

## Experimental Investigation of Energy Dissipation in Vertical Drops Equipped with a Horizontal Screen under Supercritical Flow

RASOUL DANESHFARAZ<sup>1\*</sup>, SINA SADEGHFAM<sup>2</sup>, VADOUD HASANNIYA<sup>3</sup>

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

2. Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, University of Maragheh, Maragheh, Iran.

3. M.Sc. Student, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, University of Maragheh, Maragheh, Iran.

(Received: Nov. 14, 2018- Revised: Dec. 31, 2018- Accepted: Jan. 28, 2019)

### ABSTRACT

In this study, horizontal screens were used in the edge of vertical drops, as an excessive energy dissipater of flow, to increase dissipation of energy in vertical drops with the supercritical flow at upstream. Experiments adjusted for a simple vertical drop and a drop equipped by screens with two porosity values and three openings of the upstream sluice gate. During the experiments, it was observed that the horizontal screen after drop increased the air entrance and turbulence in the pool due to dividing the falling jet into a large number of small vertical jets. The results indicate that using these plates in the vertical drops increases the relative depth of downstream, relative depth of pool and relative energy dissipation as compared to a simple vertical drop. Also, results showed by increasing the upstream Froude number and decreasing the relative critical depth, the relative energy dissipation increases. However, the porosity of screens has not a significant effect on energy dissipation. Investigation and comparison of the results corresponded to the simple vertical drops and the ones equipped with screens indicated that incorporating the horizontal screens in these structures eliminate or decrease the length of stilling ponds.

**Keywords:** Dissipater, downstream depth, Froude number, vertical drop

## بررسی آزمایشگاهی استهلاک انرژی در شیب‌شکن‌های قائم مجهز به صفحات مشبک افقی با جریان فوق بحرانی

رسول دانشفراز<sup>۱\*</sup>، سینا صادق فام<sup>۲</sup>، ودود حسن نیا<sup>۳</sup>

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

۲. استادیار، گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه مراغه، مراغه، ایران

۳. دانشجوی کارشناسی ارشد سازه‌های هیدرولیکی، گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه مراغه،

ایران

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۸/۲۳ - تاریخ بازنگری: ۱۳۹۷/۱۰/۱۰ - تاریخ تصویب: ۱۳۹۷/۱۱/۸)

### چکیده

در این مطالعه با هدف افزایش استهلاک انرژی در شیب‌شکن‌های قائم با جریان فوق بحرانی در بالادست، از صفحات مشبک به صورت افقی در لبه شیب‌شکن قائم به عنوان مستهلک‌کننده انرژی اضافی جریان استفاده گردید. آزمایش‌ها برای یک شیب‌شکن قائم ساده و شیب‌شکن مجهز به صفحات مشبک با دو نسبت تخلخل و سه بازشدگی درجه تنظیم گردید. در طی آزمایش‌ها مشاهده شد که صفحه مشبک افقی بعد از شیب‌شکن، با تقسیم جت در حال سقوط به تعداد بسیار زیادی از جت‌های کوچک عمودی باعث افزایش تداخل هوا و تلاطم در داخل استخر گردید. مقایسه نتایج نشان داد که استفاده از این صفحات در شیب‌شکن‌های قائم باعث افزایش عمق نسبی پایین‌دست، عمق نسبی استخر و استهلاک انرژی نسبی نسبت به شیب‌شکن قائم ساده می‌گردد. همچنین با بررسی نتایج مشخص گردید که با افزایش عدد فرود بالادست و کاهش عمق بحرانی نسبی، استهلاک انرژی نسبی افزایش می‌یابد. این درحالی است که تخلخل صفحات مشبک تأثیری بر روی این پارامتر ندارد. بررسی و مقایسه نتایج مربوط به شیب‌شکن‌های قائم ساده و مجهز به صفحه مشبک نشان داد که استفاده از صفحات مشبک افقی در این سازه‌ها باعث کاهش طول حوضچه آرامش و حذف سازه حوضچه آرامش می‌گردد.

**واژه‌های کلیدی:** شیب‌شکن قائم، مستهلک‌کننده، عدد فرود، عمق پایین‌دست

### مقدمه

صفحات مشبک از جمله سازه‌های مستهلک‌کننده انرژی جریان می‌باشند که امروزه به عنوان روشی برای افزایش استهلاک انرژی جریان و کاهش طول حوضچه‌های آرامش بکار گرفته می‌شوند. صفحات مشبک جایگزین حوضه‌های آرامش نمی‌باشند، اما در مواقعی که استفاده از حوضچه‌های آرامش از لحاظ فنی امکان‌پذیر نبوده و یا صرفه اقتصادی ندارند، استفاده از این صفحات می‌تواند کاربرد داشته باشد. این صفحات اکثراً با قرار گرفتن در مقابل جریان با هدف تحمیل پرش هیدرولیکی و ایجاد تلاطم ناشی از عبور جریان از داخل خود باعث استهلاک انرژی در پایین‌دست سازه‌های هیدرولیکی کوچک می‌گردند. شیب‌شکن‌های قائم یکی از روگذرهای جریان می‌باشند که می‌توان از این صفحات به عنوان کاهنده انرژی جنبشی جریان استفاده کرد. جریان ورودی به عنوان یکی از مهم‌ترین مولفه‌های طراحی در بالادست این سازه‌ها معمولاً دارای حالت زیر بحرانی می‌باشد. با این وجود امکان عبور

جریان فوق بحرانی به دلیل شرایط توپوگرافی، وجود درجه قبل از شیب‌شکن و همچنین استفاده از شیب‌شکن‌ها با فواصل طولی کم در بالادست از روی لبه شیب‌شکن وجود دارد. جریان فوق بحرانی در بالادست شیب‌شکن‌های قائم به منظور قدرت ضربه‌ای، تخریبی و فرسایشی بسیار زیاد نسبت به جریان زیر بحرانی، از پارامترهای مهم و تأثیرگذار در طراحی سازه‌های استهلاک انرژی در پایین‌دست می‌باشد. این بررسی طی یک رویکرد عملی، با مجهز کردن شیب‌شکن قائم به صفحات مشبک افقی در لبه آن و تحت شرایط فوق بحرانی در بالادست معرفی شده است.

شیب‌شکن‌های قائم سازه‌های هیدرولیکی رایج مورد استفاده در کانال‌های آبیاری و زهکشی می‌باشند که با هدف استهلاک انرژی و کاهش شیب زمین به شیب طراحی مورد استفاده قرار می‌گیرند. این سازه‌ها با کنترل شیب طولی کانال و انتقال آب از سطح بالاتر به سطح پایین‌تر باعث ایجاد سرعت بهینه در پایین‌دست کانال و جلوگیری از آبستنگی بستر در اثر

عمق نسبی استخر افزایش پیدا می‌کند.

اولین مطالعه در زمینه بررسی پارامترهای هیدرولیکی شیب‌شکن‌های قائم با جریان فوق بحرانی در بالادست توسط (Chamani and Beirami (2002 صورت پذیرفت. این محققین با اندازه‌گیری آزمایشگاهی عمق استخر و عمق پایین‌دست با دبی‌ها و اعداد فرود متفاوت نشان دادند که در یک عمق بحرانی نسبی ثابت با افزایش عدد فرود پارامترهای استهلاک انرژی نسبی، عمق نسبی پایین‌دست و عمق نسبی استخر کاهش و با افزایش عمق بحرانی نسبی در یک عدد فرود ثابت، استهلاک انرژی نسبی کاهش و مقادیر عمق نسبی پایین‌دست و عمق نسبی استخر افزایش می‌یابند. بعد از آن (Tokuyay and Yildiz (2007 مطالعاتی بر روی شیب‌شکن قائم تحت شرایط فوق بحرانی در بالادست انجام دادند و برای اولین بار پدیده‌ی جدیدی به نام پاشیدگی جریان در اثر برخورد جت با کف استخر را ارائه و دو پارامتر طول پاشیدگی و عمق پاشیدگی را معرفی کردند. همچنین این محققین دریافتند که عمق نسبی استخر به مقادیر عدد فرود بالادست بستگی نداشته و فقط به ارتفاع نسبی شیب‌شکن بستگی دارد. تأثیر شیب بالادست بر روی پارامترهای هیدرولیکی شیب‌شکن‌های قائم با جریان فوق بحرانی در بالادست توسط (Liu et al. (2014 مورد بررسی قرار گرفت. Daneshfaraz et al. (2019a) به بررسی آزمایشگاهی تأثیر عدد فرود بر رفتار کلی پارامترهای هیدرولیکی شیب‌شکن قائم با جریان فوق بحرانی در بالادست پرداختند. نتایج تحقیق حاضر با بازه اعداد فرود بزرگتر با پژوهش‌های پیشین مورد مقایسه و دلایل تطابق و یا عدم تطابق مورد مطالعه قرار گرفت.

