

Experimental Investigation of the Effect of Positive Slope of the Horizontal Screen on Hydraulic Characteristics of Vertical Drop

RASOUL DANESHFARAZ^{1*}, VADOUD HASANNIYA¹, REZA MIRZAEI¹, ALI BAZYAR¹

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

(Received: June. 30, 2019- Revised: July. 30, 2019- Accepted: Aug. 4, 2019)

ABSTRACT

In the present study, 105 tests were carried out to investigate the effect of horizontal screen slope on hydraulic characteristics of vertical drop with the subcritical flow in upstream. The experiments were arranged in two models, plain vertical drop and vertical drop equipped with horizontal and sloping (three slopes) screens in two porosity ratios. The range of relative critical depth was from 0.07 to 0.24 the screen slopes were 7°, 14°, 21°, and the screen porosities were considered to be 40% and 50%. The relative wetted length of the screen, the relative turbulence length, the relative depth of pool, the relative downstream depth, and the relative residual energy were analyzed. In all cases, by increasing the relative critical depth, the turbulence length, pool depth, downstream depth, and relative residual energy were increased. The results showed by increasing the slope of screen, the characteristics of the relative wetted length of the horizontal screen, relative turbulence length, and relative pool depth increases. However, the slope of screen has no effect on the relative downstream depth and the relative residual energy. It was also observed that with increasing porosity ratio of the screen, the characteristics of the relative wetted length of the horizontal screen, relative turbulence length, and relative pool depth decreases, and the relative downstream depth increases. But the porosity of screens has an insignificant effect on the relative residual energy.

Keywords: porosity, relative residual energy, slope of the horizontal screen, vertical drop.

بررسی آزمایشگاهی تأثیر شیب مثبت صفحات مشبک افقی بر روی مشخصات هیدرولیکی شیب‌شکن قائم

رسول دانشفراز^{*}، ودود حسن نیا^۱، رضا میرزایی^۱، علی بازاریار^۱

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

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۴/۹ - تاریخ بازنگری: ۱۳۹۸/۵/۸ - تاریخ تصویب: ۱۳۹۸/۵/۱۳)

چکیده

در تحقیق حاضر، ۱۰۵ آزمایش با هدف بررسی تأثیر شیب صفحات مشبک افقی بر روی مشخصات هیدرولیکی شیب‌شکن قائم با جریان زیربحرانی در بالادست انجام شد. آزمایش‌ها در دو مدل شیب‌شکن قائم ساده و شیب‌شکن قائم مجهز به صفحات مشبک افقی و شیب‌دار (سه شیب) با دو نسبت تخلخل تنظیم شد. بازه عمق بحرانی نسبی از ۰/۰۷ تا ۰/۲۴ بوده و شیب صفحات مشبک افقی ۷°، ۱۴° و ۲۱° و نسبت تخلخل صفحات مشبک برابر با دو مقدار ۴۰ و ۵۰ درصد در نظر گرفته شد. پارامترهای طول نسبی خیس‌شده، طول نسبی تلاطم، عمق نسبی استخر، عمق نسبی پایین‌دست و انرژی باقی‌مانده نسبی مورد بررسی قرار گرفت. در تمامی حالات مورد بررسی با افزایش عمق بحرانی نسبی، پارامترهای طول نسبی تلاطم، عمق نسبی استخر، عمق نسبی پایین‌دست و انرژی باقی‌مانده نسبی استخر، عمق نسبی استخر، عمق نسبی پایین‌دست و انرژی باقی‌مانده نسبی افزایش می‌یابند. نتایج نشان داد که با افزایش شیب صفحات مشبک، پارامترهای طول نسبی خیس‌شده، طول نسبی تلاطم و عمق نسبی استخر افزایش می‌یابند. این در حالی است که شیب صفحات مشبک تأثیر چندانی بر روی عمق نسبی پایین‌دست و انرژی باقی‌مانده نسبی ندارد. همچنین مشاهده گردید که افزایش تخلخل صفحات مشبک باعث کاهش پارامترهای طول نسبی خیس‌شده، طول نسبی تلاطم و عمق نسبی استخر و افزایش عمق نسبی پایین‌دست می‌گردد. این در حالی است که تخلخل صفحات مشبک بر روی انرژی باقی‌مانده نسبی بی‌تأثیر است.

واژه‌های کلیدی: انرژی باقی‌مانده نسبی، تخلخل، شیب‌شکن قائم، شیب صفحه مشبک افقی.

مقدمه

صفحات مشبک یکی از سازه‌های جدید شناخته‌شده جهت مستهلک کردن انرژی جریان آب هستند که به دو صورت افقی در لبه سازه‌های روگذر جریان و قائم در پایین‌دست سازه‌های مولد جریان فوق بحرانی مورد استفاده قرار می‌گیرند. شیب‌شکن‌های قائم یکی از سازه‌های مولد جریان فوق بحرانی هستند که می‌توان از این صفحات برای افزایش استهلاک انرژی و کنترل جریان در پایین‌دست آن‌ها استفاده کرد (Rajaratnam and Hurtig, 2000).

در سال‌های اخیر مطالعات بر روی نحوه استفاده و تعیین رفتار جریان تحت تأثیر استفاده از صفحات مشبک قائم در پایین‌دست سازه‌های کوچک هیدرولیکی توسط محققینی همچون (Aslankara, Çakir, Rajaratnam and Hurtig, 2003; Norouzi, Daneshfaraz et al., 2017a, 2019 a, b, c, d; 2007) صورت گرفته است. اولین بار استفاده از صفحات مشبک قائم به عنوان مستهلک‌کننده انرژی جریان در پایین‌دست سازه‌های مولد جریان فوق بحرانی توسط (Rajaratnam and Hurtig, 2000) معرفی گردید. نتایج تحقیقات

این محققین نشان داد که صفحات مشبک دابل با تخلخل ۴۰ درصد دارای عملکرد مناسب‌تری در استهلاک انرژی جریان هستند. (Çakir, 2003) به بررسی آزمایشگاهی تأثیر تخلخل صفحات مشبک بر روی استهلاک انرژی جریان پرداخت. این محقق با استفاده از چهار تخلخل مختلف صفحات مشبک قائم نشان داد که تخلخل ۴۰٪ صفحات مشبک برای نسبت‌های بازشدگی درجه کوچک دارای بهترین عملکرد است. بعد از آن بررسی تأثیر شیب صفحات مشبک قائم بر روی استهلاک انرژی جریان توسط (Balkış, 2004) صورت پذیرفت. نتایج این پژوهش نشان داد که تغییرات شیب صفحات مشبک قائم تأثیر چندانی بر روی استهلاک انرژی جریان ندارد. بررسی تأثیر عمق پایاب و آرایش چندتایی صفحات مشبک قائم بر روی استهلاک انرژی جریان نشان داد که عمق پایاب تأثیر چندانی بر روی استهلاک انرژی جریان ندارد. این در حالی است که استفاده از صفحات مشبک به صورت چندتایی در مقایسه با حالت منفرد استهلاک انرژی بیشتری ایجاد می‌کند (Aslankara, 2007). صادق‌فام و همکاران (Sadeghfam et al., 2015) با استفاده از مطالعات آزمایشگاهی به بررسی رفتار پرش هیدرولیکی تحت تأثیر حضور

