

Comparison of Energy Dissipation by Double Horizontal Screen and Stilling Basins at Vertical Drop Downstream

RASOUL DANESHFARAZ^{1*}, MAHDI MAJEDI ASL¹, SHABAN RAZMI¹

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

(Received: Dec. 26, 2019- Revised: May. 9, 2020)

ABSTRACT

The aim of this study was to evaluate and compare the double horizontal screens with four types of stilling basin (I, II, III and IV) at vertical drop downstream in terms of energy dissipation. A total of 140 different experiments were performed on a vertical drop equipped with double horizontal screens (with 40 and 50% porosity) at relative spaces of 0.25, 0.33 and 0.5 between the screens, and two drop height of 20 and 25 cm. The results showed that the relative spacing and porosity of the double horizontal screen do not have a significant effect on the residual energy and the relative depth of downstream, however, the length of drop stilling basin is decreased with increasing the relative spacing and porosity of screen. In compared to the stilling basins, the use of double horizontal screens reduced the length of drop stilling basin and the residual energy and relative depth of downstream is reduced by more than 35 and 49%, respectively.

Key words: Residual Energy, Double Horizontal Screens, Stilling Basin, Vertical Drop, Drop Length.

مقایسه استهلاک انرژی در صفحات مشبک افقی دوگانه و حوضچه‌های آرامش در پایین‌دست شیب‌شکن قائم

رسول دانشفراز^{۱*}، مهدی ماجدی اصل^۱، شعبان رزمی^۱

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

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۱۰/۵ - تاریخ بازنگری: ۱۳۹۹/۲/۲۰ - تاریخ تصویب: ۱۳۹۹/۲/۲۷)

چکیده

هدف از تحقیق حاضر بررسی استهلاک انرژی صفحات مشبک دوگانه افقی نصب شده بر لبه شیب‌شکن قائم بوده و نتایج آن با نتایج حوضچه‌های آرامش استاندارد نوع یک، دو، سه و چهار مورد مقایسه قرار گرفت. تعداد ۱۴۰ آزمایش مختلف بر روی صفحات مشبک دوگانه افقی نصب شده بر لبه شیب‌شکن قائم در فواصل نسبی بین صفحات ۰/۲۵، ۰/۳۳ و ۰/۵، تخلخل ۴۰ و ۵۰ درصدی صفحات و دو ارتفاع شیب‌شکن ۲۰ و ۲۵ سانتی‌متری انجام شد. نتایج نشان داد که فاصله نسبی و تخلخل صفحات مشبک افقی دوگانه تاثیر چندانی بر انرژی باقی‌مانده نسبی نرمال جریان و عمق نسبی پایین‌دست نداشته ولی با این حال با افزایش فاصله نسبی و درصد تخلخل صفحات، طول حوضچه آرامش شیب‌شکن کاهش می‌یابد. در مقایسه با حوضچه‌های آرامش نیز، به‌کارگیری صفحات مشبک افقی دوگانه سبب کاهش طول حوضچه آرامش شیب‌شکن شده و انرژی نسبی باقی‌مانده و عمق نسبی پایین‌دست به‌ترتیب بیش از ۳۵ و ۴۹ درصد کاهش یافت.

واژه‌های کلیدی: انرژی نسبی باقی‌مانده، صفحات مشبک افقی دوگانه، حوضچه آرامش، شیب‌شکن قائم، طول شیب‌شکن.

مقدمه

در پایین‌دست سازه‌هایی چون سرریزها، تنداب‌ها، دریچه‌ها و شیب‌شکن‌ها به دلیل بالا بودن سرعت جریان، استفاده از سازه‌هایی با مکانیزم ایجاد آشفستگی و تلاطم جهت مستهلک نمودن انرژی جنبشی مخرب جریان و کاهش سرعت، امری اجتناب‌ناپذیر می‌باشد. به موجب استفاده از مستهلک‌کننده‌های انرژی، کف و دیواره‌های کانال پایین‌دست و سازه‌های وابسته به آن در مقابل فرسایش ناشی از سرعت و انرژی بالای جریان محافظت می‌شود. در شبکه‌های آبیاری، معمولا از شیب‌شکن‌های قائم تا اختلاف ارتفاع ۱ تا ۱/۵ متر، جهت کاهش شیب تند زمین و حجم عملیات خاکی استفاده می‌کنند. معمولا در پایین‌دست این سازه‌ها برای مستهلک کردن انرژی جریان از حوضچه‌های آرامش استفاده می‌شود. طراحی بهینه و اقتصادی ابعاد حوضچه‌های آرامش اعم از رقوم بستر، ارتفاع دیواره‌ها و طول آن مستلزم شناخت خصوصیات پرش هیدرولیکی است.

تحقیقات انجام شده بر روی شیب‌شکن‌های قائم با جریان زیربحرانی در بالادست را در دو گروه می‌توان تقسیم بندی نمود. گروه اول شامل مطالعاتی است که پارامترهای هیدرولیکی خود سازه مثل استهلاک انرژی و عمق نسبی پایین‌دست را مورد بررسی و ارزیابی قرار داده‌اند (Rand, 1955; Gill, 1979; Rajaratnam and Chamani, 1995; Nayebzadeh et al.,

2019). گروه دوم مختص مطالعاتی است که با ارائه راهکارهایی همچون در نظر گرفتن شیب مثبت و منفی در بستر بالادست و پایین‌دست سازه، بیش‌تر به بررسی استهلاک انرژی جریان در پایین‌دست پرداخته‌اند.