از آنجایی‌که امروزه استفاده از مکانیسم تداخل آب با هوا به عنوان یکی از روش‌های موثر در کنترل سرعت و کاهش انرژی اضافی جریان شناخته شده است. از این رو محققین به طراحی سازه‌های هیدرولیکی مختلف برای ایجاد پرش هیدرولیکی به عنوان روشی شناخته شده به منظور افزایش تلاطم و استهلاک انرژی پرداخته‌اند (Daneshfaraz et al. (2019b, c, d). صفحات مشبک یکی از سازه‌هایی هستند که برای افزایش استهلاک انرژی، تشکیل و کنترل پرش در سال‌های اخیر مورد توجه بسیاری قرار گرفته است (Norouzi et al. (2019). Rajaratnam (2000) and Hurtig استهلاک انرژی در صفحات مشبک را مورد بررسی آزمایشگاهی قرار داده و نشان دادند که صفحات مشبک با نسبت روزنه‌های ۴۰ درصد، انرژی را به شکل موثرتری کاهش می‌دهد. همچنین مشخص گردید که برای یک عدد فرود ثابت استهلاک انرژی ناشی از حضور صفحات مشبک بیشتر از پرش هیدرولیکی

شیب زیاد زمین می‌گردند. پروفیل بالا و پایین سطح آزاد جت در حال سقوط و پارامترهای هیدرولیکی شیب‌شکن‌های قائم از جمله عمق استخر، طول شیب‌شکن، عمق پایین‌دست و استهلاک انرژی به طور گسترده مورد مطالعه قرار گرفته است.

اکثر مطالعات صورت گرفته در زمینه شیب‌شکن‌های قائم معمولاً معطوف به بررسی پارامترهای هیدرولیکی شیب‌شکن‌های قائم با جریان زیر بحرانی در بالادست بوده است که توسط محققینی همچون (Chamani et al., 2008; Rajaratnam and Chamani, 1995; Rand, 1955; White, 1943; Moore, 1943) مورد بررسی قرار گرفته است. برخی از محققین نیز به بررسی تأثیر سازه‌های الحاقی و شکل هندسی این سازه‌ها بر روی پارامترهای هیدرولیکی شیب‌شکن‌های قائم پرداخته‌اند. (Esen et al. (2004 تأثیر وجود پله با ابعاد مختلف در پایین‌دست شیب‌شکن‌های قائم با جریان زیر بحرانی در بالادست را مورد بررسی آزمایشگاهی قرار دادند. نتایج نشان داد که استفاده از پله در پایین‌دست شیب‌شکن‌های قائم باعث افزایش عمق نسبی پایین‌دست و استهلاک انرژی نسبی می‌شود. همچنین مشخص گردید که با افزایش ارتفاع نسبی پله، پارامترهای عمق نسبی پایین‌دست و استهلاک انرژی نسبی نیز افزایش می‌یابند. بررسی تأثیر شیب پایین‌دست بر روی پارامترهای هیدرولیکی شیب‌شکن‌های قائم توسط (Hong et al. (2010 صورت پذیرفت. این محققین با آزمایش بر روی چهار شیب مختلف در پایین‌دست شیب‌شکن قائم نشان دادند که با افزایش میزان شیب، پارامترهای طول شیب‌شکن و نیروی برخورد افزایش می‌یابند.

(Kabiri-Samani et al. (2017 مطالعاتی را در زمینه‌ی پارامترهای هیدرولیکی در شیب‌شکن‌های قائم مجهز به مستهلک‌کننده‌ی شبکه‌ای و شیار با جریان زیر بحرانی در بالادست انجام دادند. نتایج نشان داد که استفاده از این نوع مستهلک‌کننده‌ها باعث کاهش طول حوضچه آرامش و افزایش استهلاک انرژی در مقایسه با شیب‌شکن ساده می‌گردد. تأثیر عمق پایین‌دست در شیب‌شکن‌های قائم مجهز به مستهلک‌کننده‌های شبکه‌ای و شیار با جریان زیر بحرانی در بالادست توسط (Sharif and Kabiri-Samani (2018 صورت پذیرفت. این محققین در آزمایش‌های خود مشاهده کردند که دو نوع رژیم جریان جت‌های سقوطی حباب‌دار و رژیم جریان‌های سطحی در پایین‌دست شیب‌شکن‌های مجهز به مستهلک‌کننده‌ی شبکه‌ای اتفاق می‌افتد. همچنین نتایج این محققین نشان داد که با افزایش عمق نسبی پایاب شیب‌شکن، تداخل آب با هوا، طول نسبی اولین جت برخوردی به استخر و طول نسبی تداخل جریان کاهش و

می‌باشد. Balkiř (2004) تأثیر شیب صفحات مشبک در استهلاک انرژی جریان را مورد بررسی آزمایشگاهی قرار داد. نتایج حاصل از این تحقیق نشان داد که شیب صفحات مشبک تأثیری بر روی میزان استهلاک انرژی جریان ندارد. تأثیر عمق پایاب و آرایش چندگانه صفحات مشبک در استهلاک انرژی جریان توسط Aslankara (2007) مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که عمق پایاب تأثیر چندانی در استهلاک انرژی ندارد در صورتیکه آرایش چندگانه استهلاک انرژی را نسبت به آرایش منفرد افزایش می‌دهد.

Sadeghfam *et al.* (2015) با بررسی آزمایشگاهی رفتار صفحات مشبک در مواجهه جریان فوق بحرانی با بازه عدد فرود ۲/۵ تا ۸/۵ نشان دادند که صفحات مشبک، نسبت به هر دو پرش هیدرولیکی آزاد و مستغرق، افت انرژی بیشتری داشته و آرایش دوتایی صفحات، عملکرد بهتری نسبت به آرایش منفرد دارند. همچنین این محققین ثابت کردند که فاصله مابین این صفحات تأثیری بر استهلاک انرژی ندارد. (Daneshfaraz *et al.* 2016) به بررسی آزمایشگاهی تأثیر محل قرارگیری صفحات مشبک در میزان استهلاک انرژی پرداخته و نشان دادند که برای تمامی حالت‌های استفاده از صفحات مشبک، میزان استهلاک انرژی ناشی از استفاده از این صفحات بیشتر از استهلاک انرژی نسبی ناشی از پرش آزاد می‌باشد. همچنین نشان دادند که با افزایش عدد فرود عملکرد صفحات مشبک (استهلاک انرژی نسبی)، افزایش و بازده (راندمان) این صفحات در استهلاک انرژی کاهش می‌یابد. برای توضیح متن بالا بیان می‌شود که دو عبارت عملکرد سیستم و بازده سیستم معانی متفاوتی دارند: عملکرد سیستم بیانگر استهلاک انرژی سیستم ناشی از وجود صفحات مشبک نسبت به انرژی جریان فوق بحرانی است که این عبارت استهلاک انرژی نسبی نامیده می‌شود، بازده سیستم بیانگر اختلاف بین استهلاک انرژی نسبی سیستم با وجود صفحه مشبک و استهلاک انرژی نسبی سیستم ناشی از پرش هیدرولیکی آزاد است.

استهلاک انرژی ناشی از عوامل سیستم‌های مستهلک‌کننده پرش هیدرولیکی، بلوک و صفحه مشبک نیز توسط Daneshfaraz *et al.* (2017) مورد بررسی آزمایشگاهی قرار گرفت. نتایج نشان داد که برای یک عدد فرود ثابت، مدل صفحه مشبک ۴۰٪ نسبت به مدل ۵۰٪ انرژی بیشتری را در حوضچه‌های آرامش مستهلک می‌کند. همچنین بررسی‌ها نشان داد مدل‌هایی که در آن‌ها از بلوک‌های مانع قبل از صفحات مشبک استفاده شده است، استهلاک انرژی بیشتری نسبت به مدل‌های متناظر بدون بلوک ایجاد می‌کنند.

با بررسی مطالعات صورت گرفته در زمینه شیب‌شکن‌های

قائم و لزوم بررسی تأثیر جریان ورودی به عنوان پارامتری مهم در طراحی این سازه‌ها، یکی از مسائل شناخته شده این سازه‌ها تحت شرایط جریان فوق بحرانی در بالادست، قدرت ضربه‌ای، تخریبی و فرسایشی بسیار زیاد می‌باشد. استقرار صفحات مشبک به صورت افقی در لبه سازه‌های روگذر جریان و عبور جریان از داخل این صفحات، با تقسیم جریان و ایجاد شرایطی برای مکش طبیعی هوا و اکسیژن‌دهی آن می‌تواند به افزایش استهلاک انرژی منجر گردد. همچنین با توجه به اینکه در مطالعات گذشته تأثیر صفحات مشبک افقی بر روی استهلاک انرژی شیب‌شکن‌های قائم با جریان فوق بحرانی مورد مطالعه قرار نگرفته است. بنابراین در تحقیق حاضر استفاده توأمان شیب‌شکن قائم تحت شرایط فوق بحرانی در بالادست و صفحات مشبک افقی برای کاهش هر چه بیشتر انرژی اضافی جریان در پایین‌دست شیب‌شکن‌ها مورد مطالعه قرار گرفت.