از محققین مورد بررسی قرار گرفت (Nayebzadeh et al., 2019). نتایج حاصل از بررسی شیب‌شکن‌های قائم نشان داد که استهلاک انرژی برای جریان‌های زیر بحرانی ناشی از برخورد جت به کف استخر و تلاطم در داخل آن و برای جریان‌های فوق بحرانی نیز ضربه جت به کف و پاشیدگی جریان در بالادست است (Rajaratnam and Chamani, 1995; Daneshfaraz et al., 2019a). دلیل اصلی ایجاد عمق در داخل استخر شیب‌شکن‌های قائم ساده را وجود جریان برگشتی به سمت دیواره لبه شیب‌شکن گزارش نمودند. آن‌ها در مطالعات خود روابط (۴) و (۵) را به ترتیب برای بیان عمق نسبی استخر و انرژی باقی‌مانده نرمال شیب‌شکن قائم ساده پیشنهاد نمودند.

$$\frac{y_p}{h} = 1.107 \left(\frac{y_c}{h} \right)^{0.719} \quad (\text{رابطه ۴})$$

$$\frac{E_d}{E_u} = 1 - \left[0.0896 \left(\frac{y_c}{h} \right)^{-0.766} \right] \quad (\text{رابطه ۵})$$

بررسی آزمایشگاهی وجود یک پله هم‌عرض کانال، با مقطع مربعی شکل در پایین‌دست شیب‌شکن قائم و چسبیده به دیواره آن توسط اسن و همکاران (Esen et al., 2004) انجام شد. نتایج مطالعات آن‌ها نشان داد که با افزایش ارتفاع نسبی پله، عمق نسبی پایین‌دست و استهلاک انرژی کل افزایش می‌یابد. روابط (۶) و (۷) نیز توسط آن‌ها به ترتیب برای بیان عمق نسبی پایین‌دست شیب‌شکن قائم ساده و شیب‌شکن قائم مجهز به پله ارائه شد.

$$\frac{y_d}{h} = 0.4824 \left(\frac{y_c}{h} \right)^{1.1854} \quad (\text{رابطه ۶})$$

$$\frac{y_d}{h} = 0.4824 \left(\frac{y_c}{h} \right)^{1.1854} \left[1 + 0.5243 \left(\frac{h_s}{h} \right)^{1.4877} \left(\frac{y_c}{h} \right)^{0.07571} \right] \quad (\text{رابطه ۷})$$

در رابطه (۷)، h_s ارتفاع پله است. افزون بر این، مطالعات متعددی نیز دلیل اصلی افزایش طول شیب‌شکن و کاهش عمق نسبی استخر را افزایش شیب در بالادست و پایین‌دست شیب‌شکن معرفی نمودند (Hong et al., 2010; Liu et al., 2014).

بررسی آزمایشگاهی تأثیر مستهلک‌کننده‌های انرژی به صورت شبکه‌ای و شیاری بر روی استهلاک انرژی شیب‌شکن قائم توسط (Kabiri-Samani et al., 2017) مورد بررسی و ارزیابی قرار گرفت. نتایج تحقیقات آن‌ها نشان داد که با افزایش عدد فرود بالادست شیب‌شکن، طول نسبی خیس شده این مستهلک‌کننده-ها افزایش یافته و بکارگیری این نوع سازه در شیب‌شکن قائم سبب کاهش قابل‌ملاحظه‌ای در انرژی باقی‌مانده نرمال می‌شود. به دنبال آن تأثیر عمق پایاب بر روی مشخصات هیدرولیکی شیب‌شکن قائم مجهز به مستهلک‌کننده‌های شیاری انجام و نتایج نشان داد که افزایش عمق پایاب باعث به وجود آمدن دو نوع رژیم

صفحات مشبک قائم پرداختند و نشان دادند که استفاده از صفحات مشبک نسبت به پرش هیدرولیکی آزاد و مستغرق، انرژی بیشتری را مستهلک می‌سازد. صادق‌فام و همکاران (Sadeghfam et al., 2019) نشان دادند که اسکرین‌های قائم در رسوب‌گیری و تثبیت بستر موثر هستند.

دانشفراز و همکاران (Daneshfaraz et al., 2017a) به بررسی عددی تأثیر توأم بکارگیری بلوک و صفحات مشبک قائم در استهلاک انرژی در پایین‌دست دریاچه مولد جریان فوق بحرانی پرداختند. نتایج این محققین نشان داد که استفاده از بلوک در بالادست صفحات مشبک قائم باعث کاهش بیشتر انرژی جریان نسبت به حالت بدون بلوک می‌گردد. دانشفراز و همکاران (Daneshfaraz et al., 2019a) با بررسی پارامترهای هیدرولیکی شیب‌شکن قائم مجهز به صفحه مشبک افقی با جریان فوق بحرانی در بالادست نشان دادند که عمق نسبی استخر و استهلاک انرژی نسبی در مقایسه با شیب‌شکن قائم ساده افزایش می‌یابد. بررسی آزمایشگاهی تأثیر صفحات مشبک افقی با جریان زیر بحرانی در بالادست شیب‌شکن قائم نیز توسط حسن‌نیا (Hasanniya, 2019) انجام گرفت. نتایج مطالعات ایشان نشان داد که استفاده از صفحات مشبک افقی در لبه شیب‌شکن‌های قائم باعث افزایش پارامترهای عمق نسبی استخر، عمق نسبی پایین‌دست و استهلاک انرژی نسبی می‌شود. همچنین نتایج این محققین نشان داد که صفحات مشبک باعث تبدیل جریان فوق بحرانی به جریان زیر بحرانی در پایین‌دست و حذف حوضچه آرامش می‌گردد. ایشان برای بیان عمق نسبی استخر، عمق نسبی پایین‌دست و انرژی باقی‌مانده نسبی به ترتیب روابط (۱) تا (۳) را ارائه نمودند.

$$\frac{y_p}{h} = 1.47 \left(\frac{y_c}{h} \right)^{1.24} (P)^{-0.23} + 0.127 \quad (\text{رابطه ۱})$$

$$\frac{y_d}{h} = 1.17 \left(\frac{y_c}{h} \right)^{1.14} (P)^{-0.0158} + 0.0538 \quad (\text{رابطه ۲})$$

$$\frac{E_d}{E_u} = 1 - \left[-0.7639 \left(\frac{y_c}{h} \right)^{0.536} (P)^{-0.00246} + 1.083 \right] \quad (\text{رابطه ۳})$$

در روابط فوق، y_p عمق استخر، y_c عمق بحرانی، h ارتفاع شیب‌شکن، P درصد تخلخل صفحه مشبک، y_d عمق پایین‌دست، E_d انرژی مخصوص پایین‌دست شیب‌شکن و E_u انرژی کل در بالادست شیب‌شکن می‌باشند.

شیب‌شکن‌های قائم یکی از سازه‌های کنترل‌کننده‌ای هستند که برای ایجاد شیب ملایم در فواصل مختلف بر روی کانال‌های روباز مورد استفاده قرار می‌گیرند تا سطح آب پایین‌دست و انرژی جریان را کنترل کند. (Daneshfaraz et al., 2020a). نحوه استهلاک انرژی جریان در شیب‌شکن‌های قائم ساده با جریان زیر بحرانی و فوق بحرانی در بالادست توسط برخی

آزمایشگاهی استفاده گردید. همچنین از صفحات مشبک پلی-اتیلنی با دو تخلخل ۴۰ و ۵۰ درصدی به طول ۶۰ سانتی‌متر، هم‌عرض کانال و به ضخامت یک سانتی‌متر به کار گرفته شد. این صفحات به صورت افقی در لبه شیب‌شکن با سه شیب ۷°، ۱۴° و ۲۱° مورد استفاده قرار گرفتند. در تحقیق حاضر ۱۰۵ آزمایش در محدوده دبی جریان ۲/۵ تا ۱۴/۱۶ لیتر در ثانیه انجام شد. نمای شماتیک جریان در شیب‌شکن قائم مجهز به صفحه مشبک افقی شیب‌دار در شکل (۱) نشان داده شده است.