اسن و همکاران (Esen et al., 2004) با قرار دادن یک پله به شکل مربعی با محدوده ارتفاع نسبی پله به ارتفاع شیب‌شکن ۰/۱۱ تا ۰/۶۱ در پایین‌دست شیب‌شکن قائم و چسبیده به آن استهلاک انرژی جریان به‌صورت آزمایشگاهی را مورد بررسی قرار دادند. نتایج مطالعات آن‌ها نشان داد که با افزایش ارتفاع نسبی پله، عمق نسبی پایین‌دست و استهلاک انرژی افزایش می‌یابد. هانگ و همکاران (Hong et al., 2010) نیز با در نظر گرفتن شیب مثبت برای بستر پایین‌دست شیب‌شکن به بررسی طول شیب‌شکن و نیروی برخورد جت ریزشی به کف کانال پرداختند و روابطی برای تخمین این دو پارامتر ارائه نمودند. همچنین دانشفراز و همکاران (Daneshfaraz et al., 2020a, b) به بررسی آزمایشگاهی استهلاک انرژی شیب‌شکن قائم مجهز به صفحات مشبک افقی دوپل پرداختند. نتایج ایشان نشان داد که به‌کارگیری صفحات مشبک افقی دوپل در لبه شیب‌شکن استهلاک انرژی و عمق نسبی پایین‌دست را افزایش می‌دهد. شریف و کبیری سامانی (Sharif and Kabiri-Samani., 2018) نیز با بررسی تاثیر عمق پایاب بر شیب‌شکن قائم مجهز به مستهلک‌کننده افقی شبکه‌ای

(Hurtig, 2000). پس از آن محققین زیادی تاثیر پارامترهای، ضخامت، تخلخل و شکل روزنه، فاصله قرارگیری از دریچه، آرایش چندتایی صفحات و غیره بر استهلاک انرژی جریان را مورد مطالعه قرار دادند که خلاصه آن‌ها در جدول (۱) ارائه شده است.

و شیاری نشان دادند که با افزایش عمق پایاب، تاثیر ضربه حاصل از سقوط جت‌های ورقه‌ای بر کف کانال و طول شیب‌شکن کاهش می‌یابد.

به‌کارگیری صفحه‌های مشبک قائم برای اولین بار در سال ۲۰۰۰ به‌عنوان سازه مستهلک‌کننده انرژی در پایین‌دست سازه‌های هیدرولیکی کوچک مطرح گردید (Rajaratnam and

جدول ۱- تاثیر پارامترهای بررسی شده صفحه مشبک قائم بر استهلاک انرژی جریان.

محققین	پارامترهای بررسی شده	تاثیر پارامتر بر استهلاک انرژی جریان
(Çakir, 2003)	ضخامت صفحات مشبک	عدم تاثیر
(Balkış, 2004)	زاویه قرارگیری صفحات مشبک	عدم تاثیر
(Aslankara, 2007)	آرایش چندتایی صفحات مشبک	موثر
(Bozkus et al., 2007)	درصد تخلخل صفحات مشبک	موثر- تخلخل بهینه ۴۰ درصد
(Mahmoud et al., 2013)	شکل روزنه صفحات مشبک	موثر- شکل بهینه مربعی
(Sadeghfam et al., 2015)	صفحات مشبک دوگانه	موثر
(Daneshfaraz et al., 2017a)	بلوک به همراه صفحه مشبک	موثر
(Daneshfaraz et al., 2017b)	فاصله صفحه مشبک از دریچه	موثر- فاصله بهینه ۱/۲۵ متر
(Daneshfaraz et al., 2019a,c)	درصد تخلخل، آرایش چندتایی، رسوب گیر	موثر، موثر، موثر
(Sadeghfam et al., 2019)	درصد تخلخل، دانه های بستر	موثر، موثر
(Daneshfaraz et al., 2020c)	عدد فرود، درصد تخلخل، دانه های بستر	موثر، موثر، موثر

آرامش در پایین‌دست آن می‌باشد.

مبانی نظری و تحلیل ابعادی

در مطالعه حاضر، نتایج به‌دست آمده از صفحات مشبک دوگانه افقی نصب شده بر لبه شیب‌شکن قائم با نتایج مربوطه به به-کارگیری حوضچه‌های آرامش نوع یک، دو، سه و چهار مورد مقایسه قرار گرفت. لذا طول کل شیب‌شکن قائم مجهز به حوضچه‌های آرامش باید محاسبه گردد. در رابطه (۱)، طول حوضچه‌های آرامش استاندارد یک، دو، سه و چهار (L_{sb}) مطابق مطالعات (Peterka, 1978) ارائه شده است. با توجه به شکل (۱-الف)، طول کل شیب‌شکن قائم ساده (L_D) عبارت‌است از مجموع طول ریزش (L_d) و طول حوضچه آرامش (L_{sb}) بنابراین، طول حوضچه آرامش شیب‌شکن قائم ساده به‌صورت زیر قابل بیان می‌باشد.

$$\frac{L_D}{h} = \frac{L_d + L_{sb}}{h} \quad (\text{رابطه ۱})$$

برای صفحات مشبک دوگانه افقی نصب شده بر لبه شیب‌شکن قائم، از آنجایی که جت در حال سقوط تبدیل به جریان ریزشی ورقه‌ای شده و به دنبال آن تداخل آب و هوا ایجاد می‌شود، لذا مطابق شکل (۱-ب) طول تلاطم همان طول کل شیب‌شکن در نظر گرفته می‌شود ($L_D = L_{mix}$).

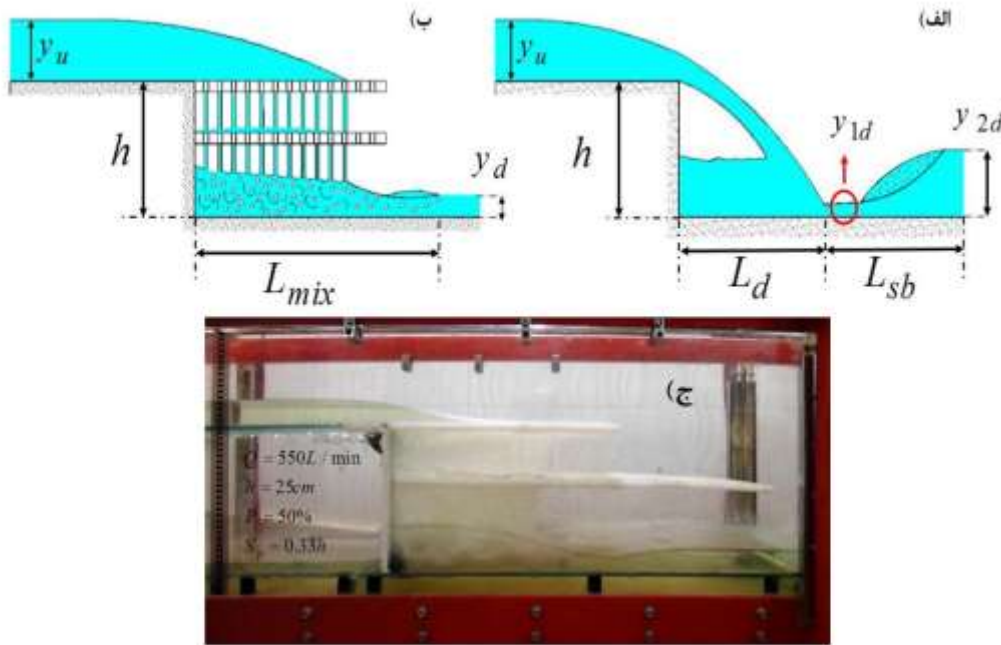
برای محاسبه عمق پایین‌دست شیب‌شکن مجهز به