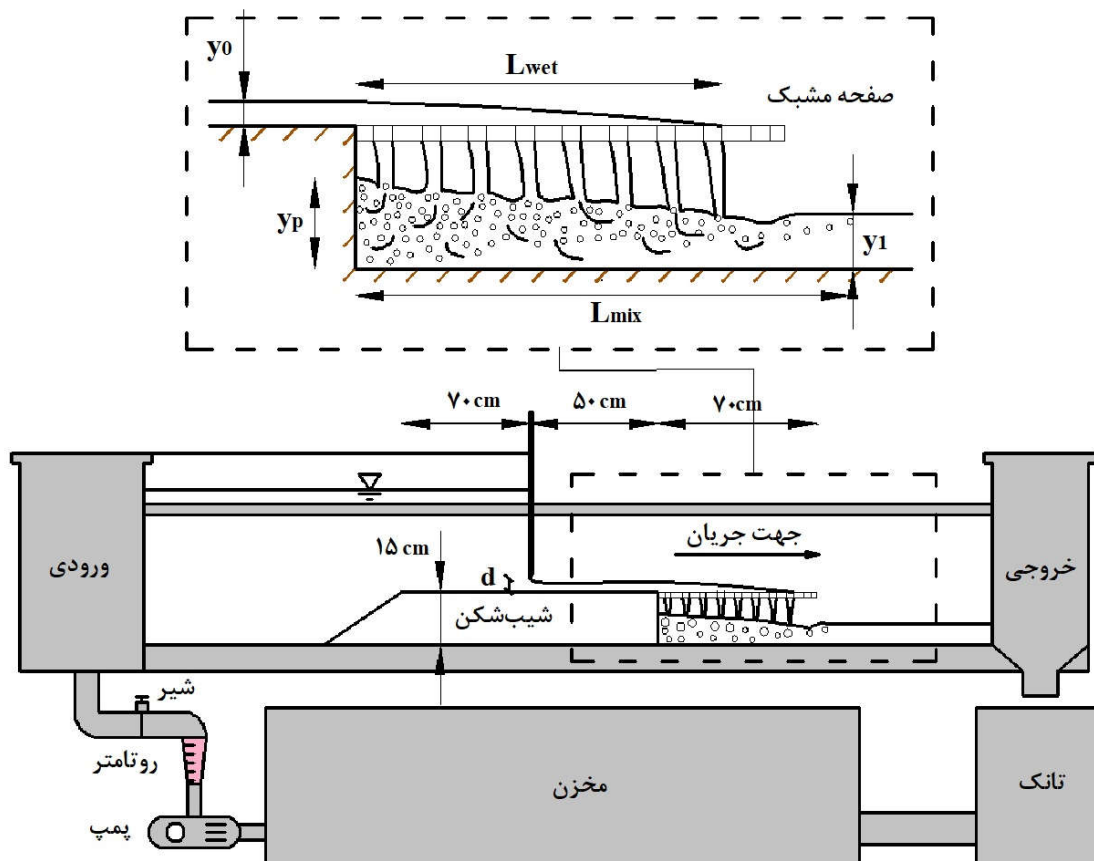
## مواد و روش‌ها

### مدل و تجهیزات آزمایشگاهی

آزمایش‌ها در فلوم آزمایشگاهی به طول ۵ متر، عرض ۰/۳ متر و ارتفاع متغیر ۰/۷-۰/۴۵ متر با کف و دیواره‌هایی از جنس پلکسی‌گلس شفاف انجام پذیرفت. جریان ورودی فلوم توسط دو عدد پمپ هر کدام با توان ۴۵۰ لیتر در دقیقه تأمین و با استفاده از روتامتر نصب شده بر پمپ با خطای نسبی  $\pm 2\%$  درصد تنظیم می‌گردید. جریان ورودی توسط پمپ وارد مخزن بالادست شده و با عبور از آرام‌کننده جریان وارد فلوم می‌گردید. تمامی اعماق اندازه‌گیری شده در این تحقیق در پنج نقطه از عرض کانال و با عمق‌سنج نقطه‌ای با دقت یک میلی‌متر اندازه‌گیری شد. برای ایجاد سازه شیب‌شکن در کانال از باکس‌های شیشه‌ای هم عرض کانال با ارتفاع ۰/۱۵ متر استفاده شده است. همچنین صفحات مشبک از جنس پلی‌اتیلن به ضخامت یک سانتی‌متر و با روزه‌های دایره‌ای با ساختار زیگزاگی و به قطر یک سانتی‌متر ساخته شده است. کلیه صفحات مشبک مورد استفاده مطابق تحقیق‌های صورت گرفته توسط (Daneshfaraz *et al.*, 2016; Daneshfaraz *et al.*, 2017; Sadeghfam *et al.*, 2019; Daneshfaraz *et al.*, 2019e; Nayebzadeh *et al.*, 2019; Hasannia *et al.*, 2019) با نسبت روزه‌های ۴۰ و ۵۰ درصد و به طول ۷۰ سانتی‌متر به حالت افقی با شیب صفر درجه در لبه شیب‌شکن نصب گردید. برای ایجاد جریان فوق بحرانی با اعداد فرود مختلف در دبی‌های ثابت، یک دریچه فولادی به ضخامت ۳ میلی‌متر با بازشدگی‌های ۱/۳، ۱/۷ و ۲/۱ سانتی‌متر و فاصله ۵۰ سانتی‌متر از لبه شیب‌شکن

افزایش داده شد. شکل (۱) نمای شماتیک کانال، تجهیزات نصب- شده و شماتیک جریان در شیبشکن قائم مجهز به صفحات مشبک را نشان می‌دهد.

نصب گردید. همچنین برای دستیابی به محدوده گسترده‌تری از اعداد فرود، ارتفاع مخزن پشت دریچه به میزان ۲۵ سانتی‌متر



شکل ۱. نمای شماتیک جریان در کانال آزمایشگاهی

محاسبه گردید:

$$H_1 = y_1 + \frac{q^2}{2gy_1^2} \quad (\text{رابطه ۲})$$

مقدار استهلاک انرژی ( $h_L$ ) و استهلاک انرژی نسبی

$$\left(\frac{h_L}{H_0}\right) \text{ از روابط (۳) و (۴) محاسبه شدند:}$$

$$h_L = H_0 - H_1 \quad (\text{رابطه ۳})$$

$$\frac{h_L}{H_0} = \frac{H_0 - H_1}{H_0} \quad (\text{رابطه ۴})$$

همچنین راندمان استهلاک انرژی ( $\eta$ ) شیبشکن مجهز به

صفحات مشبک نسبت به شیبشکن قائم ساده با استفاده از رابطه (۵) قابل محاسبه است.

$$\eta = \frac{h_L(\text{vertical drop equipped with screens})}{h_L(\text{plain vertical drop})} - 1 \quad (\text{رابطه ۵})$$

محاسبات مربوط به استهلاک انرژی

به منظور دستیابی به اهداف تحقیق حاضر که استهلاک انرژی در شیبشکن‌های قائم مجهز به صفحات مشبک با جریان فوق بحرانی در بالادست می‌باشد، ابتدا نحوه محاسبه انرژی در بالادست و پایین‌دست کانال بیان می‌شود. در تحقیق حاضر برای محاسبه میزان بار کل بالادست شیبشکن از رابطه (۱) استفاده گردید:

$$H_0 = h + y_0 + \frac{q^2}{2gy_0^2} \quad (\text{رابطه ۱})$$

که در آن  $H_0$  بار کل بالادست شیبشکن،  $h$  ارتفاع شیبشکن،  $y_0$  عمق آب بالادست شیبشکن،  $q$  دبی در واحد عرض و  $g$  شتاب گرانش زمین می‌باشد. همچنین عمق پایین- دست ( $y_1$ ) در محل آرام شدن جریان (بعد از برخورد آخرین جت با استخر) اندازه‌گیری و انرژی پایین‌دست ( $H_1$ ) نیز از رابطه (۲)

### آنالیز ابعادی

برای محاسبه استهلاک انرژی در شیب‌شکن‌های قائم مجهز به صفحات مشبک با جریان فوق بحرانی در بالادست ابتدا پارامترهای موثر شناسایی و پس از آن با تجزیه و تحلیل ابعادی، روابط کلی شامل پارامترهای بی‌بعد استخراج گردیدند. پارامترهای موثر در این تحقیق را می‌توان به صورت رابطه (۶) نوشت:

$$h_L = f_1(\rho, \mu, g, V_0, B, h, p, t, y_c, y_0, y_1) \quad (\text{رابطه } 6)$$

که در آن:  $h_L$  استهلاک انرژی  $[L]$ ،  $\rho$  جرم مخصوص آب  $[ML^{-3}]$ ،  $\mu$  لزوجت دینامیکی  $[ML^{-1}T^{-1}]$ ،  $g$  شتاب گرانش زمین  $[LT^{-2}]$ ،  $V_0$  سرعت بالادست شیب‌شکن  $[LT^{-1}]$ ،  $B$  عرض کانال  $[L]$ ،  $h$  ارتفاع شیب‌شکن  $[L]$ ،  $P$  نسبت تخلخل صفحه مشبک  $[-]$ ،  $t$  ضخامت صفحات مشبک  $[L]$ ،  $y_c$  عمق بحرانی  $[L]$ ،  $y_0$  عمق بالادست شیب‌شکن  $[L]$  و  $y_1$  عمق پایین‌دست شیب‌شکن  $[L]$  می‌باشند. همچنین انرژی بالادست می‌تواند با استفاده از رابطه (۷) بیان شود:

$$H_0 = f_2(g, V_0, h, y_0) \quad (\text{رابطه } 7)$$

با در نظر گرفتن رابطه (۷)، رابطه (۶) به صورت زیر بیان می‌گردد.

$$h_L = f_3(\rho, \mu, g, V_0, h, p, t, y_0, y_c, y_1, H_0) \quad (\text{رابطه } 8)$$

با در نظر گرفتن  $\rho$ ،  $y_0$  و  $g$  به عنوان متغیرهای تکراری رابطه بی‌بعد (۹) به دست آمد.

$$\frac{h_L}{H_0} = f_4(\text{Re}_0 = \frac{V_0 y_0 \mu}{\rho}, Fr_0 = \frac{V_0}{(g y_0)^{0.5}}, \frac{h}{y_0}, p, \frac{t}{y_0}, \frac{y_c}{y_0}, \frac{y_1}{y_0})$$