پس از ساخت مدل آزمایشگاهی در هر سری از آزمایش‌ها ابتدا دبی جریان با استفاده از روتامترهای نصب‌شده بر روی پمپ تنظیم و پس از پایداری کامل جریان (بعد از گذشت ۱۵ دقیقه) اقدام به اندازه‌گیری پارامترها گردید. با پایداری شرایط جریان بر روی مدل آزمایشگاهی، پارامترهای عمق بالادست، عمق لبه شیب‌شکن، طول خیس‌شده صفحات مشبک شیب‌دار، طول تلاطم ایجادشده در داخل استخر، عمق استخر و عمق پایین‌دست اندازه‌گیری شدند. اندازه‌گیری عمق آب در پنج نقطه از عرض کانال با استفاده از عمق‌سنج نقطه‌ای با دقت یک میلی‌متر و اندازه‌گیری طول‌های مورد آزمایش با استفاده از یک خط‌کش با دقت یک میلی‌متر صورت پذیرفت. شکل (۲) نمایی از جریان بر روی مدل آزمایشگاهی مطالعه حاضر را نشان می‌دهد.

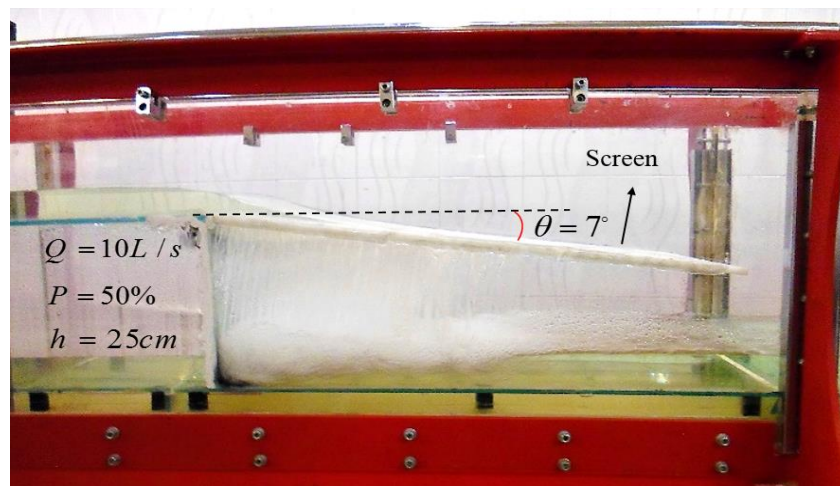
جریان جت‌های سقوطی حباب‌دار و رژیم جریان‌های سطحی می‌گردد (Sharif and Kabiri-Samani, 2018).

با بررسی پیشینه مطالعات مربوط به بکارگیری صفحات مشبک افقی در لبه شیب‌شکن قائم ملاحظه گردید که استقرار این صفحات با ایجاد تلاطم ناشی از عبور جریان از داخل روزنه‌های آن، سبب افزایش استهلاک انرژی می‌گردد. از آنجایی که در نظر گرفتن شیب مثبت برای این صفحات می‌تواند بر روی پارامترهای هیدرولیکی شیب‌شکن قائم تأثیرگذار باشد و مطالعاتی در این زمینه صورت نگرفته است، هدف تحقیق حاضر بررسی مشخصات هیدرولیکی شیب‌شکن قائم مجهز به صفحه مشبک افقی با در نظر گرفتن سه شیب مثبت برای این صفحات می‌باشد.

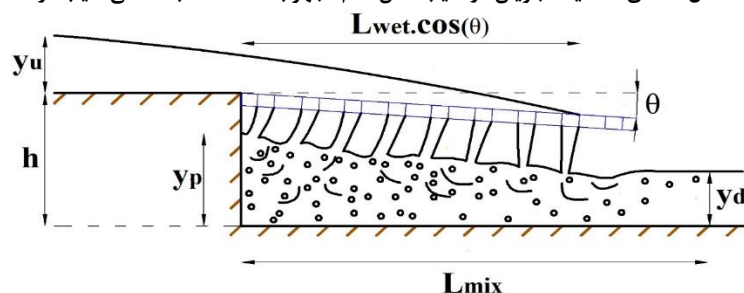
مواد و روش‌ها

مشخصات مدل آزمایشگاهی

در تحقیق حاضر برای انجام آزمایش‌ها از یک فلوم آزمایشگاهی به طول ۵، عرض ۰/۳ و ارتفاع ۰/۴۵ متر استفاده گردید. جریان موردنیاز توسط دو عدد پمپ مجهز به روتامتر با توان پمپاژ هر کدام ۷/۵ لیتر در ثانیه فراهم شد. یک شیب‌شکن قائم به طول ۱/۲، عرض ۰/۳ و ارتفاع ۰/۲۵ متر از جنس شیشه در فلوم



شکل ۱. نمای شماتیک جریان در شیب‌شکن قائم مجهز به صفحه مشبک افقی شیب‌دار



شکل ۲. شماتیک جریان بر روی مدل آزمایشگاهی

آنالیز ابعادی

ارتفاع شیب‌شکن و شرایط جریان در پایین‌دست بر طول خیس-شده صفحه مشبک افقی تأثیری ندارد. بنابراین با آنالیز ابعادی در نهایت طول نسبی خیس شده صفحات مشبک افقی به صورت تابعی از عدد فرود بالادست (Fr_u)، تخلخل و شیب صفحات مشبک در رابطه (۱۴) بدست آمد.

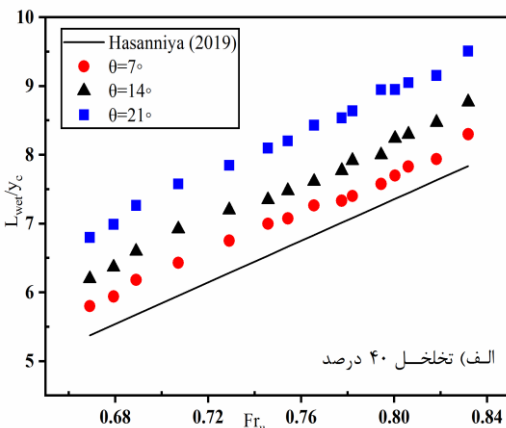
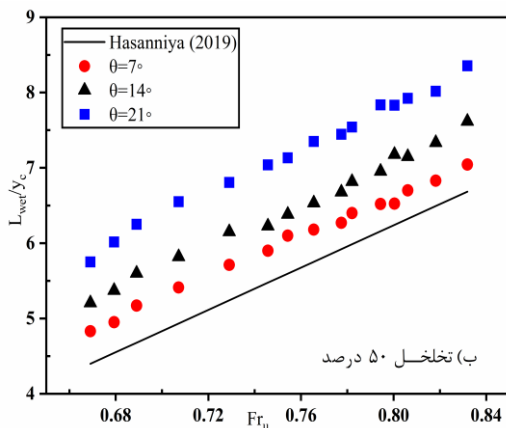
$$\frac{L_{wet}}{y_c} = f 6(Fr_u, P, \theta) \quad (\text{رابطه ۱۴})$$

نسبت‌های بی‌بعد عمق بحرانی نسبی در محدوده ۰/۰۷ تا ۰/۲۴، شیب صفحات مشبک افقی 7° ، 14° و 21° ، نسبت تخلخل صفحات مشبک برابر با دو مقدار ۴۰ و ۵۰ درصد و عدد فرود بالادست در محدوده ۰/۶۶ تا ۰/۸۴ می‌باشد.

