal Screens with the results of standard stilling basins of type one, two, three and four simple vertical Drops. For this purpose, 64 different experiments were performed on vertical Drops equipped with a horizontal Screen at relative distances of 0, 0.25, 0.5, and 0.75 from the edge of Drops, with a porosity of 40 and 50% of the Screen and a height of 20 cm. The results showed that in all experiments and at a constant flow, increasing the distance of the Screen from the edge of Drops does not have much affect the energy dissipation of the current. On average, the downstream energy dissipation for the present study has increased by more than 20% compared to the simple vertical Drop, which can be an excellent alternative to the downstream stilling basin. Among the models of the present study, the most significant reduction in the relative length of the Drops was achieved by the vertical Drops model with a horizontal Screen with a relative distance of 0.75. On average, when using horizontal Screen at four relative distances from the edge of Drops, the relative length of the Drops is reduced by more than 73% compared to the vertical Drops equipped with a standard stilling basin.

**Keywords:** Vertical Drop, Location of horizontal Screen, Energy dissipator, The edge of Drops, Hydraulic jump

---

1. Department of Civil Engineering, Faculty of Technical and Engineering, University of Maragheh, Maragheh, Iran.

\*: Corresponding author, Email: daneshfaraz@yahoo.com