که در آن  $Fr_0$  و  $\text{Re}_0$  به ترتیب نشان‌دهنده عدد رینولدز و عدد فرود جریان در بالادست شیب‌شکن می‌باشد. همچنین با تقسیم پارامتر  $\frac{y_c}{y_0}$  بر  $\frac{h}{y_0}$  رابطه (۱۰) حاصل گشت.

$$\frac{h_L}{H_0} = f_5(\text{Re}_0, Fr_0, p, \frac{t}{h}, \frac{y_c}{h}, \frac{y_1}{h}) \quad (\text{رابطه } 10)$$

از آنجایی که بازه عدد رینولدز در این مطالعه بین ۷۰۰۰ تا ۳۱۰۰۰ می‌باشد، بنابراین جریان کاملاً متلاطم بوده و می‌توان از اثر لزوجت صرف‌نظر نمود (Hager and Bremen, 1989; Rajaratnam, 1976). پارامتر ضخامت صفحات مشبک  $(\frac{t}{h})$  نیز توسط (Bozkuş *et al.*, 2005; Balkiş, 2004; Çakir, 2003) به عنوان پارامتری غیر موثر بر استهلاک انرژی معرفی شده است، بنابراین از تأثیرات ضخامت صفحات مشبک نیز صرف‌نظر می‌شود. همچنین پارامتر عمق نسبی پایین‌دست  $(\frac{y_1}{h})$  به عنوان

پارامتری مستقل می‌تواند با کنترل عمق دریاچه در پایین‌دست بر روی استهلاک انرژی جریان تأثیرگذار باشد. به طوریکه افزایش بیش از حد آن می‌تواند موجب استغراق شیب‌شکن و صفحات مشبک گردد. اما در تحقیق حاضر با توجه به عدم کنترل عمق پایاب شیب‌شکن توسط دریاچه پایین‌دست و خارج بودن از اهداف مطالعاتی حاضر، از تأثیر عمق نسبی پایین‌دست صرف‌نظر می‌شود. با این حال تأثیر این پارامتر می‌تواند در مطالعات آتی مورد بررسی قرار گیرد. بنابراین با صرف‌نظر کردن از عمق نسبی پایین‌دست و نیز با صرف‌نظر کردن از پارامترهای بی‌بعد اشاره شده می‌توان استهلاک انرژی نسبی را به صورت تابعی از پارامترهای بی‌بعد  $(Fr_0, \frac{y_c}{h}, p)$  معرفی کرد.

$$\frac{h_L}{H_0} = f_6(Fr_0, \frac{y_c}{h}, p) \quad (\text{رابطه } 11)$$

طول تلاطم جریان پایین‌دست  $(L_{mix})$ ، عمق نسبی استخر و عمق نسبی پایین‌دست صفحه مشبک نیز بر اساس کمیت‌های بدون بعد بصورت زیر قابل بیان است. لازم به ذکر است طول تلاطم جریان، عمق نسبی استخر و عمق نسبی پایین‌دست پارامترهای وابسته رابطه زیر می‌باشند:

$$(\text{رابطه } 12)$$

$$f_7(\rho, \mu, g, V_0, B, h, y_c, y_0, L_{mix}, y_1, y_p, p, t) = 0$$

با در نظر گرفتن  $\rho$ ،  $y_0$  و  $g$  به عنوان متغیرهای تکراری، روابط بی‌بعد به صورت زیر استخراج گردید.

$$(\text{رابطه } 13)$$

$$f_8(\text{Re}_0, Fr_0, \frac{h}{y_0}, p, \frac{t}{y_0}, \frac{y_c}{y_0}, \frac{L_{mix}}{y_0}, \frac{y_p}{y_0}, \frac{y_1}{y_0}) = 0$$

همچنین با صرف نظر کردن از پارامترهای بی‌بعد غیرموثر ذکر شده و ساده‌سازی رابطه (۱۳) پارامترهای وابسته به صورت زیر قابل بیان است.

$$\frac{L_{mix}}{h}, \frac{y_p}{h}, \frac{y_1}{h} = f_9(Fr_0, \frac{y_c}{h}, p) \quad (\text{رابطه } 14)$$

اما طول خیس شده صفحه مشبک پارامتر دیگری است که در شیب‌شکن‌های مجهز به صفحه مشبک افقی با جریان فوق بحرانی در بالادست 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 ارتفاع شیب‌شکن و شرایط جریان در پایین‌دست بر طول خیس شده صفحه مشبک تأثیری ندارد. پارامترهای دخیل در این پارامتر به صورت رابطه (۱۵) استخراج گردید:

$$L_{wet} = f_{10}(\rho, \mu, g, Q, B, p, y_c, y_0) \quad (\text{رابطه } 15)$$

با استخراج پارامترهای بی‌بعد و صرف‌نظر کردن از

کامل جریان در مدل‌های آزمایشگاهی موجود، تمامی اندازه-گیری‌های صورت گرفته ۱۵ دقیقه بعد از تنظیم مدل‌ها صورت گرفت. محدوده متغیرهای اندازه‌گیری شده در تحقیق حاضر در جدول (۱) ارائه شده است.

در این تحقیق ۸۰ درصد از داده‌های آزمایشگاهی به طور تصادفی انتخاب شده و به عنوان ورودی برای بدست آوردن روابط استفاده شدند. ۲۰ درصد باقی‌مانده از داده‌ها نیز برای صحت سنجی معادلات ارائه شده استفاده گردید. همچنین از شاخص-های آماری NRMSE خطای جذر میانگین مربعات نرمال‌سازی شده و  $R^2$  ضریب همبستگی برای ارزیابی روابط ارائه شده به شرح جدول (۲) استفاده گردید.

پارامترهای غیرموثر آن، طول نسبی خیس‌شده به عنوان پارامتر وابسته به صورت زیر بیان گردید.

$$\frac{L_{wet}}{y_c} = f_{11}(Fr_0, p, \frac{y_c}{y_0}) \quad (\text{رابطه ۱۶})$$

در تحقیق حاضر ۸۶ آزمایش بر اساس نسبت‌های بی‌بعد  $Fr, \frac{y_c}{h}, p$  و ۴۳ آزمایش دیگر بر روی شیب‌شکن بدون حضور صفحات مشبک با بازشدگی‌های دریاچه ( $d=1.3-1.7-2.1 \text{ cm}$ )، در مجموع ۱۲۹ آزمایش مورد بررسی قرار گرفته است. نسبت‌های بی‌بعد عدد فرود در محدوده  $1.5 \leq Fr \leq 8.7$ ، عمق بحرانی نسبی در محدوده  $0.13 \leq \frac{y_c}{h} \leq 0.32$  و نسبت تخلخل صفحات مشبک برابر با دو مقدار ۴۰ و ۵۰ درصد می‌باشد. همچنین برای پایداری

جدول ۱. محدوده متغیرهای اندازه‌گیری شده

محدوده متغیرها		متغیرهای اندازه‌گیری شده
شیب‌شکن قائم مجهز به صفحات مشبک افقی	شیب‌شکن قائم ساده	
P=50%	P=40%	
۱۵۰-۶۰۰	۱۵۰-۶۰۰	$Q(L / \text{min})$
۱/۰-۷۷/۹	۱/۰-۷۷/۹	$y_0(\text{cm})$
۵/۲-۴۹/۵۳	۵/۲-۳۶/۴۶	$y_1(\text{cm})$
۱۰/۳-۸/۵۵	۱۰/۳-۲۵/۵	$y_p(\text{cm})$
۵۶/۸-۵/۹	۶۹/۱۱-۵/۵	$L_{wet}(\text{cm})$
۵۹/۱۱-۷/۳	۷۳/۱۳-۶/۹	$L_{mix}(\text{cm})$

جدول ۲. 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 نرمال‌سازی 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 داده‌های آزمایشگاهی،  $M$  متوسط داده‌های آزمایشگاهی،  $X_{exp}$  مقادیر آزمایشگاهی  $X$  و  $X_{cal}$  مقادیر محاسبه شده  $X$  است.

## نتایج و بحث

### مشاهدات آزمایشگاهی

هیدرولیکی در پایین‌دست شیب‌شکن همراه است. با تثبیت جریان و برخورد جت‌های عبوری از صفحات مشبک بر روی پرش هیدرولیکی تشکیل یافته، این پدیده تقریباً به صورت تلاطم و حباب‌های کوچک هوا در داخل استخر دیده می‌شود. برخورد جت‌های تقسیم‌شده با سطح آزاد آب استخر باعث تداخل آب با هوا و ایجاد جریان دو فازی در استخر می‌گردد. همچنین برای دبی‌های کم به دلیل کم بودن عمق داخل استخر، جت‌های

با تنظیم دبی جریان و عبور آن از لبه شیب‌شکن به دلیل وجود محیط متخلخل ناشی از حضور صفحات مشبک، جریان ورودی به جریان‌های متعدد و کوچکی از جت تبدیل می‌شوند که به صورت تقریباً قائم به کف استخر برخورد می‌کنند. اولین جت‌های برخوردی به کف در درجه اول به علت عدم تثبیت جریان با پرش

به دلیل افزایش عمق آب داخل استخر، به کف بستر برخورد نمی-کنند و تداخل آب با هوا به کف استخر نمی‌رسد. شکل (۲) شرایط مختلف ایجاد تلاطم در شیب‌شکن‌های قائم مجهز به صفحه مشبک افقی با جریان فوق بحرانی در بالادست را نشان می‌دهد.