نتایج و بحث

طول نسبی خیس شده صفحات مشبک افقی

طولی از صفحات مشبک افقی که تحت تأثیر عبور جریان از روی آن، خیس می‌شود، با عنوان طول خیس‌شده صفحات مشبک شناخته می‌شود. شکل (۳- الف و ب) بیانگر تغییرات طول نسبی خیس شده صفحات مشبک افقی شیب‌دار با سه شیب مختلف و با تخلخل‌های مختلف در مقابل عدد فرود بالادست می‌باشد.



شکل ۳. تغییرات طول نسبی خیس شده صفحات مشبک شیب‌دار در مقابل عدد فرود بالادست با الف) تخلخل ۴۰ درصد ب) تخلخل ۵۰ درصد

در تحقیق حاضر از صفحه مشبک افقی با دو درصد تخلخل و سه زاویه قرارگیری نسبت به افق، برای بررسی پارامترهای هیدرولیکی شیب‌شکن قائم استفاده شد. با در نظر گرفتن شکل (۲)، انرژی مخصوص پایین‌دست شیب‌شکن قائم (E_d) را می‌توان تابعی از مشخصات هندسی شیب‌شکن قائم، صفحات مشبک و مشخصات مربوط به جریان به صورت رابطه (۸) در نظر گرفت.

$$E_d = f(r, m, g, y_c, y_u, h, B, q, P, E_u) \quad (\text{رابطه ۸})$$

در رابطه (۸)، P تخلخل صفحات مشبک، h ارتفاع شیب-شکن، q شیب صفحات مشبک، ρ جرم مخصوص آب، μ لزوجت دینامیکی، g شتاب گرانش زمین، B عرض کانال، y_c عمق بحرانی، y_u عمق بالادست شیب‌شکن و E_u انرژی کل در بالادست شیب‌شکن می‌باشند. با استفاده از روش پی‌باکینگهام و با در نظر گرفتن پارامترهای y_u ، ρ و g به عنوان پارامترهای تکراری، در نهایت انرژی باقی‌مانده نرمال به صورت تابعی از پارامترهای مستقل به صورت رابطه (۹) به دست آمدند.

$$\frac{E_d}{E_u} = f 1\left(\frac{y_c}{h}, P, \theta, Re_u, Fr_u\right) \quad (\text{رابطه ۹})$$

در رابطه فوق، از پارامترهای بی‌بعد عدد رینولدز بالادست (Re_u) به دلیل قرار داشتن عدد رینولدز در محدوده جریان متلاطم (Daneshfaraz et al., 2017b)، از عدد فرود بالادست (Fr_u) به علت مستقل بودن جریان پایین‌دست شیب‌شکن از عدد فرود در جریان‌های زیربحرانی در بالادست (Kabiri-Samani et al., 2017) می‌توان صرف‌نظر کرد، بنابراین:

$$\frac{E_d}{E_u} = f 2\left(\frac{y_c}{h}, P, \theta\right) \quad (\text{رابطه ۱۰})$$

به صورت مشابه، برای عمق استخر (y_p)، عمق پایین-دست شیب‌شکن (y_d) و طول تلاطم (L_{mix}) به ترتیب روابط (۱۱)، (۱۲) و (۱۳) بدست آمد.

$$\frac{y_p}{h} = f 3\left(\frac{y_c}{h}, P, \theta\right) \quad (\text{رابطه ۱۱})$$

$$\frac{y_d}{h} = f 4\left(\frac{y_c}{h}, P, \theta\right) \quad (\text{رابطه ۱۲})$$

$$\frac{L_{mix}}{h} = f 5\left(\frac{y_c}{h}, P, \theta\right) \quad (\text{رابطه ۱۳})$$

طول خیس‌شده صفحات مشبک افقی مشخصه بسیار مهمی است که در شیب‌شکن‌های مجهز به صفحه مشبک افقی باید مورد تجزیه و تحلیل ابعادی قرار گیرد. با توجه به اینکه تمامی آزمایش‌ها، در شرایطی صورت پذیرفت که عمق استخر زیر صفحه مشبک تأثیری بر جریان بالادست نداشته باشد، بنابراین

نشان می‌دهد با افزایش تخلخل صفحات مشبک در یک شیب ثابت طول نسبی خیس شده صفحات مشبک کاهش می‌یابد. درصد افزایش طول نسبی خیس شده صفحات مشبک شیب‌دار برای شیب‌ها و تخلخل‌های مختلف نسبت به حالت بدون شیب مطابق مطالعه (Hasanniya, 2019) در جدول (۱) آورده شده است.

نتایج شکل (۳- الف و ب) نشان می‌دهد که با افزایش عدد فرود بالادست شیب‌شکن برای تمامی مدل‌های آزمایشگاهی مشخصه طول نسبی خیس شده صفحات مشبک افزایش می‌یابد. لازم به ذکر است (Daneshfaraz et al., Hasanniya, 2019)؛ همچنین نتایج (2020b) نیز نتایج مشابهی را گزارش داده است. نشان داد که با افزایش شیب صفحات مشبک، طول نسبی خیس شده صفحات مشبک افزایش می‌یابد. این در حالی است که نتایج

جدول ۱. درصد افزایش طول نسبی خیس شده صفحات مشبک شیب‌دار برای شیب‌ها و تخلخل‌های مختلف نسبت به حالت بدون شیب

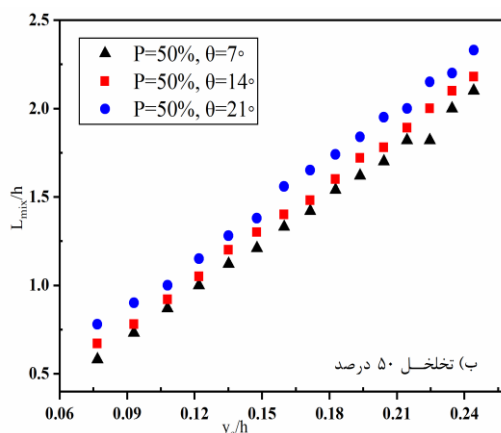
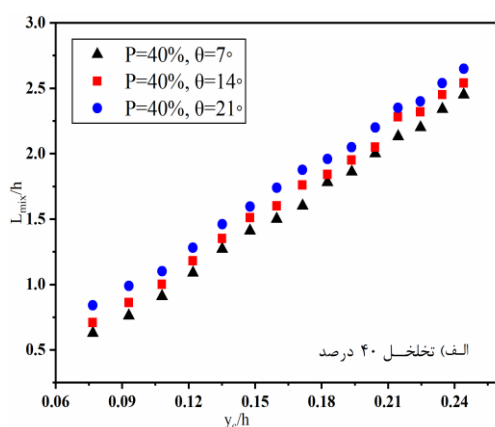
درصد افزایش طول نسبی خیس شده صفحات مشبک شیب‌دار نسبت به نتایج مطالعه (Hasanniya, 2019)		شیب صفحات مشبک
$P = 50\%$	$P = 40\%$	
۷/۴۷	۶/۲	$q = 7^\circ$
۱۵/۲	۱۲/۸۵	$q = 14^\circ$
۲۸/۱	۲۳/۶۴	$q = 21^\circ$

خیس شده صفحات مشبک شیب‌دار نسبت به حالت بدون شیب برای تمامی شیب‌ها افزایش می‌یابد.