صفحات مشبک افقی با ایجاد جت‌های ورقه‌ای متعدد، تلاطم و تداخل آب و هوا را افزایش داده و به موجب آن افزایش استهلاک انرژی را به دنبال دارد. (Hasanniya, 2019) با در نظر گرفتن صفحه مشبک افقی در لبه شیب‌شکن قائم با جریان زیر بحرانی در بالادست نشان داد که استهلاک انرژی جریان در مقایسه با شیب‌شکن قائم بدون صفحات مشبک افقی نزدیک به ۲ برابر افزایش می‌یابد. همچنین (Daneshfaraz and et al., 2019b) با استفاده از صفحه مشبک افقی در لبه شیب‌شکن قائم با جریان فوق‌بحرانی در بالادست نیز نشان دادند که با افزایش عدد فرود بالادست و کاهش عمق بحرانی نسبی استهلاک انرژی نسبی افزایش می‌یابد. (Daneshfaraz et al., 2020d) با در نظر گرفتن شیب مثبت برای صفحات مشبک افقی در لبه شیب‌شکن قائم با جریان زیربحرانی در بالادست نشان دادند که در نظر گرفتن شیب مثبت برای صفحات مشبک افقی در مقایسه با حالت بدون شیب، تاثیری بر استهلاک انرژی جریان ندارد.

با توجه به سوابق مطالعاتی در زمینه به‌کارگیری صفحات مشبک افقی در لبه شیب‌شکن قائم مشاهده شد که تحقیقی تا کنون در زمینه شیب شکن های افقی دوگانه انجام نگرفته است. لذا هدف از مطالعه حاضر بررسی استهلاک انرژی شیب‌شکن‌های قائم با در نظر گرفتن صفحات مشبک افقی دوگانه در لبه، با سه فاصله متفاوت و مقایسه نتایج حاصل با به‌کارگیری حوضچه

می‌شود (Peterka, 1978). همچنین طول و عمق ثانویه پرش در حوضچه آرامش پایین‌دست شیب‌شکن برای حالتی در نظر گرفته شده است که جت سقوطی شیب‌شکن قائم مستغرق نگردد (شکل ۱-الف).

حوضچه‌های آرامش (y_{2d}) از رابطه پرش کلاسیک در کانال مستطیلی (رابطه بلانگر) استفاده شد. برای محاسبه عمق پایین‌دست شیب‌شکن مجهز به حوضچه‌های آرامش نوع یک و سه از رابطه بلانگر استفاده شده و عمق پایین‌دست حوضچه نوع دو و چهار نیز به ترتیب $1/5$ و $1/1$ برابر این رابطه در نظر گرفته



شکل ۱- شیب‌شکن قائم مجهز به مستهلک کننده‌های انرژی: (الف) مجهز به حوضچه آرامش، (ب) مجهز به صفحات مشبک افقی دوگانه و (ج) نمای کناری از جریان بر روی مدل

دیواره و کف از جنس پلکسی گلس شفاف واقع در آزمایشگاه هیدرولیک دانشگاه مراغه انجام شد. طول، عرض و ارتفاع فلوم به ترتیب برابر ۵، ۰/۳ و ۰/۴۵ متر می‌باشد. برای ساخت مدل آزمایشگاهی سازه شیب‌شکن قائم با دو ارتفاع ۲۰ و ۲۵ سانتی-متری، از شیشه‌های ۸ میلی‌متری به طول ۱/۲ متر، هم‌عرض کانال استفاده شد (Daneshfaraz et al., 2019a). صفحات مشبک از جنس پلی اتیلن به ضخامت یک سانتی‌متر، هم‌عرض کانال، با روزنه‌های دایره‌ای به صورت زیگزاگی به قطر یک سانتی-متر در دو تخلخل ۴۰ و ۵۰ درصدی تهیه شدند. به منظور ساخت مدل شیب‌شکن قائم با صفحات مشبک افقی دوگانه، یکی از صفحات را به موازات بستر کانال پایین‌دست در فواصل $0.5h$ ، $0.33h$ و $0.25h$ از لبه شیب‌شکن بر روی دیواره آن نصب کرده و سپس صفحه مشبک دومی در لبه شیب‌شکن به موازات اولی قرار داده شد. اندازه‌گیری دبی جریان نیز با استفاده از رواترهای نصب شده بر روی فلوم با خطای نسبی $\pm 2\%$ انجام شد. شکل (۲) طرح کلی از مدل آزمایشگاهی تحقیق حاضر را نشان می‌دهد. پس از نصب مدل آزمایشگاهی، با در نظر گرفتن جریان زیر بحرانی در بالادست شیب‌شکن، در هر سری از آزمایش‌ها با پایداری شرایط جریان بر روی صفحات مشبک دوگانه افقی نصب

با در نظر گرفتن هندسه مدل، خصوصیات سیال و شرایط جریان بر روی صفحات مشبک دوگانه افقی نصب شده بر لبه شیب‌شکن قائم، عمق پایین‌دست (y_d) به صورت رابطه (۱) قابل بیان می‌باشند.

$$y_d = f_1(\rho, \mu, g, B, h, p, S, y_c) \quad (\text{رابطه ۱})$$

در رابطه فوق، ρ جرم مخصوص آب، μ لزوجت دینامیکی، g شتاب گرانش، B عرض کانال، h ارتفاع شیب‌شکن، p درصد تخلخل صفحات مشبک، S فاصله قائم صفحات مشبک از هم و y_c عمق بحرانی می‌باشد. با به کارگیری روش پی-باکینگهام، عمق نسبی پایین‌دست (y_d/h) به صورت تابعی از پارامترهای بی بعد زیر به دست می‌آید:

$$\frac{y_d}{h} = f_3\left(\frac{y_c}{h}, p, \alpha\right) \quad (\text{رابطه ۲})$$

در رابطه فوق فاصله نسبی بین صفحات برابر 0.25 ، 0.33 و 0.50 می‌باشد و محدوده عمق بحرانی نسبی نیز بین 0.077 تا 0.242 به دست آمد.