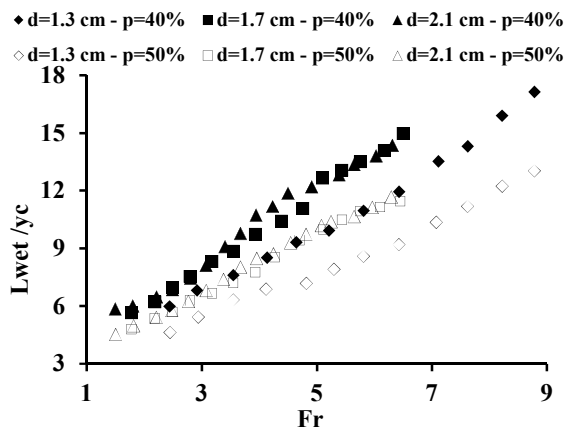


شکل ۲. شرایط مختلف ایجاد تلاطم در شیب‌شکن‌های قائم مجهز به صفحه مشبک افقی با جریان فوق بحرانی در بالادست

که شیب‌شکن مجهز به صفحه مشبک با درصد تخلخل کمتر، میزان دبی کمتری در واحد طول از خود عبور می‌دهد. این عامل باعث افزایش طول خیس‌شده و تلاطم در پایین‌دست شیب‌شکن می‌گردد.

#### طول خیس‌شده

فاصله محل آخرین نقطه خیس‌شده از صفحه مشبک تا اولین نقطه شروع این صفحات که به عنوان طول خیس‌شده نامیده می‌شود، پارامتری مهم در طراحی شیب‌شکن‌های مجهز به صفحات مشبک می‌باشد. شکل (۳) بیانگر تغییرات طول نسبی خیس‌شده در شیب‌شکن‌های قائم مجهز به صفحات مشبک افقی با جریان فوق بحرانی در بالادست، در مقابل عدد فرود بالادست می‌باشد.



شکل ۳. تغییرات طول نسبی خیس‌شده در شیب‌شکن‌های مجهز به صفحه مشبک افقی با جریان فوق بحرانی نسبت به عدد فرود بالادست

برخوردی به سطح آزاد آب با عبور از داخل آب به کف بستر برخورد می‌کنند، این عامل باعث تلاطم شدید جریان می‌گردد. با افزایش دبی در تمامی بازشدگی‌های دریچه، جت‌های برخوردی

تقریباً در تمامی آزمایش‌ها مشاهده گردید که در داخل استخر و در بخش‌های نزدیک به لبه شیب‌شکن جریان برگشتی به سمت بالادست وجود دارد. در طول آزمایش‌ها استفاده از تزریق رنگ، تداخل آب با هوا، وجود تلاطم ناشی از برخورد جت با استخر و جریان برگشتی به داخل استخر را تأیید کرد. همچنین با افزایش دبی به دلیل عدم توانایی عبور تمام دبی ورودی، طول خیس‌شده صفحه مشبک نیز افزایش می‌یابد که به طبع آن منطقه گسترده-تری از سطح آزاد آب پایین‌دست با برخورد جت مواجه می‌شود. لازم به ذکر است با توجه به تخلیه آب توسط صفحات مشبک و کاهش دبی جریان روی صفحات مشبک، جریان ایجاد شده بر روی این صفحات از نوع جریان متغیر مکانی با کاهش دبی می-باشد که با توجه به فوق بحرانی بودن جریان، مقطع کنترل این نوع از جریان دقیقاً بر روی لبه شیب‌شکن و ورودی صفحه مشبک افقی می‌باشد. این در حالی است که با توجه به ریزش آب به داخل استخر، جریان به وجود آمده در استخر زیر جت آب ناشی از حضور صفحات مشبک از نوع متغیر مکانی با افزایش دبی می-باشد که با توجه به زیر بحرانی بودن جریان در حوضچه، مقطع کنترل در محل اتمام تلاطم آب با هوا می‌باشد.

در دبی‌های ثابت با بازشدگی‌های دریچه متفاوت در طول آزمایش‌ها مشاهده گردید که با کاهش میزان بازشدگی دریچه و به تبع آن با بالا رفتن سرعت جریان ورودی، طول خیس‌شده صفحه مشبک نیز افزایش می‌یابد. این عامل خود باعث افزایش تلاطم در پایین‌دست شیب‌شکن می‌شود. همچنین برای شرایط دبی و بازشدگی یکسان با صفحات مشبک متفاوت مشاهده گردید



(۱۷) می‌تواند تخمین دقیقی از طول نسبی خیس‌شده صفحات مشبک را ارائه دهد. با آنالیز حساسیت و بررسی تأثیر یک به یک پارامترهای موثر بر طول نسبی خیس‌شده صفحات مشبک مشخص گردید که با حذف پارامتر تخلخل صفحات مشبک، معیارهای ارزیابی دارای ضعیف‌ترین مقدار هستند. به عبارت دیگر تخلخل صفحات مشبک موثرترین پارامتر در طول نسبی خیس‌شده صفحات مشبک در شیب‌شکن‌های قائم مجهز به صفحات مشبک افقی می‌باشد.

#### طول تلاطم

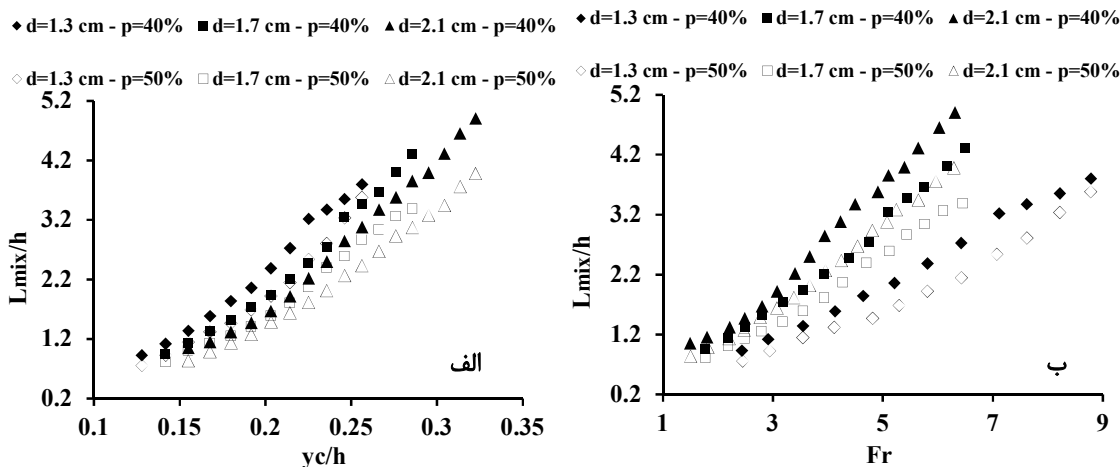
فاصله محل آخرین نقطه تلاطم جریان تا لبه شیب‌شکن که در آن عمق پایین‌دست نیز برداشت می‌شود، به عنوان طول تلاطم جریان در شیب‌شکن قائم مجهز به صفحه مشبک افقی شناخته می‌شود (Sharif and Kabiri-Samani, 2018). لازم به ذکر است این طول می‌تواند به عنوان طول حوضچه پایین‌دست شیب‌شکن نیز ارائه شود. شکل (۴) بیانگر تغییرات طول نسبی تلاطم جریان در حوضچه پایین‌دست در شیب‌شکن‌های قائم مجهز به صفحات مشبک افقی با جریان فوق بحرانی در بالادست، نسبت به عمق بحرانی نسبی و عدد فرود بالادست می‌باشد.

مطابق شکل (۳) مشاهده می‌گردد که با افزایش عدد فرود بالادست طول نسبی خیس‌شده صفحات مشبک افزایش می‌یابد. با مقایسه مقادیر بازشدگی‌ها که رابطه مستقیمی با عمق بحرانی دارد، مشاهده می‌گردد که با افزایش مقادیر بازشدگی در یک عدد فرود ثابت، طول نسبی خیس‌شده صفحات مشبک افزایش می‌یابد. همچنین نتایج نشان داد که برای شرایط یکسان با افزایش درصد تخلخل، طول خیس‌شده صفحات مشبک نیز افزایش می‌یابد. به طوریکه شیب‌شکن مجهز به صفحه مشبک با تخلخل ۴۰٪، به میزان ۲۶/۷ درصد طول نسبی خیس‌شده بیشتری نسبت به شیب‌شکن مجهز به صفحه مشبک با تخلخل ۵۰٪ دارد. با در نظر گرفتن داده‌های آزمایشگاهی مربوط به شیب‌شکن قائم مجهز به صفحات مشبک افقی با جریان فوق بحرانی در بالادست بهترین رابطه برای تخمین طول نسبی خیس‌شده صفحات مشبک طبق معیارهای ارزیابی به صورت رابطه (۱۷) ارائه گردید: (رابطه ۱۷)

$$R^2 = 0.97 \quad \text{and} \quad \text{NRMSE} = 0.072$$

$$\frac{L_{wet}}{h} = 1.616 \left( \frac{y_c}{y_0} \right)^{0.5386} (Fr)^{0.308} (p)^{-0.957}$$

همان‌طور که از نتایج معیارهای ارزیابی مشخص است رابطه



شکل ۴. تغییرات طول نسبی تلاطم جریان در شیب‌شکن‌های مجهز به صفحه مشبک افقی با جریان فوق بحرانی نسبت به الف) عمق بحرانی نسبی و ب) عدد فرود بالادست