طول نسبی تلاطم

فاصله لبه شیب‌شکن تا آخرین نقطه تلاطم در پایین دست شیب‌شکن قائم به عنوان طول تلاطم شناخته می‌شود (Sharif and Kabiri-Samani, 2018). شکل (۴) بیانگر تغییرات طول نسبی تلاطم جریان در حوضچه پایین دست شیب‌شکن قائم مجهز به صفحات مشبک افقی شیب‌دار نسبت به عمق بحرانی نسبی می‌باشد. مطابق شکل (۴) مشاهده می‌شود که با افزایش عمق بحرانی نسبی، طول نسبی تلاطم برای تمامی آزمایش‌ها افزایش می‌یابد.

مطابق مقادیر ارائه شده در جدول (۱) ملاحظه می‌گردد که افزایش شیب صفحات مشبک باعث افزایش طول نسبی خیس شده صفحات مشبک شیب‌دار نسبت به حالت بدون شیب می‌گردد. به طوری که با افزایش شیب از 7° به 21° ، برای صفحات مشبک با تخلخل‌های ۴۰ و ۵۰ درصد، افزایش طول نسبی خیس شده صفحات مشبک شیب‌دار نسبت به حالت بدون شیب مربوط به نتایج مطالعه (Hasanniya, 2019) به ترتیب از ۶/۲ به ۲۳/۶۴ درصد و ۷/۴۷ به ۲۸/۱ درصد افزایش می‌یابد. دلیل این امر افزایش سرعت بر روی صفحات مشبک در اثر افزایش نیروی ثقل آب است. همچنین مقایسه تخلخل صفحات مشبک نشان داد که با افزایش تخلخل صفحات مشبک، درصد افزایش طول نسبی

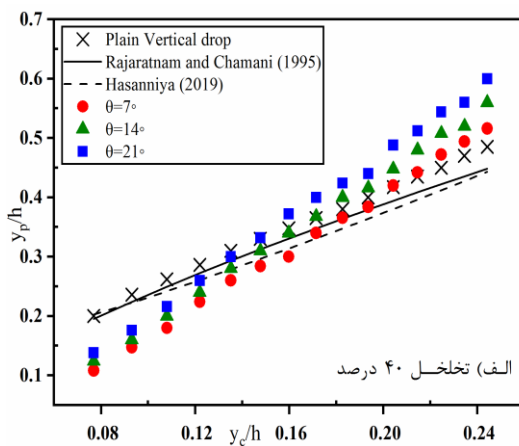


شکل ۴. تغییرات طول نسبی تلاطم در مقابل عمق بحرانی نسبی با الف) تخلخل ۴۰ درصد ب) تخلخل ۵۰ درصد

دلیل این امر افزایش طول نسبی خیس شده در اثر افزایش نیروی ثقل آب بر روی صفحات مشبک می‌باشد. لازم به ذکر است هر

نتایج نشان می‌دهد که برای هر دو تخلخل ۴۰ و ۵۰ درصد، با افزایش شیب صفحات مشبک، طول نسبی تلاطم در شیب‌شکن‌های قائم مجهز به صفحات مشبک افقی افزایش می‌یابد.

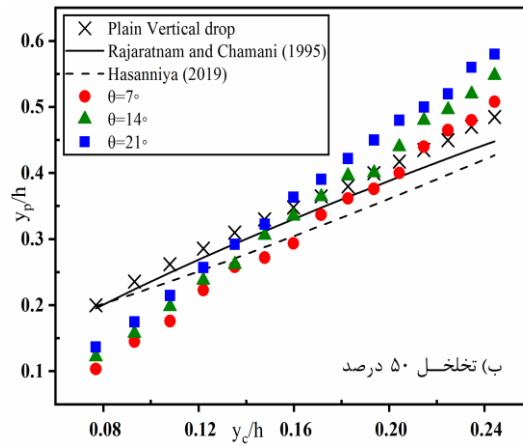
عمقی که در نزدیکی دیواره لبه شیب‌شکن ناشی از تلاطم جریان و یا جریان برگشتی به وجود می‌آید عمق استخر نامیده می‌شود. شکل (۵) تغییرات عمق نسبی استخر در مقابل عمق بحرانی نسبی در دو تخلخل متفاوت را نشان داده و بیان می‌دارد که با افزایش عمق بحرانی نسبی، عمق نسبی استخر برای تمامی مدل‌ها افزایش می‌یابد. برای شیب‌شکن قائم ساده در شکل (۵) مشاهده می‌شود که نتایج مربوط به تحقیق حاضر در مقایسه با نتایج راجاراتنام و چمنی (Rajaratnam and Chamani, 1995) دارای همبستگی و مطابقت خوبی است.



شکل ۵. تغییرات عمق نسبی استخر در مقابل عمق نسبی پایین‌دست با الف) تخلخل ۴۰ درصد ب) تخلخل ۵۰ درصد

چه فاصله آخرین نقطه خیس‌شده صفحات بیشتر باشد جریان‌های ریزشی ناشی از آن نیز طول بیشتری از جریان پایین‌دست را با تلاطم مواجه می‌سازد. همچنین نتایج مربوط به تأثیر تخلخل صفحات مشبک بر روی طول نسبی تلاطم نشان می‌دهد که شیب‌شکن‌های قائم مجهز به صفحات مشبک شیب‌دار با تخلخل ۴۰٪ در شیب‌های ۷°، ۱۴° و ۲۱° به ترتیب ۱۱/۶۳، ۱۲/۳ و ۱۱/۱۱ درصد طول نسبی تلاطم بیشتری نسبت به صفحات مشبک ۵۰٪ دارد.

عمق نسبی استخر



استخر بیشتری نسبت به صفحات مشبک با شیب ۷° و ۱۴° است. مقایسه نتایج تخلخل صفحات مشبک نیز برای تمامی مدل‌های آزمایشگاهی نشان داد که تخلخل صفحات مشبک تأثیر ناچیزی بر عمق نسبی استخر دارد، به‌گونه‌ای که صفحات مشبک با تخلخل ۴۰ درصدی در مقایسه با تخلخل ۵۰ درصدی کمتر از دو درصد باعث افزایش عمق نسبی استخر می‌گردد.

عمق نسبی پایین‌دست

شکل (۶) نشان‌دهنده تأثیر صفحات مشبک بر روی عمق نسبی پایین‌دست نسبت به عمق بحرانی نسبی است. با توجه به این نمودار مشاهده می‌گردد که افزایش عمق بحرانی نسبی باعث افزایش پارامتر بدون بعد عمق نسبی پایین‌دست برای شیب‌شکن قائم ساده و شیب‌شکن‌های قائم مجهز به صفحات مشبک افقی می‌گردد.