مواد و روش‌ها

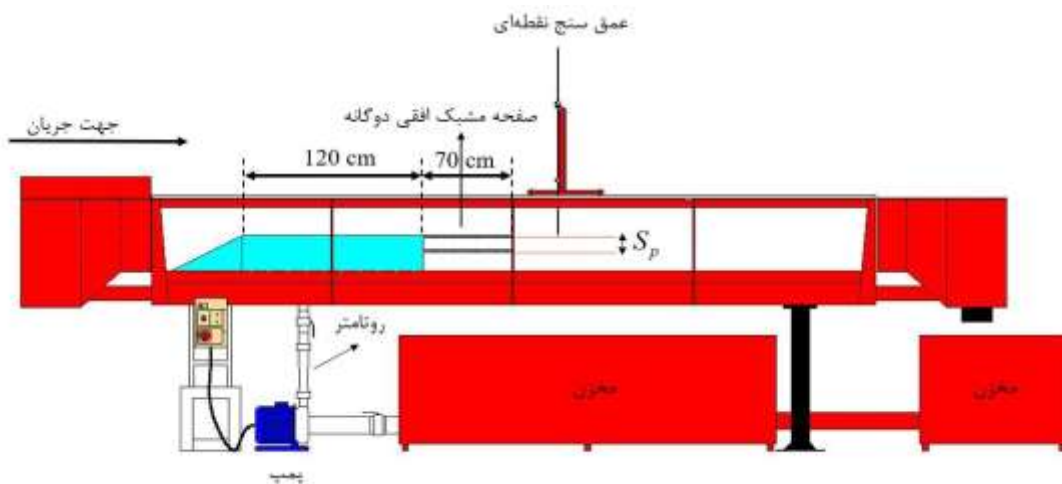
امکانات آزمایشگاهی

آزمایش‌ها در یک فلوم آزمایشگاهی با مقطع مستطیلی افقی و

از شدت حباب‌های هوا کاسته شده و سطح آب به صورت افقی باشد. در مجموع ۱۴۰ آزمایش متفاوت بر روی مدل‌های فیزیکی ساخته شده در آزمایشگاه با محدوده دبی ۲/۵ تا ۱۰ لیتر در ثانیه انجام گردید. محدوده متغیرهای اندازه‌گیری شده برای شیب‌شکن قائم مجهز به صفحات مشبک افقی دوگانه در جدول (۲) ارائه شده است.

جدول ۲- محدوده متغیرهای اندازه‌گیری شده

$Q(L/s)$	$y_u(cm)$	$y_d(cm)$	$L_{mix}(cm)$
۱۰-۲/۵	۵/۷-۲/۴۵	۵/۵۷-۲/۱۷	۴۳/۷۵-۱۷/۶

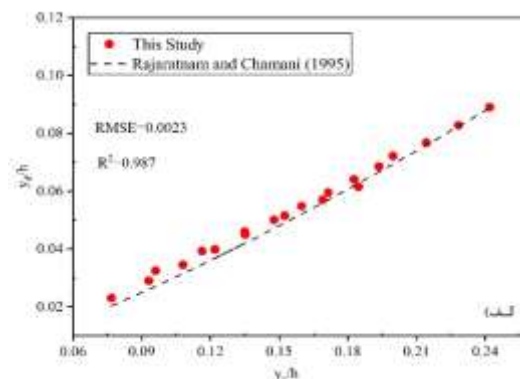
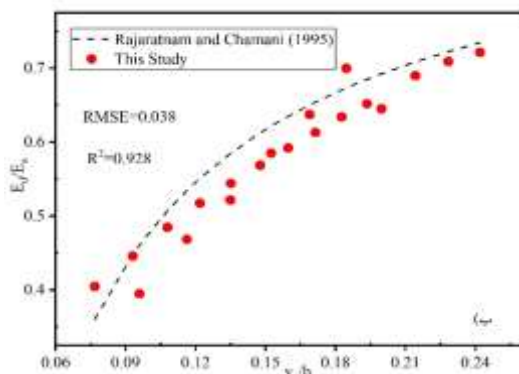


شکل ۲- طرح کلی مدل آزمایشگاهی تحقیق حاضر

نتایج گزارش شده توسط راجاراتنام و چمنی (Rajaratnam and Chamani, 1995) مورد مقایسه قرار گرفت. شکل (۳) مقایسه نتایج شیب‌شکن قائم ساده تحقیق حاضر با مطالعات راجاراتنام و چمنی را نشان می‌دهد.

نتایج و بحث

برای اطمینان از نتایج آزمایشات تحقیق حاضر، ابتدا تعداد ۲۰ آزمایش در دو ارتفاع بر روی شیب‌شکن قائم ساده انجام شد و مقادیر انرژی نسبی باقی‌مانده و عمق نسبی پایین‌دست حاصل با



شکل ۳- مقایسه نتایج شیب‌شکن قائم ساده: (الف) عمق نسبی پایین‌دست و (ب) انرژی نسبی باقی‌مانده

در تمامی آزمایش‌های مربوط به صفحات مشبک دوگانه افقی نصب شده بر لبه شیب‌شکن قائم، با قرار گرفتن جت ریزشی شیب‌شکن بر روی صفحات مشبک افقی، جریان از روزنه‌های این صفحه عبور نموده و به جت‌های ورقه‌ای نازک تبدیل شد. این

همان‌گونه که در شکل (۳) مشاهده می‌گردد، مقادیر عمق نسبی پایین‌دست و انرژی نسبی باقی‌مانده تحقیق حاضر در مقایسه با مطالعات راجاراتنام و چمنی (Rajaratnam and Chamani, 1995) دارای تطابق و همپوشانی مناسبی می‌باشد.