مطابق شکل (۴-الف و ب) مشاهده می‌گردد که با افزایش عمق بحرانی نسبی، طول نسبی تلاطم در پایین‌دست شیب‌شکن افزایش می‌یابد. همچنین نتایج نشان داد که در شرایط یکسان، صفحات مشبک با تخلخل ۴۰ درصد طول نسبی تلاطم جریان در پایین‌دست شیب‌شکن را به میزان ۲۰ درصد نسبت به صفحات مشبک ۵۰ درصد افزایش می‌دهد. بهترین رابطه ارائه شده برای تخمین طول نسبی تلاطم در شیب‌شکن‌های قائم مجهز به صفحات مشبک افقی با جریان فوق بحرانی در بالادست طبق

مطابق شکل (۴-الف و ب) مشاهده می‌گردد که با افزایش عمق بحرانی نسبی و عدد فرود بالادست، طول نسبی تلاطم جریان در شیب‌شکن‌های مجهز به صفحه مشبک افقی با جریان فوق بحرانی افزایش می‌یابد. با توجه به شکل (۴-الف) مشاهده می‌گردد که با افزایش بازشدگی در یک عدد فرود ثابت، عدد فرود بالادست در یک عمق بحرانی ثابت، طول نسبی تلاطم در پایین‌دست شیب‌شکن کاهش می‌یابد. این درحالی است که با مقایسه نتایج مربوط به شکل (۴-ب) می‌توان دریافت که در یک

معیارهای ارزیابی، رابطه (۱۸) می باشد:  
(رابطه ۱۸)

$$\frac{L_{mix}}{h} = 5.43 \left( \frac{y_c}{h} \right)^{1.45} (Fr)^{0.41} (p)^{-0.86}$$

$$R^2 = 0.992 \quad \text{and} \quad \text{NRMSE} = 0.033$$

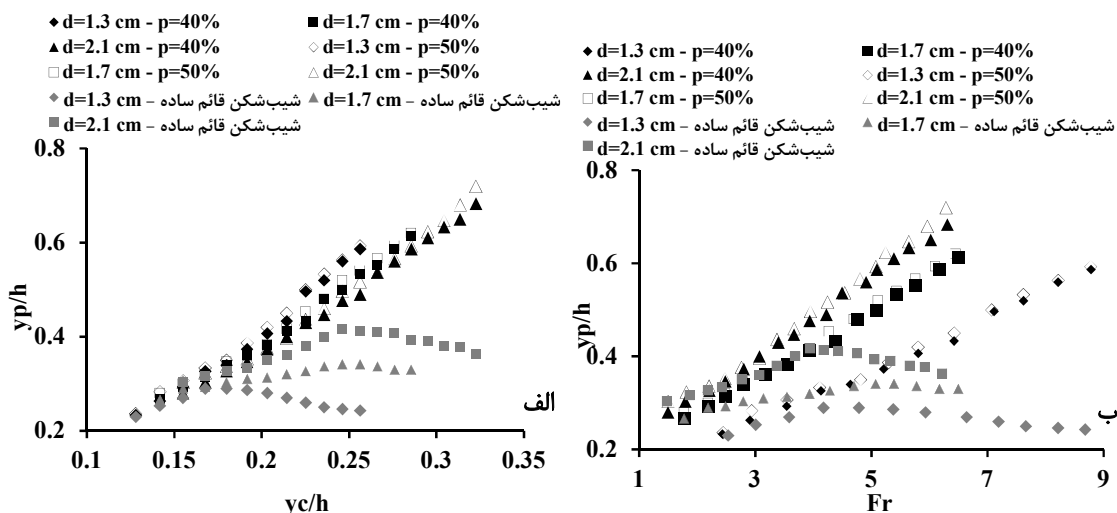
مطابق معیارهای ارزیابی مشاهده می گردد که رابطه (۱۸)

می تواند تخمین دقیقی از طول نسبی تلاطم (طول نسبی حوضچه آرامش) شیبشکن های قائم مجهز به صفحات مشبک افقی با جریان فوق بحرانی در بالادست را ارائه دهد. همچنین با بررسی تأثیر یک به یک و آنالیز حساسیت پارامترهای موثر بر طول نسبی تلاطم جریان، مشخص گردید که با حذف پارامتر عمق بحرانی نسبی، معیارهای ارزیابی دارای ضعیف ترین مقدار هستند. لازم به ذکر است طول نسبی حوضچه آرامش بعد از شیبشکن قائم ساده با جریان فوق بحرانی در بالادست توسط رابطه  $\frac{L_{st}}{h} = \frac{L_D + L_j}{h}$  قابل محاسبه می باشد (Rand, 1955). که در آن:  $L_{st}$  طول حوضچه آرامش،  $L_D$  طول کلی شیبشکن قائم برای جریان فوق بحرانی و  $L_j$  طول پرش هیدرولیکی می باشند. طول کلی شیبشکن برای جریان فوق بحرانی در بالادست بوسیله رابطه ارائه شده توسط (Tokyay and Yildiz, 2007) و طول پرش هیدرولیکی نیز بوسیله رابطه ارائه شده توسط (Bradley and Peterka, 1957) محاسبه می گردد. مقایسه دو رابطه نشان داد که شیبشکن قائم مجهز به صفحات مشبک افقی با جریان فوق بحرانی در بالادست نسبت به شیبشکن قائم ساده با جریان فوق

بحرانی در بالادست، طول نسبی حوضچه آرامش را به میزان ۶۹ درصد کاهش می دهد. این کاهش ناشی از حذف طول کلی شیبشکن و حذف پرش هیدرولیکی پایین دست می باشد.

#### عمق استخر

عبور جریان از روی لبه شیبشکن و برخورد جریان به کف استخر باعث تقسیم جریان به دو قسمت می گردد، قسمتی از جریان به سمت بالادست و قسمت دیگر جریان به سمت پایین دست حرکت می کند. دلیل اصلی عمق بیشتر جریان در داخل استخر نسبت به جریان پایین دست، وجود جریان برگشتی و برخورد به پایه شیبشکن و بالا رفتن جریان می باشد (Rajaratnam and Chamani, 1995; White 1943). میزان جریان برگشتی به داخل استخر خود به دو عامل دبی جریان ورودی و زاویه برخورد جت با کف استخر بستگی دارد. به طوریکه با افزایش دبی و زاویه برخورد جت عبوری، عمق استخر زیر جت در حال سقوط افزایش می یابد (Gill, 1979). بالا رفتن عمق استخر و مستغرق شدن سازه شیبشکن باعث کاهش کارایی خود سازه شیبشکن در استهلاک انرژی می گردد. از این رو بررسی عمق نسبی استخر در طراحی شیبشکن های قائم برای جلوگیری استغراق شیبشکن حائز اهمیت می باشد. شکل (۵) بیانگر تغییرات عمق نسبی استخر در شیبشکن های قائم مجهز به صفحات مشبک افقی با جریان فوق بحرانی در بالادست، در مقابل عمق بحرانی نسبی و عدد فرود



شکل ۵. تغییرات عمق نسبی استخر در شیبشکن های قائم مجهز به صفحه مشبک افقی با جریان فوق بحرانی نسبت به الف) عمق بحرانی نسبی و ب) عدد فرود بالادست

طور کلی صفحات مشبک باعث افزایش عمق نسبی استخر می گردند که با افزایش عمق بحرانی نسبی، میزان این افزایش بیشتر می گردد. همچنان که گفته شد دلیل این امر افزایش دبی جریان

شکل (۵-الف) نشان دهنده تأثیر وجود صفحات مشبک در شیبشکن های قائم با جریان فوق بحرانی در بالادست بر روی عمق نسبی استخر می باشد. طبق شکل مشاهده می گردد که به

بالادست طبق معیارهای ارزیابی، رابطه (۱۹) می‌باشد:  
(رابطه ۱۹)

$$\frac{y_p}{h} = 1.933 \left( \frac{y_c}{h} \right)^{1.034} (Fr)^{0.13} (p)^{0.12}$$

$$R^2 = 0.9802 \quad \text{and} \quad \text{NRMSE} = 0.033$$

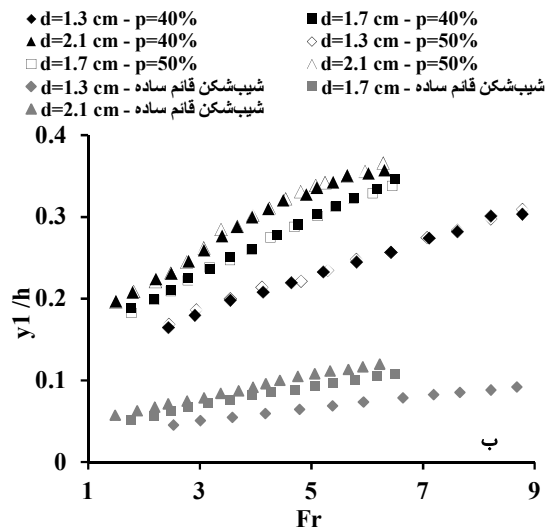
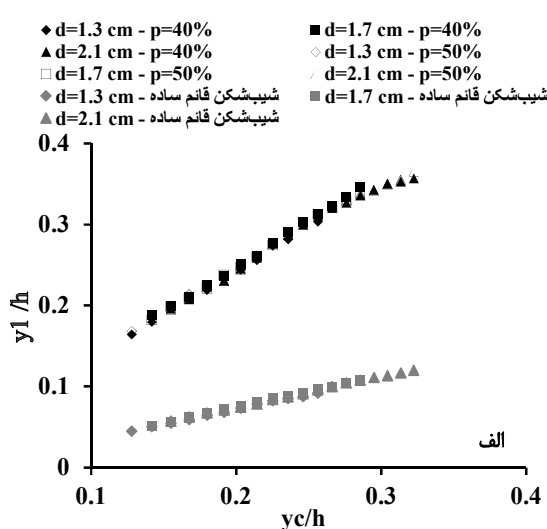
مقادیر معیارهای ارزیابی ضریب همبستگی و خطای جذر میانگین مربعات نرمال‌سازی شده، صحت و دقت ارائه شده را نشان می‌دهند. همچنین با بررسی تأثیر یک به یک پارامترهای موثر بر عمق نسبی استخر مشاهده گردید که با حذف پارامتر عمق بحرانی نسبی، معیارهای ارزیابی دارای ضعیف‌ترین مقدار و حذف تخلخل صفحات مشبک، مقادیر معیارهای ارزیابی تفاوت چندانی با معادله کلی نداشتند. به عبارت دیگر پارامتر عمق بحرانی نسبی موثرترین پارامتر در عمق نسبی استخر در شیب-شکن‌های قائم مجهز به صفحات مشبک افقی می‌باشد.