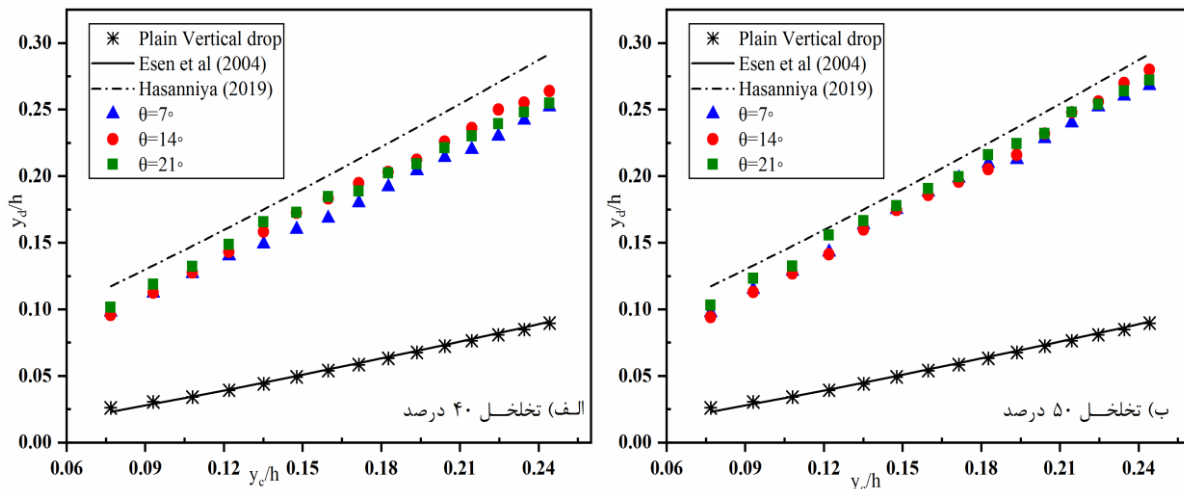
همان‌گونه که در شکل (۶) ملاحظه می‌گردد عمق نسبی پایین‌دست شیب‌شکن قائم ساده تحقیق حاضر در مقایسه با نتایج مطالعات ایسن و همکاران (Esen et al, 2004) دارای تطابق و نزدیکی مناسبی است. نتایج نشان داد که استفاده از صفحات مشبک شیب‌دار باعث افزایش عمق نسبی پایین‌دست نسبت به شیب‌شکن قائم ساده شده که این افزایش با افزایش عمق بحرانی

مطابق شکل (۵) ملاحظه می‌گردد که استفاده از صفحات مشبک شیب‌دار در لبه شیب‌شکن قائم برای اعماق بحرانی نسبی کوچکتر از ۰/۱۵ باعث کاهش عمق نسبی استخر نسبت به دو مدل شیب‌شکن قائم ساده و مجهز به صفحات مشبک افقی می‌گردد. این در حالی است که با افزایش عمق بحرانی نسبی مشخصه عمق نسبی استخر مربوط به مدل شیب‌شکن قائم مجهز به صفحات شیب‌دار نسبت به دو مدل شیب‌شکن قائم ساده و مجهز به صفحات مشبک افقی افزایش می‌یابد. دلیل این امر این است که در اعماق بحرانی نسبی کمتر، شیب صفحات مشبک باعث انتقال جریان به سمت پایین‌دست شیب‌شکن می‌گردد که منجر به کاهش عمق نسبی استخر می‌گردد. این در حالی است که با افزایش عمق بحرانی نسبی شدت برخورد جت کج شده توسط سوراخ‌های صفحات مشبک به سمت دیواره شیب‌شکن باعث تلاطم بیشتر و در نتیجه باعث افزایش عمق نسبی استخر می‌گردد.

مطابق شکل (۵-الف و ب) مشاهده می‌شود که برای هر دو تخلخل صفحات مشبک، با افزایش شیب صفحات مشبک عمق نسبی استخر نیز افزایش می‌یابد. به‌طوری‌که صفحات مشبک شیب‌دار با شیب ۲۱° دارای ۱۵/۱۵ و ۷/۴۳ درصد عمق نسبی

نسبی پایین دست شیب شکن قائم مجهز به صفحات مشبک افقی شیب دار با تخلخل های مختلف نسبت به شیب شکن قائم ساده آورده شده است.

نسبی بیشتر می شود. همچنین شیب دار کردن صفحات مشبک باعث کاهش عمق نسبی پایین دست نسبت به شیب شکن قائم مجهز به صفحات مشبک افقی بدون شیب گزارش شده توسط (Hasanniya, 2019) می گردد. در جدول (۲) درصد افزایش عمق



شکل ۶. تغییرات عمق نسبی پایین دست در مقابل عمق بحرانی نسبی با الف) تخلخل ۴۰ درصد ب) تخلخل ۵۰ درصد

جدول ۲. درصد افزایش عمق نسبی پایین دست شیب شکن قائم مجهز به صفحات مشبک افقی شیب دار با تخلخل های مختلف نسبت به شیب شکن قائم ساده

درصد افزایش عمق نسبی پایین - دست		شیب صفحات مشبک
$P = 50\%$	$P = 40\%$	
۲۴۰	۲۳۵	$q = 7^\circ$
۲۴۰	۲۳۵/۶	$q = 14^\circ$
۲۴۴	۲۳۶/۵	$q = 21^\circ$

نرمال حاصل از نتایج تحقیق حاضر و نتایج مطالعه (Hasanniya, 2019) مورد مقایسه قرار گرفته است. همان طور که در شکل (۷) مشاهده می شود رفتار تمامی مدل های مطالعات انجام شده مشابه همدیگر می باشند. به گونه ای که با افزایش عمق بحرانی نسبی پارامتر انرژی باقی مانده نسبی افزایش می یابد.

نتایج نشان داد که استفاده از صفحات مشبک شیب دار در شیب شکن های قائم باعث کاهش انرژی باقی مانده نسبی نسبت به شیب شکن قائم ساده شده که با افزایش عمق بحرانی نسبی این کاهش بیشتر می شود. کاهش انرژی باقی مانده نسبی در شیب شکن قائم مجهز به صفحات مشبک افقی ناشی از برخورد جت به آب داخل استخر و ایجاد شرایط تداخل آب با هوا ایجاد می گردد. همچنین مقایسه نتایج تحقیق حاضر با تحقیق حسن نیا (Hasanniya, 2019) نشان می دهد که شیب دار کردن صفحات مشبک مورد استفاده در شیب شکن های قائم تأثیر چندانی در

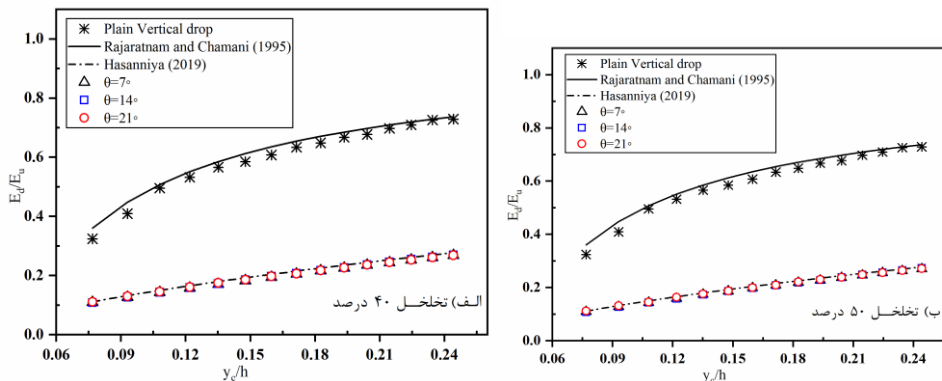
مطابق نتایج ارائه شده در جدول (۲) ملاحظه می گردد که شیب صفحات مشبک تأثیری بر روی عمق پایین دست ندارد. بر این اساس با افزایش تخلخل صفحات مشبک، درصد افزایش عمق نسبی پایین دست نسبت به شیب شکن قائم ساده افزایش می یابد. همچنین مشخص گردید که استفاده از صفحات مشبک شیب دار با کاهش عدد فرود پایین دست سازه شیب شکن از بازه ۴/۴ تا ۶/۴ به بازه ۰/۶۴ الی ۰/۹۶ باعث زیر بحرانی شدن جریان پایین دست می گردد که می تواند مانع از تخریب سازه های هیدرولیکی پایین دست گردد.

انرژی باقی مانده نسبی

شکل (۷) نشان دهنده تغییرات انرژی باقی مانده نسبی در مقابل عمق بحرانی نسبی است. در این شکل تغییرات انرژی باقی مانده نسبی شیب شکن قائم ساده تحقیق حاضر با تحقیق (Rajaratnam and Chamani, 1995) و انرژی باقی مانده نسبی

مقایسه نتایج تأثیر شیب و تخلخل صفحات مشبک در انرژی باقی مانده نسبتی نیز نشان داد که شیب و صفحات مشبک تأثیری بر روی انرژی باقی مانده نسبتی ندارد.