نسبت به حوضچه‌های آرامش نوع یک، چهار و دو، مقادیر کمتری را دارا بوده و در مقایسه با حوضچه آرامش نوع سه نیز دارای مقادیر نزدیک هم می‌باشد. 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، در حالی که برای حوضچه‌های آرامش تداخل آب و هوای ایجاد شده در پرش هیدرولیکی پایین‌تر از دیواره شیب‌شکن اتفاق می‌افتد (شکل ۱- الف). میزان کاهش طول کلی صفحات مشبک دوگانه افقی نصب شده بر لبه شیب‌شکن قائم نسبت به طول کل نسبی شیب‌شکن قائم مجهز به حوضچه‌های آرامش محاسبه شده و مقادیر متوسط آن در جدول (۳) ارائه شده است.

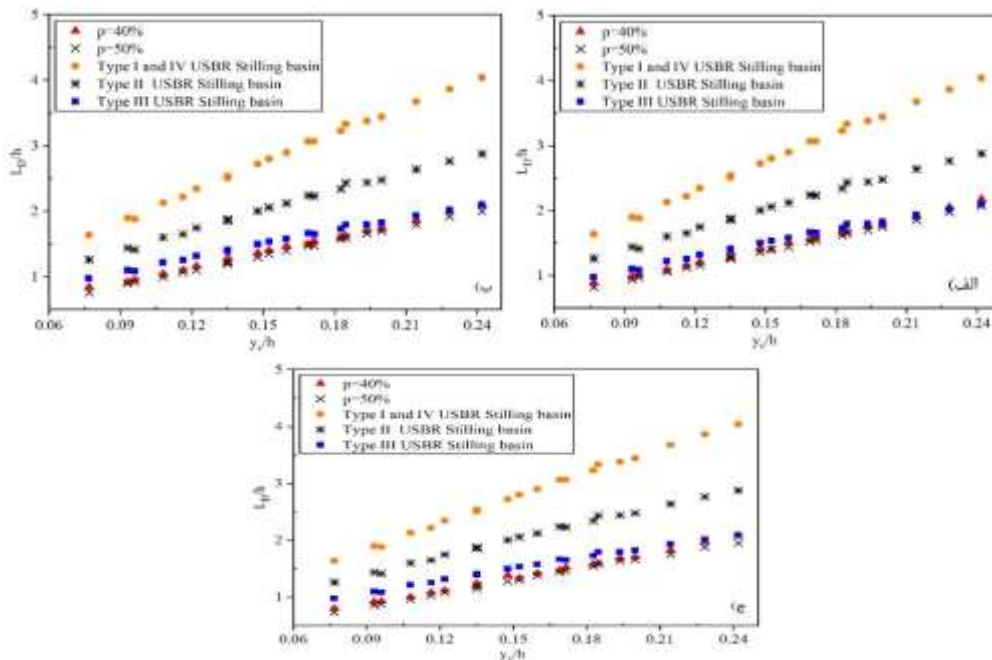
همانطور که از مقادیر جدول (۳) استنباط می‌گردد، افزایش فاصله نسبی بین صفحات در هر دو تخلخل صفحات مشبک، باعث کاهش طول نسبی شیب‌شکن می‌گردد. با افزایش فاصله بین صفحات مشبک، تداخل آب و هوا بین صفحات مشبک افزایش یافته و باعث کاهش ارتفاع جریان ریزشی به بستر کانال پایین- دست می‌شود، لذا همین امر می‌تواند دلیل کاهش طول نسبی تلاطم باشد. همچنین نتایج جدول (۳) نشان می‌دهد که فاصله نسبی بین صفحات ۰/۵ با درصد تخلخل ۵۰ دارای کمترین طول نسبی شیب‌شکن می‌باشد. متوسط کاهش طول نسبی شیب‌شکن در این مدل نسبت به حوضچه‌های آرامش نوع یک، دو، سه و چهار نیز به ترتیب برابر ۵۳، ۳۶، ۱۴/۳ و ۵۳ درصد به دست آمده است.

جت‌های ورقه‌ای پس از برخورد به صفحه مشبک پایینی و عبور از آن به کف فلوم برخورد نمودند. با برخورد این جت‌ها به کف فلوم، پرش‌های هیدرولیکی مستغرق بسیار زیادی به صورت تو در تو تشکیل شد. عمق اولیه، عمق ثانویه و طول هر کدام از این پرش‌های تشکیل شده قابل اندازه‌گیری نبوده ولی این پرش‌ها در کنار هم سبب ایجاد یک طول تلاطم و یک عمق یکنواخت زیر بحرانی شدند.

طول حوضچه شیب‌شکن

شکل (۴) مقادیر طول نسبی صفحات مشبک دوگانه افقی نصب شده بر لبه شیب‌شکن قائم و حوضچه‌های آرامش در مقابل عمق بحرانی نسبی را نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که طول نسبی شیب‌شکن قائم برای تمامی مدل‌ها با افزایش عمق بحرانی نسبی افزایش می‌یابد. مقایسه طول نسبی شیب‌شکن قائم مجهز به صفحات مشبک در دو تخلخل حاکی از آن است که با افزایش تخلخل صفحات مشبک، طول کل نسبی شیب‌شکن کاهش می‌یابد. علت این امر آن است که در یک عمق بحرانی نسبی ثابت، هرچه تخلخل صفحات مشبک بیشتر باشد، قابلیت عبور جریان از روزنه‌های موجود در یک حجم ثابت بیشتر می‌گردد، لذا جریان طول کمتری از صفحات مشبک را دربرگرفته و پس از عبور، در طول کوتاهی به صورت جت‌های ورقه‌ای به کف فلوم سقوط می‌کند.