#### عمق نسبی پایین‌دست

شکل (۶) نشان‌دهنده تأثیر صفحات مشبک افقی بر روی عمق نسبی پایین‌دست نسبت به عمق بحرانی نسبی و عدد فرود بالادست است. با توجه به این نمودار مشاهده می‌گردد که با افزایش هر دو پارامتر عمق بحرانی نسبی و عدد فرود بالادست، پارامتر بدون بعد  $\frac{y_1}{h}$  برای شیب‌شکن قائم ساده و شیب‌شکن‌های مجهز به صفحات مشبک افقی افزایش می‌یابد.

و افزایش زاویه برخورد جریان به استخر تحت تأثیر صفحات مشبک می‌باشد. همچنین با مقایسه مقادیر بازشدگی‌ها که رابطه-ی عکسی با عدد فرود بالادست دارد، مشاهده می‌گردد که با افزایش مقدار عدد فرود بالادست در یک عمق بحرانی ثابت، عمق نسبی استخر افزایش می‌یابد.

شکل (۵-ب) نشان‌دهنده تأثیر وجود صفحات مشبک در شیب‌شکن‌های قائم با جریان فوق بحرانی در بالادست بر روی عمق نسبی استخر در مقابل عدد فرود می‌باشد. با توجه به رابطه‌ی مستقیم مقدار بازشدگی با عمق بحرانی نسبی، مشاهده می‌گردد که در اعداد فرود ثابت با افزایش عمق بحرانی نسبی، عمق نسبی استخر نیز افزایش می‌یابد. مقایسه نتایج تأثیر تخلخل صفحات مشبک نیز نشان می‌دهد که شیب‌شکن‌های مجهز به صفحات مشبک با تخلخل ۵۰٪ عمق نسبی استخر بیشتری نسبت به تخلخل ۴۰٪ دارند. با این وجود مقایسه عمق نسبی استخر در شیب‌شکن‌های قائم مجهز به صفحات مشبک با درصد تخلخل-های مختلف نشان می‌دهد که شیب‌شکن‌های قائم مجهز به صفحات مشبک با تخلخل ۵۰ درصد نسبت به صفحات مشبک با تخلخل ۴۰ درصد، دارای ۳ درصد عمق نسبی استخر بیشتری است. همچنین با مقایسه این دو شکل می‌توان ثابت کرد که تأثیر عمق بحرانی نسبی در افزایش عمق نسبی استخر بیشتر از عدد فرود بالادست می‌باشد. بهترین رابطه ارائه شده برای تخمین عمق نسبی استخر در حضور صفحات مشبک با جریان فوق بحرانی در



شکل ۶. تغییرات عمق نسبی پایین‌دست در شیب‌شکن‌های مجهز به صفحات مشبک افقی با جریان فوق بحرانی نسبت به الف) عمق بحرانی نسبی و ب) عدد فرود بالادست

بحرانی در بالادست باعث افزایش عمق نسبی پایین‌دست می‌گردد. به همین دلیل عدد فرود پایین‌دست که رابطه عکسی با

مطابق شکل (۶-الف و ب) مشاهده می‌گردد که استفاده از صفحات مشبک افقی در شیب‌شکن‌های قائم با جریان فوق

مقدار این پارامتر تأثیرگذار هستند. این در حالی است که برای عدد فرود ثابت با افزایش عمق بحرانی نسبی، مقدار عمق نسبی پایین دست افزایش می‌یابد. جدول (۳) متوسط کاهش عدد فرود پایین دست شیب‌شکن‌های قائم مجهز به صفحات مشبک افقی با جریان فوق بحرانی در بالادست نسبت به شیب‌شکن‌های قائم ساده می‌باشد.

عمق نسبی پایین دست دارد، به عنوان پارامتری شناخته شده در تخریب سازه‌های هیدرولیکی به صورت قابل توجهی کاهش می‌یابد. همچنین از مقایسه دو شکل استنباط می‌شود که عدد فرود بالادست شیب‌شکن و تخلخل صفحات مشبک تأثیر چندانی در میزان عمق نسبی پایین دست ندارند و فقط وجود جریان فوق بحرانی و وجود صفحه مشبک در خود شیب‌شکن‌های قائم در

جدول ۳. متوسط کاهش عدد فرود پایین دست برای شیب‌شکن قائم مجهز به صفحه مشبک افقی نسبت به شیب‌شکن قائم ساده

بازشدگی	درصد کاهش عدد فرود برای تخلخل ۴۰٪	درصد کاهش عدد فرود برای تخلخل ۵۰٪
۱/۳	۸۴/۴۷	۸۴/۷۲
۱/۷	۸۳/۳	۸۳/۹۶
۲/۱	۸۲/۸	۸۲/۹۴

بالادست عدد فرود پایین دست را از بازه ۴/۲ الی ۴/۸ به ۰/۶۲ الی ۰/۸۶ کاهش می‌دهد. به عبارت دیگر استفاده از این صفحات باعث ایجاد جریان زیر بحرانی در پایین دست سازه شیب‌شکن و حذف سازه حوضچه آرامش می‌گردد. جدول (۴) روابط غیر خطی حاصل در این تحقیق برای عمق نسبی پایین دست را نشان می‌دهد.

با توجه به جدول (۳) مشاهده می‌گردد که با کاهش میزان بازشدگی و افزایش درصد تخلخل صفحات مشبک، متوسط کاهش عدد فرود افزایش می‌یابد. با این وجود اختلاف مقادیر برای مدل‌های مختلف بسیار کم و قابل صرف نظر کردن است. همچنین نتایج نشان داد که استفاده از صفحات مشبک در بالادست شیب‌شکن قائم تحت شرایط جریان فوق بحرانی در

جدول ۴. روابط ارائه شده برای عمق نسبی پایین دست شیب‌شکن‌های قائم مجهز به صفحات مشبک با جریان فوق بحرانی در بالادست

رابطه	$R^2$	NRMSE	توضیحات
$\frac{y_1}{h} = 0.995 \left( \frac{y_c}{h} \right)^{0.865} (Fr)^{0.005} (p)^{0.0135}$	۰/۹۹۴۴	۰/۰۱۸۷	با در نظر گرفتن تمامی پارامترهای مورد بررسی
$\frac{y_1}{h} = 1.012 \left( \frac{y_c}{h} \right)^{0.872} (p)^{0.014}$	۰/۹۹۴۵	۰/۰۱۸۵	بدون در نظر گرفتن عدد فرود
$\frac{y_1}{h} = 1.002 \left( \frac{y_c}{h} \right)^{0.873}$	۰/۹۹۴۶	۰/۰۲۷۶	بدون در نظر گرفتن عدد فرود و تخلخل صفحه مشبک

شیب‌شکن‌های قائم ساده و شیب‌شکن‌های قائم مجهز به صفحات مشبک افقی با جریان فوق بحرانی در بالادست را نشان داده و بیان می‌دارد که استفاده از صفحات مشبک افقی در این سازه‌ها استهلاک انرژی نسبی را نسبت به شیب‌شکن‌های قائم ساده افزایش می‌دهد. همچنین مقایسه تغییرات استهلاک انرژی نسبی شیب‌شکن قائم ساده با شیب‌شکن قائم مجهز به صفحات مشبک نشان‌دهنده رفتار مشابه برای تغییرات استهلاک انرژی نسبی در هر دو شیب‌شکن می‌باشد.