انرژی باقی مانده نسبتی ندارد. با این وجود شیب دار کردن صفحات مشبک به طور متوسط باعث کاهش ۷/۵ درصدی انرژی باقی مانده نسبتی نسبت به تحقیق حسن نیا (Hasanniya, 2019) می گردد.



شکل ۷. تغییرات انرژی باقی مانده نسبتی در مقابل عمق بحرانی نسبی (الف) تخلخل ۴۰ درصد (ب) تخلخل ۵۰ درصد

شاخص های آماری NRMSE خطای جذر میانگین مربعات نرمال - سازی شده و R^2 ضریب همبستگی جهت ارزیابی معادله ارائه شده به شرح جدول (۳) استفاده گردید. جدول (۴) نشان دهنده معادلات ارائه شده جهت تخمین پارامترهای هیدرولیکی شیب شکن قائم مجهز به صفحات مشبک افقی شیب دار و تأثیر پارامترهای مستقل بر روی این پارامترها است.

معادلات تجربی

در تحقیق حاضر ۸۰ درصد از داده های آزمایشگاهی به طور تصادفی انتخاب شده و به عنوان ورودی برای به دست آوردن معادلات جهت تخمین پارامترهای هیدرولیکی شیب شکن های قائم مجهز به صفحات مشبک افقی شیب دار استفاده شدند. ۲۰ درصد باقی مانده از داده ها نیز برای صحت سنجی معادلات ارائه شده، استفاده گردید. لازم به ذکر است معادلات با استفاده از دستور Solver و در نرم افزار Excel ارائه شده اند. همچنین از

جدول ۳. روابط معیارهای ارزیابی

معادلات	معیارهای ارزیابی
$NRMSE = \frac{\sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (X_{exp} - X_{cal})^2}}{M}$	خطای جذر میانگین مربعات نرمال - سازی شده
$R^2 = \left(\frac{n \sum X_{exp} X_{cal} - (\sum X_{exp})(\sum X_{cal})}{\sqrt{n(\sum X_{exp}^2) - (\sum X_{exp})^2} \sqrt{n(\sum X_{cal}^2) - (\sum X_{cal})^2}} \right)^2$	ضریب تعیین

که در آن: n تعداد داده های آزمایشگاهی، M متوسط داده های آزمایشگاهی، X_{exp} مقادیر آزمایشگاهی X و X_{cal} مقادیر محاسبه شده X است.

جدول ۴. معادلات پارامترهای هیدرولیکی شیب شکن قائم مجهز به صفحات مشبک افقی شیب دار

معادلات پارامترهای هیدرولیکی	معیارهای ارزیابی		تأثیر پارامترهای مستقل			
	R^2	NRMSE (%)	Fr_u	$\frac{y_c}{h}$	p	θ
$\frac{L_{wet}}{y_c} = 11.567 Fr_u P^{-0.4426} q^{0.093} - 3.78$	۰/۹۸۲	۲/۲	مستقیم	-	غیر مستقیم	مستقیم
$\frac{L_{mix}}{h} = 7.366 \left(\frac{y_c}{h}\right) P^{-0.583} q^{0.098} - 0.1145$	۰/۹۹۴	۲/۷۶	-	مستقیم	غیر مستقیم	مستقیم
$\frac{y_p}{h} = 3.223 \left(\frac{y_c}{h}\right)^{1.227} P^{-0.102} q^{0.133}$	۰/۹۹۵	۳/۱	-	مستقیم	غیر مستقیم	مستقیم
$\frac{y_d}{h} = 1.157 \left(\frac{y_c}{h}\right)^{0.8883} P^{0.254} q^{0.029} + 0.006$	۰/۹۹۲	۲/۷	-	مستقیم	بی تأثیر	مستقیم
$\frac{E_d}{E_u} = 0.79 \left(\frac{y_c}{h}\right)^{0.63} P^{0.397} q^{0.0053} - 0.422$	۰/۹۹۹	۰/۶	-	مستقیم	مستقیم	بی تأثیر

و انرژی باقی مانده نسبی ندارد و فقط پارامتر مهم وجود خود صفحات مشبک شیب دار است.

۵- نتایج مربوط به صفحات مشبک با تخلخل های متفاوت نشان داد که صفحه مشبک با تخلخل ۴۰٪ طول نسبی خیس شده، طول نسبی تلاطم و عمق نسبی استخر بیشتری نسبت به تخلخل ۵۰٪ دارد. همچنین مشخص گردید که تخلخل صفحات مشبک بر روی عمق پایین دست و انرژی باقی مانده نسبی تأثیر چندانی ندارد.

۶- به طور کلی مشخص گردید که استفاده از صفحات مشبک شیب دار در پایین دست شیب شکن های قائم باعث زیر بحرانی شدن جریان پایین دست می گردد. همچنین با توجه به تأثیرگذار بودن شیب مثبت صفحات مشبک افقی بر روی پارامترهای هیدرولیکی شیب شکن قائم، انتظار می رود بررسی تأثیر شیب معکوس صفحات مشبک افقی و شیب در بالادست شیب شکن قائم مجهز به صفحه مشبک افقی در آینده، به جامع تر شدن اطلاعات در زمینه شیب شکن قائم مجهز به صفحات مشبک افقی منجر گردد.

نمادها

B	عرض کانال (متر)
E_u	هد کل در مقطع بالادست شیب شکن (متر)
E_d	هد کل بعد از محل برخورد آخرین جت به استخر (متر)
f	تابع (بی بعد)
Fr_u	عدد فرود بالادست (بی بعد)
g	شتاب گرانشی زمین (متر بر مجذور ثانیه)
h	ارتفاع شیب شکن (متر)
L_{mix}	طول تلاطم جریان پایین دست (متر)
L_{wet}	طول خیس شده (متر)
p	تخلخل صفحات مشبک (بی بعد)
Re_u	عدد رینولدز بالادست (بی بعد)
s	شیب صفحات مشبک (بی بعد)
t	ضخامت صفحه مشبک (متر)
v_u	سرعت بالادست شیب شکن (متر بر ثانیه)
y_u	عمق بالادست شیب شکن (متر)
y_d	عمق پایین دست شیب شکن (متر)
y_c	عمق بحرانی (متر)
y_p	عمق استخر زیر جت (متر)
ρ	جرم مخصوص آب (کیلوگرم بر مترمکعب)
μ	لزوجة دینامیکی (نیوتن بر مترمربع در ثانیه)
θ	شیب صفحات مشبک (درجه)

همان طور که از نتایج معیارهای ارزیابی مشخص است معادلات ارائه شده می تواند تخمین دقیقی از پارامترهای هیدرولیکی شیب شکن قائم مجهز به صفحات مشبک افقی شیب دار را ارائه دهد. مطابق جدول (۴) ملاحظه می گردد با افزایش شیب صفحات مشبک پارامترهای طول نسبی خیس شده، طول نسبی تلاطم، عمق نسبی استخر و عمق نسبی پایین دست افزایش و تأثیری بر روی انرژی باقی مانده نسبی ندارد. همچنین مشخص گردید که افزایش تخلخل صفحات مشبک پارامترهای طول نسبی خیس شده، طول نسبی تلاطم و عمق نسبی استخر را کاهش و انرژی باقی مانده نسبی را نیز افزایش می دهد. بررسی تأثیر عمق بحرانی نسبی نیز نشان داد که با افزایش عمق بحرانی نسبی پارامترهای طول نسبی خیس شده، طول نسبی تلاطم، عمق نسبی استخر، پارامترهای عمق نسبی پایین دست و انرژی باقی مانده نسبی افزایش می یابند. همچنین افزایش پارامتر عدد فرود بالادست نیز باعث افزایش طول نسبی خیس شده صفحات مشبک شیب دار می گردد (در تمامی روابط ارائه شده در جدول (۴)، θ بر حسب رادیان در نظر گرفته شده است).