همچنین در شکل (۴) مشاهده می‌گردد که طول نسبی صفحات مشبک دوگانه افقی نصب شده بر لبه شیب‌شکن قائم



شکل ۴- تغییرات طول نسبی شیب‌شکن در مقابل عمق بحرانی نسبی و فواصل صفحات (الف) $\alpha = 0.25$ ، (ب) $\alpha = 0.33$ و (ج) $\alpha = 0.5$

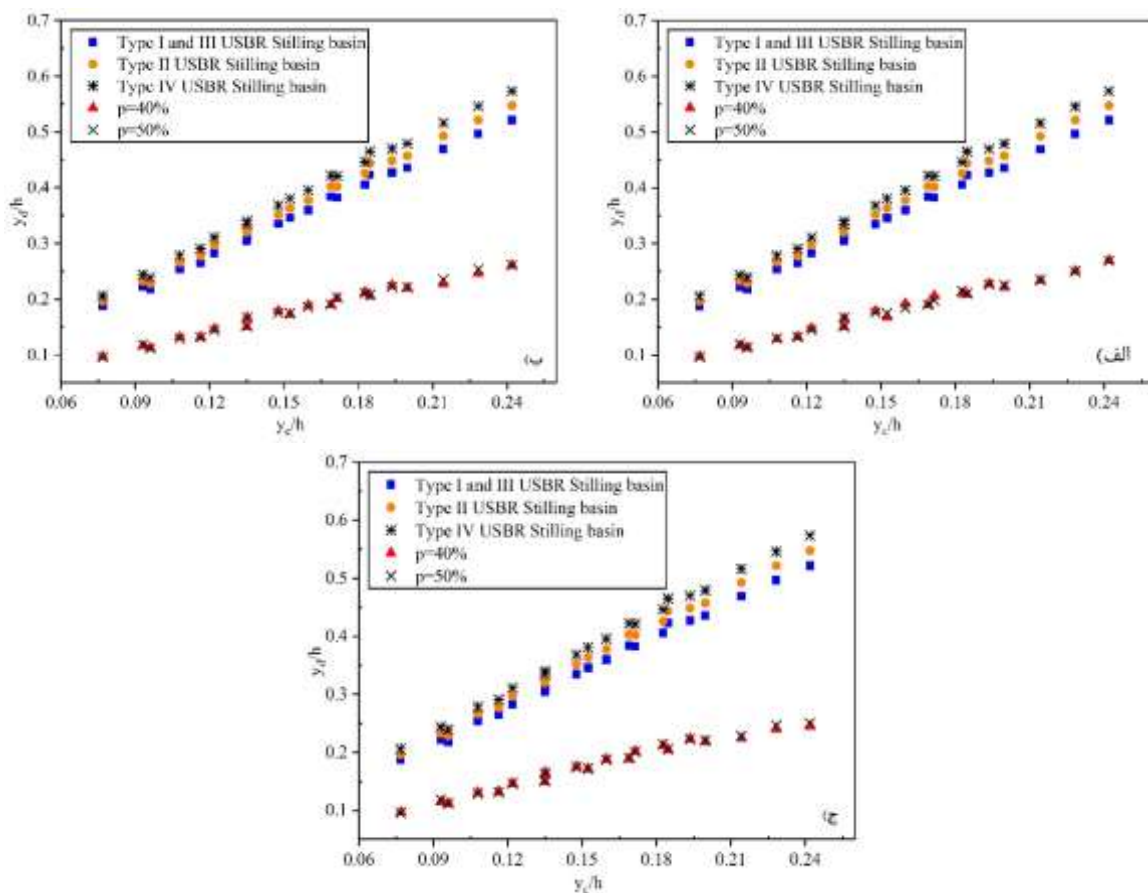
جدول ۳- متوسط کاهش طول حوضچه آرامش شیب‌شکن

کاهش طول حوضچه آرامش شیب‌شکن قائم (%)				
فاصله نسبی بین صفحات	تخلخل صفحات	نسبت به حوضچه نوع یک و چهار	نسبت به حوضچه نوع دو	نسبت به حوضچه نوع سه
۰/۲۵	۴۰ درصد	۴۸/۳	۲۹/۷	۵/۸
	۵۰ درصد	۴۹/۷	۳۱/۶	۸/۴
۰/۳۳	۴۰ درصد	۵۰	۳۲	۸/۸
	۵۰ درصد	۵۱/۷	۳۴/۲	۱۲
	۴۰ درصد	۵۱	۳۳/۳	۱۰/۶
۰/۵	۵۰ درصد	۵۳	۳۶	۱۴/۳

عمق نسبی پایین‌دست

در شکل‌های (۵-الف)، (۵-ب) و (۵-ج) مقادیر عمق نسبی پایین‌دست شیب‌شکن قائم مجهز به صفحه مشبک افقی دوگانه و انواع حوضچه‌های آرامش در مقابل عمق بحرانی نسبی نشان داده شده است. ملاحظه می‌گردد که افزایش عمق بحرانی نسبی، عمق نسبی پایین‌دست را برای تمامی مدل‌ها افزایش می‌دهد. با افزایش عمق بحرانی نسبی، تغییرات عمق نسبی پایین‌دست صفحات مشبک دوگانه افقی نصب شده بر لبه شیب‌شکن قائم

نسبت به انواع حوضچه‌های آرامش با شیب کمتری خود را نشان می‌دهد. همچنین مشاهده می‌گردد که مقادیر عمق نسبی پایین‌دست صفحات مشبک دوگانه افقی نصب شده بر لبه شیب‌شکن قائم در تمامی فواصل نسبی در شکل‌های (۵-الف)، (۵-ب) و (۵-ج)، دارای مقادیر بسیار کم‌تری نسبت به انواع حوضچه‌های آرامش است. در یک فاصله نسبی و عمق بحرانی ثابت، مقایسه تاثیر تخلخل صفحات مشبک، حاکی از آن است که درصد تخلخل صفحات تأثیری بر عمق نسبی پایین‌دست ندارد.



شکل ۵- تغییرات عمق نسبی پایین‌دست در مقابل عمق بحرانی نسبی و فواصل صفحات الف) $\alpha = 0.25$ ب) $\alpha = 0.33$ ج) $\alpha = 0.5$

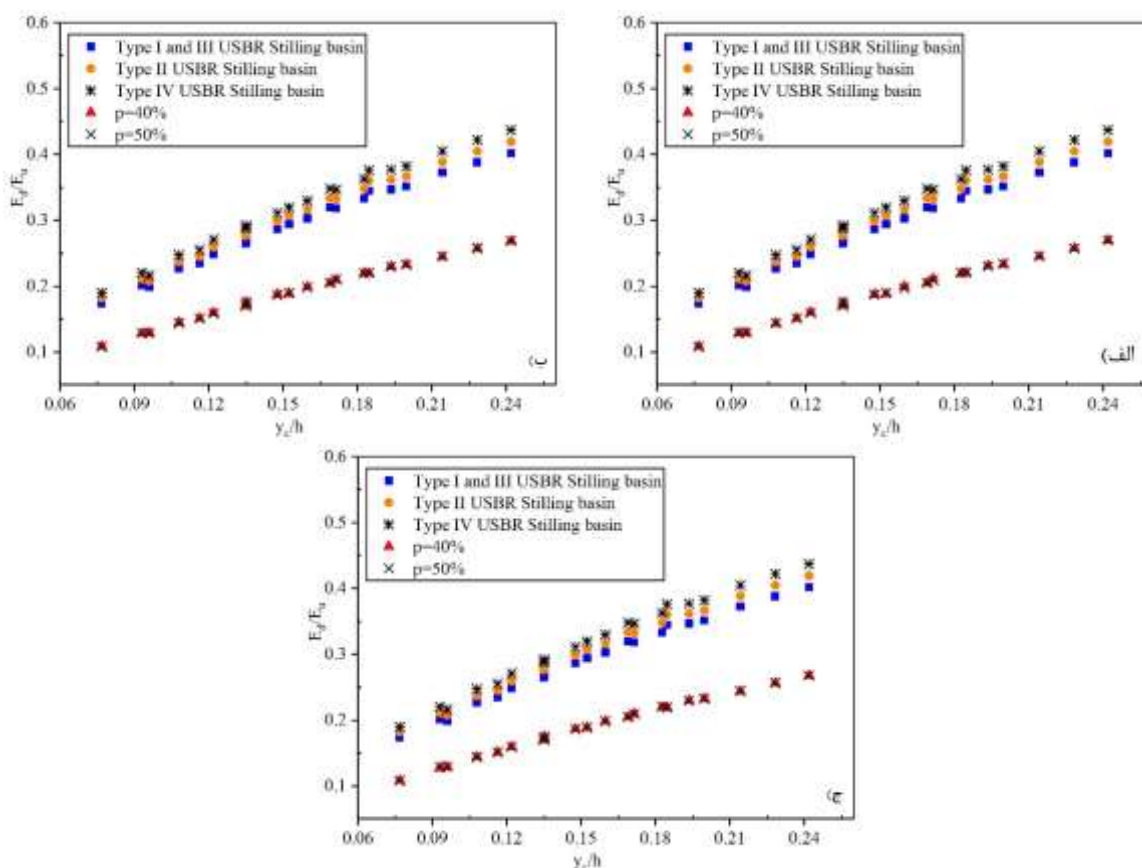
که برای استفاده از صفحات مشبک افقی دوگانه در لبه شیب‌شکن قائم، بدون نیاز به عمق پایاب و در نظر گرفتن تمهیدات پرش‌های متعدد و تو در تو تشکیل شده و جریان زیربحرانی می‌گردد.

انرژی نسبی باقی‌مانده

شکل‌های (۶-الف)، (۶-ب) و (۶-ج) نشان‌دهنده تغییرات انرژی نسبی باقی‌مانده در مقابل عمق بحرانی نسبی است. در این شکل تغییرات انرژی نسبی باقی‌مانده حاصل از نتایج تحقیق حاضر و شیب‌شکن قائم مجهز به حوضچه‌های آرامش با امکان ایجاد گرفته است. همان‌طور که در شکل‌های مذکور مشاهده می‌شود رفتار تمامی مدل‌های مطالعات انجام شده مشابه همدیگر می‌باشند. مطابق شکل‌های (۶-الف)، (۶-ب) و (۶-ج) انرژی نسبی باقی‌مانده صفحات مشبک دوگانه افقی نصب شده بر لبه شیب‌شکن قائم به مراتب بسیار کمتر از انرژی نسبی باقی‌مانده حوضچه‌های آرامش بوده و در اعماق بحرانی بالاتر این تغییرات بیش‌تر به چشم می‌خورد. همچنین مشاهده می‌شود که فاصله نسبی بین صفحات و همچنین درصد تخلخل صفحات تاثیر چندانی بر انرژی نسبی باقی‌مانده ندارد.

همچنین نتایج شکل (۵) برای یک تخلخل ثابت نشان می‌دهد در یک عمق بحرانی نسبی یکسان، فاصله نسبی بین صفحات نیز با این که سبب کاهش طول شیب‌شکن شده است، تاثیری بر عمق نسبی پایین‌دست ندارد. از آنجایی که به‌کارگیری صفحات مشبک افقی دوگانه سبب ایجاد پرش هیدرولیکی در پایین‌دست شیب‌شکن قائم می‌شود، لذا عملکرد این صفحات در استهلاک انرژی جریان مشابه حوضچه‌های آرامش با امکان ایجاد پرش هیدرولیکی در آن می‌باشد. به‌کارگیری صفحات مشبک افقی دوگانه در لبه شیب‌شکن قائم در مقایسه با حوضچه‌های آرامش نوع یک، دو، سه و چهار در کل به ترتیب باعث کاهش ۴۷، ۴۹، ۴۷ و ۵۲ درصدی عمق نسبی پایین‌دست می‌گردد.

به‌کارگیری صفحات مشبک دوگانه نسبت به حوضچه‌های آرامش در پایین‌دست شیب‌شکن قائم، عمق نسبی پایین‌دست را به میزان قابل توجهی کاهش می‌دهد. در حوضچه‌های آرامش برای تشکیل پرش هیدرولیکی در داخل حوضچه نیاز به عمق پایاب و در نظر گرفتن تمهیداتی (همچون بالابردن یا پایین بردن تراز کف حوضچه، استفاده از آب پایه و غیره) می‌باشد. این در حالی است



شکل ۶- تغییرات انرژی نسبی باقی‌مانده پایین‌دست در مقابل عمق بحرانی نسبی و فواصل نسبی صفحات (الف) $\alpha = 0.25$ (ب) $\alpha = 0.33$ (ج) $\alpha = 0.5$