نتیجه گیری

در تحقیق حاضر به بررسی آزمایشگاهی تأثیر استفاده از صفحات مشبک شیب دار بر روی مشخصات هیدرولیکی شیب شکن های قائم پرداخته شده است. آزمایش ها برای یک شیب شکن قائم ساده و شیب شکن قائم مجهز به صفحات مشبک شیب دار با سه شیب مختلف و دو نسبت تخلخل تنظیم و نتایج زیر بدست آمد:

۱- نتایج نشان داد که روند تغییرات رفتار عمق نسبی استخر، عمق نسبی پایین دست و انرژی باقی مانده نسبی شیب شکن قائم مجهز به صفحات مشبک شیب دار مشابه رفتار شیب شکن قائم ساده است.

۲- با افزایش عمق بحرانی نسبی پارامترهای طول نسبی تلاطم، عمق نسبی استخر، عمق نسبی پایین دست و انرژی باقی مانده نسبی افزایش می یابند.

۳- استفاده از صفحات مشبک افقی شیب دار باعث افزایش پارامترهای عمق نسبی پایین دست و عمق نسبی استخر و کاهش انرژی باقی مانده نسبی نسبت به شیب شکن قائم ساده گردید.

۴- افزایش شیب صفحات مشبک باعث افزایش پارامترهای طول نسبی خیس شده صفحات مشبک، طول نسبی تلاطم و عمق نسبی استخر می گردد. این در حالی است که شیب صفحات مشبک تأثیر چندانی بر روی پارامترهای عمق نسبی پایین دست

REFERENCES

- Aslankara, V. (2007). Experimental investigation of tailwater effect on the energy dissipation through screens (*Doctoral dissertation, MS thesis, Middle East Technical Univ. Ankara, Turkey*).
- Balkış, G. (2004). Experimental Investigation of Energy Dissipation through Inclined Screens (*Doctoral dissertation, Middle East Technical University, Ankara, Turkey*).
- Çakir, P. (2003). Experimental investigation of energy dissipation through screens (Doctoral dissertation, M. Sc. thesis, Department of Civil Engineering, Middle East Technical University, Ankara, Turkey).
- Daneshfaraz, R., Sadeghfam, S., & Ghahramanzadeh, A. (2017a). Three-dimensional numerical investigation of flow through screens as energy dissipators. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 44(10), 850-859.
- Daneshfaraz, R., Sadeghfam, S. and Rezazadeh, J.A., (2017b). Laboratory Investigation on the Effect of Screen's Location on the Flow Energy Dissipation. *Irrigation and Drainage Structures Engineering Research*, 17(67), 47-62 (in Farsi).
- Daneshfaraz, R., Sadeghfam, S., Hasanniya, V. (2019a). Experimental Investigation of Energy Dissipation in Vertical Drops Equipped with a Horizontal Screen under Supercritical Flow, *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 50(6), pp. 1421-1436. doi:10.22059/ijswr.2019.269301.668053.
- Daneshfaraz, R., Sadeghfam, S. and Tahni, A. (2019b). Experimental investigation of screen as energy dissipators in the movable-bed channel". *Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Civil Engineering*, doi.org/10.1007/s40996-019-00306-7.
- Daneshfaraz, R., Chabokpour, J. and Nezafat, H. (2019c). Experimental investigation of the scouring due to hydraulic jump in screens. *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 50(5), 1039-1051 (in Farsi).
- Daneshfaraz, R., Majedi Asl, M. and Mirzaee, R., (2019d). Experimental study of expanding effect and sand-roughened bed on hydraulic jump characteristics. *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 50(4), 885-896 (in Farsi).
- Daneshfaraz, R., Sadeghfam, S. and Minaei, O. (2020a). Experimental Study of Energy Dissipation in the Stilling Basin with Movable Bed in the Upstream of Screens. *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 50(9), 2113-2123, (In Persian).
- Daneshfaraz, R., Majedi Asl, M., Razmi, S., Norouzi, R. and Abraham, J. (2020b). Experimental investigation of the effect of dual horizontal screens on the hydraulic performance of a vertical drop. *International Journal of Environmental Science and Technology*, doi.org/10.1007/s13762-019-02622-x, 1-10.
- Esen, I. I., Alhumoud, J. M., & Hannan, K. A. (2004). Energy Loss at a Drop Structure with a Step at the Base. *Water international*, 29(4), 523-529.
- Hasanniya, V. (2019). Experimental investigation of flow energy dissipation through the screens application in drops. *Master's thesis, Civil Engineering Department, Faculty of Engineering, University of Maragheh, Maragheh, Iran, (In Persian)*.
- Hasannia, V., Daneshfaraz, R., Sadeghfam, S. (2019). Experimental investigating on hydraulic parameters of vertical drop equipped with combined screens. *Amirkabir Journal of Civil Engineering*, doi: 10.22060/ceej.2019.16431.6223
- Hong, Y. M., Huang, H. S., & Wan, S. (2010). Drop characteristics of free-falling nappe for aerated straight-drop spillway. *Journal of Hydraulic Research*, 48(1), 125-129.
- Kabiri-Samani, A. R., Bakhshian, E., & Chamani, M. R. (2017). Flow characteristics of grid drop-type dissipators. *Flow Measurement and Instrumentation*, 54, 298-306.
- Liu, S. I., Chen, J. Y., Hong, Y. M., Huang, H. S., & Raikar, R. V. (2014). Impact Characteristics of Free Over-Fall in Pool Zone with Upstream Bed Slope. *Journal of Marine Science and Technology*, 22(4), 476-486.
- Nayebzadeh, B., Lotfollahi-yaghin, M.A. and Daneshfaraz, R. (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*. https://doi.org/10.22060/CEEJ.2019.16493.6265.
- Norouzi Sarkarabad, R., Daneshfaraz, R. and Baziyar, A. (2019). The Study of Energy Depreciation due to the use of Vertical Screen in the Downstream of Inclined Drops by Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System (ANFIS). *Amirkabir Journal of Civil Engineering*. https://doi.org/10.22060/CEEJ.2019.16694.6305.
- Rajaratnam, N., & Chamani, M. R. (1995). Energy loss at drops. *Journal of Hydraulic Research*, 33(3), 373-384.
- Rajaratnam, N., & Hurtig, K. I. (2000). Screen-type energy dissipator for hydraulic structures. *Journal of Hydraulic Engineering*, 126(4), 310-312.
- Sadeghfam, S., Akhtari, A. A., Daneshfaraz, R., & Tayfur, G. (2015). Experimental investigation of screens as energy dissipaters in submerged hydraulic jump. *Turkish Journal of Engineering and Environmental Sciences*, 38(2), 126-138.
- Sadeghfam, S., Daneshfaraz, R., Khatibi, R. and Minaei, O., 2019. Experimental studies on scour of supercritical flow jets in upstream of screens and modelling scouring dimensions using artificial intelligence to combine multiple models (AIMM). *Journal of Hydroinformatics*, 21(5), 893-907.
- Sharif, M., & Kabiri-Samani, A. (2018). Flow regimes at grid drop-type dissipators caused by changes in tail-water depth. *Journal of Hydraulic Research*, 1-12