شیب‌شکن کاهش می‌یابد. همچنین مقایسه نتایج حاصل از به- کارگیری صفحات مشبک افقی دوگانه در لبه شیب‌شکن قائم به جای حوضچه‌های آرامش نشان داد که این صفحات در مقایسه با حوضچه‌های آرامش نوع یک، دو، سه و چهار، طول کل شیب‌شکن، عمق نسبی پایین‌دست و انرژی نسبی باقی‌مانده را کاهش می‌دهد. بیش‌ترین کاهش طول شیب‌شکن در فاصله نسبی بین صفحات ۰/۵ با تخلخل ۵۰ درصدی در مقایسه با حوضچه نوع یک و چهار اتفاق افتاد. صفحات مشبک دوگانه افقی نصب شده بر لبه شیب‌شکن قائم در مقایسه با حضور حوضچه‌های آرامش نوع یک، دو، سه و چهار، انرژی نسبی باقی‌مانده و عمق نسبی پایین‌دست به ترتیب بیش از ۳۵ و ۴۹ درصد کاهش می‌دهد. نتایج نشان می‌دهد به‌کارگیری صفحات مشبک افقی دوگانه در لبه شیب‌شکن قائم، با کاهش طول حوضچه آرامش شیب‌شکن، عمق نسبی پایین‌دست و انرژی نسبی باقی‌مانده از پایین‌دست، می‌تواند نتایج مطلوب‌تر و اقتصادی‌تری داشته و بر حسب نیاز جایگزین مناسبی برای حوضچه‌های آرامش پایین‌دست شیب‌شکن قائم باشد. با این حال انسداد در مقابل اجسام شناور و رسوبات از جمله معایبی است که در رابطه با صفحات مشبک افقی وجود دارد و لازم است قبل از استفاده از این صفحات، تمهیداتی صورت گیرد تا از انسداد روزه‌های این صفحات جلوگیری به‌عمل آید.

با توجه با این که تخلخل و فاصله نسبی بین صفحات تأثیری بر انرژی نسبی باقی‌مانده ندارد، لذا متوسط کاهش نسبی انرژی باقی‌مانده شیب‌شکن قائم مجهز به صفحات مشبک افقی دوگانه در فاصله نسبی بین صفحات ۰/۵ و تخلخل ۵۰ درصدی نسبت به حوضچه‌های آرامش استاندارد مقایسه شد. بر همین اساس صفحات مشبک دوگانه افقی نصب شده بر لبه شیب‌شکن قائم در مقایسه با حوضچه آرامش نوع یک، دو، سه و چهار به- ترتیب باعث کاهش ۳۵، ۳۷/۸، ۳۵ و ۴۰/۴ درصدی انرژی نسبی باقی‌مانده پایین‌دست می‌گردد.

نتیجه‌گیری کلی

در تحقیق حاضر استهلاک انرژی صفحات مشبک دوگانه افقی نصب شده بر لبه شیب‌شکن قائم به‌صورت آزمایشگاهی مورد بررسی قرار گرفت و نتایج آن با نتایج حاصل از بکارگیری حوضچه‌های آرامش استاندارد نوع یک، دو، سه و چهار مورد مقایسه قرار گرفت. در مجموع تعداد ۱۴۰ آزمایش مختلف بر روی صفحات مشبک دوگانه افقی نصب شده بر لبه شیب‌شکن قائم در سه فاصله نسبی بین صفحات، دو درصد تخلخل و دو ارتفاع شیب‌شکن انجام شد. نتایج نشان داد که فاصله نسبی و تخلخل صفحات مشبک افقی دوگانه تأثیر چندانی بر انرژی نسبی باقی‌مانده جریان و عمق نسبی پایین‌دست نداشته ولی با این حال با افزایش فاصله نسبی و درصد تخلخل صفحات، طول کل

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 Univ, Ankara, Turkey*).
- Bozkus, Z., Çakir, P., & Ger, A. M. (2007). Energy dissipation by vertically placed screens. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 34(4), 557-564.
- 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 Tahni, A., (2019a). Experimental investigation of screen as energy dissipators in the movable-bed channel. *Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Civil Engineering*, pp.1-10, <https://doi.org/10.1007/s40996-019-00306-7>.
- Daneshfaraz, R., Sadeghfam, S., Hasanniya, V. (2019b). 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), 1421-1436 (In Persian).
- Daneshfaraz, R., Chabokpour, J., Nezafat, H. (2019c). 'Experimental Investigation of the Scouring due to Hydraulic Jump in Screens', *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 50(5), pp. 1039-1051. (In Persian).
- Daneshfaraz, R., Hasanniya, V., Mirzaei, R., Bazayr, A. (2020d). Experimental investigating effect of positive slope of the horizontal screen on hydraulic characteristics of vertical drop. *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 50(10), pp. 2499-2509. (In Persian).
- Daneshfaraz, R., Sadeghfam, S., Rezazadeh Joudi, A. (2017b). Experimental investigation on the effect of screen's location on the flow's energy dissipation. *Irrigation and Drainage Structures Engineering Research*, 17(67), 47-62 (In Persian).
- Daneshfaraz, R., Majedi Asl, M., Razmi, S., Norouzi, R.

- & Abraham, J. (2020a). Experimental investigation of the effect of dual horizontal screens on the hydraulic performance of a vertical drop. *Int. J. Environ. Sci. Technol.* **17**, 2927–2936 (2020a). <https://doi.org/10.1007/s13762-019-02622-x>
- Daneshfaraz, R., Asl, M.M., Bazayr, A., Abraham, J. and Norouzi, R. (2020b). The laboratory study of energy dissipation in inclined drops equipped with a screen. *Journal of Applied Water Engineering and Research*, DOI: 10.1080/23249676.2020.1799877
- Daneshfaraz, R., Sadeghfam, S., Minaei, O. (2020c). 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), pp. 2113-2123. doi: 10.22059/ijswr.2019.277537.668145 (In Persian).
- 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.
- Gill, M.A. (1979). Hydraulics of rectangular vertical drop structures. *Journal of Hydraulic Research*, **17**(4), 289-302.
- 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).
- 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.
- Mahmoud, M.I., Ahmed, S.S. And Al-Fahal, A.S.A. (2013). Effect of different shapes of holes on energy dissipation through perpendicular screen. *Journal of Environmental Studies*, **12**, 29-37.
- 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. *AUT Journal of Civil Engineering*.
- Peterka, A. J. (1978). Hydraulic design of stilling basins and energy dissipators (No. 25). Department of the Interior, Bureau of Reclamation.
- 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.
- Rand, W. (1955). Flow geometry at straight drop spillways. *In Proceedings of the American Society of Civil Engineers*, **81**(9), 1-13.
- Sadeghfam, S., Akhtari, A. A., Daneshfaraz, R., & Tayfur, G. (2015). Experimental investigation of screens as energy dissipators 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), pp.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.