مطابق شکل (۷-الف) مشاهده می‌گردد که با کاهش میزان بازشدگی و به تبع آن افزایش عدد فرود جریان بالادست در یک

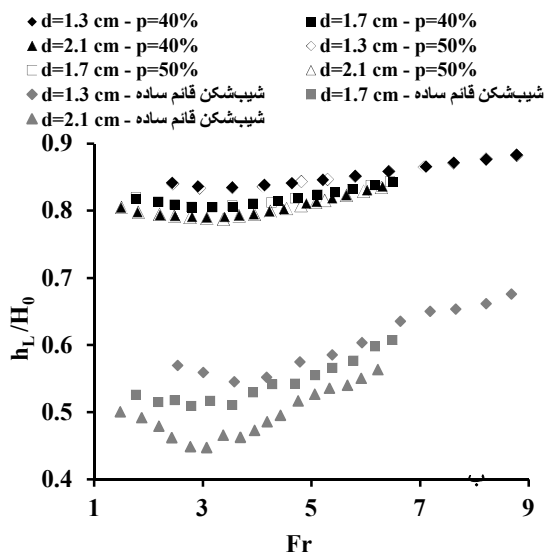
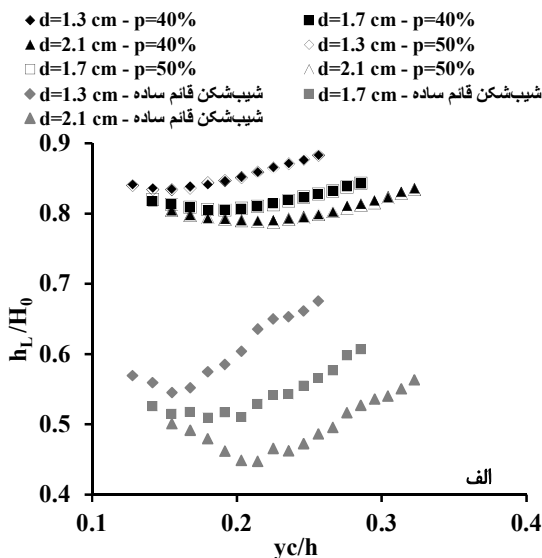
با توجه به روابط ارائه شده در جدول (۴) مشاهده می‌گردد که تمامی روابط دارای معیارهای ارزیابی قابل قبولی هستند. همچنین روابط ارائه شده نیز گویای تأثیر بسیار کم عدد فرود بالادست و تخلخل صفحات مشبک هستند. با بررسی تأثیر یک به یک و آنالیز حساسیت پارامترهای موثر بر عمق نسبی پایین دست، مشخص گردید که عمق بحرانی نسبی موثرترین پارامتر در عمق نسبی پایین دست شیب‌شکن‌های قائم مجهز به صفحات مشبک افقی می‌باشد.

#### استهلاک انرژی

شکل (۷) مقایسه استهلاک انرژی نسبی جریان در

ناچیز این پارامتر بر روی استهلاک انرژی نسبی می‌باشد. همچنین با مقایسه این دو شکل می‌توان ثابت کرد که تأثیر عدد فرود بالادست در استهلاک انرژی نسبی بیشتر از عمق بحرانی نسبی می‌باشد. جدول (۵) متوسط راندمان افزایش استهلاک انرژی شیب‌شکن‌های قائم مجهز به صفحات مشبک افقی با جریان فوق بحرانی در بالادست نسبت به شیب‌شکن‌های قائم ساده می‌باشد.

عمق بحران نسبی ثابت، میزان استهلاک انرژی نسبی در هر دو شیب‌شکن قائم ساده و مجهز به صفحه مشبک افقی افزایش می‌یابد. این در حالی است که مطابق شکل (۷-ب) مشاهده می‌گردد که در اعداد فرود ثابت با افزایش میزان بازشدگی و افزایش عمق بحرانی نسبی، در هر دو شیب‌شکن قائم ساده و مجهز به صفحه مشبک افقی میزان استهلاک انرژی نسبی کاهش می‌یابد. مقایسه تخلخل صفحات مشبک در شکل (۷-الف و ب) نشان‌دهنده تأثیر



شکل ۷. تغییرات استهلاک انرژی نسبی در شیب‌شکن‌های قائم مجهز به صفحه مشبک افقی با جریان فوق بحرانی نسبت به الف) عمق بحرانی نسبی و ب) عدد فرود بالادست

جدول ۵. راندمان افزایش استهلاک انرژی برای شیب‌شکن قائم مجهز به صفحه مشبک افقی نسبت به شیب‌شکن قائم ساده

بازشدگی	درصد راندمان افزایش استهلاک انرژی برای	
	تخلخل ۴۰٪	تخلخل ۵۰٪
۱/۳	۴۹/۹۵	۵۰/۸۲
۱/۷	۵۵/۷۷	۵۵/۸۳
۲/۱	۶۰/۷۱	۶۰/۵۶

برای تخلخل‌های مختلف صفحات مشبک بسیار کم و قابل صرف- نظر کردن است. همچنین جدول (۶) روابط غیرخطی حاصل در این تحقیق برای استهلاک انرژی نسبی را نشان می‌دهد.

با توجه به جدول (۵) مشاهده می‌گردد که با کاهش میزان بازشدگی و افزایش درصد تخلخل صفحات مشبک، راندمان استهلاک انرژی افزایش می‌یابد. با این وجود اختلاف مقادیر نتایج

جدول ۶. روابط ارائه شده برای استهلاک انرژی نسبی شیب‌شکن‌های قائم مجهز به صفحات مشبک با جریان فوق بحرانی در بالادست

توضیحات	NRMSE	$R^2$	رابطه
با در نظر گرفتن تمامی پارامترهای مورد بررسی	۰/۰۱۵۲	۹۴/۲	$\frac{h_L}{H_0} = 0.6202 \left(\frac{yc}{h}\right)^{-0.1078} (Fr)^{0.0886} (p)^{0.007}$
بدون در نظر گرفتن تخلخل صفحه مشبک	۰/۰۱۵	۹۴/۸۲	$\frac{h_L}{H_0} = 0.6167 \left(\frac{yc}{h}\right)^{-0.107} (Fr)^{0.088}$

با توجه به روابط ارائه شده در جدول (۶) مشاهده می‌گردد که هر دو رابطه ارائه شده دارای معیارهای ارزیابی قابل قبولی هستند. همچنین با بررسی تأثیر یک به یک پارامترهای موثر بر استهلاک انرژی نسبی مشخص گردید که با حذف پارامتر عدد فرود بالادست، معیارهای ارزیابی دارای ضعیف‌ترین مقدار و با حذف تخلخل صفحات مشبک مقادیر معیارهای ارزیابی تفاوت چندانی با معادله کلی نداشتند. به عبارت دیگر پارامتر عدد فرود بالادست موثرترین پارامتر در استهلاک انرژی جریان در شیب‌شکن‌های قائم مجهز به صفحات مشبک افقی می‌باشد.

### نتیجه‌گیری

در این تحقیق به بررسی آزمایشگاهی تأثیر استفاده از صفحات مشبک افقی در استهلاک بیشتر انرژی جریان بر روی شیب‌شکن‌های قائم تحت شرایط جریان فوق بحرانی در بالادست پرداخته شده است. آزمایش‌ها برای یک شیب‌شکن قائم ساده و شیب‌شکن مجهز به صفحات مشبک افقی با دو نسبت تخلخل و سه نسبت بازشدگی درجه به منظور ایجاد جریان فوق بحرانی در بالادست برای تمامی آزمایش‌ها تنظیم شد و نتایج زیر حاصل گشت:

۱- استفاده از صفحات مشبک افقی باعث افزایش هر سه پارامتر عمق نسبی پایین‌دست، عمق نسبی استخر و استهلاک انرژی نسبی نسبت به شیب‌شکن قائم ساده گردید.

۲- افزایش عمق بحرانی نسبی در یک عدد فرود و تخلخل صفحات مشبک ثابت، پارامترهای طول نسبی خیس شده، طول نسبی تلاطم، عمق نسبی استخر و عمق نسبی پایین‌دست را افزایش و استهلاک انرژی نسبی را کاهش می‌دهد.

۳- افزایش عدد فرود در یک عمق بحرانی نسبی و تخلخل صفحات مشبک ثابت، پارامترهای طول نسبی خیس شده، طول نسبی تلاطم، عمق نسبی استخر و استهلاک انرژی نسبی را افزایش و بر روی پارامتر عمق نسبی پایین‌دست بی تأثیر است.

۴- نتایج مربوط به صفحات مشبک با تخلخل‌های متفاوت نشان داد که صفحه مشبک با تخلخل ۴۰٪ طول خیس شده و طول تلاطم بیشتر و عمق استخر کمتری نسبت به تخلخل ۵۰٪ دارد. همچنین مشخص گردید که تخلخل صفحات مشبک بر روی عمق پایین‌دست و استهلاک انرژی جریان تأثیر چندانی ندارد و تنها پارامتر مهم، وجود خود صفحات مشبک می‌باشد.

۵- روند تغییرات رفتار استهلاک انرژی برای شیب‌شکن قائم مجهز به صفحات مشبک افقی با جریان فوق بحرانی در بالادست مشابه رفتار استهلاک انرژی در شیب‌شکن قائم ساده با

جریان فوق بحرانی در بالادست می‌باشد.

۶- صفحات مشبک افقی در شیب‌شکن‌های قائم تحت شرایط جریان فوق بحرانی با حذف پارامترهای طول کلی شیب‌شکن و طول پرش هیدرولیکی باعث کاهش طول حوضچه آرامش می‌گردد.

۷- استفاده از صفحات مشبک افقی در شیب‌شکن‌های قائم تحت شرایط جریان فوق بحرانی در بالادست با ایجاد جریان زیر بحرانی در پایین‌دست سازه شیب‌شکن باعث حذف سازه حوضچه آرامش می‌گردد.

### نمادها

$B$	عرض کانال (متر)
$d$	بازشدگی درجه (متر)
$H_0$	هد کل در مقطع بالادست شیب‌شکن (متر)
$H_1$	هد کل بعد از محل برخورد آخرین جت به استخر (متر)
$f$	تابع (بی بعد)
$Fr_0$	عدد فرود بالادست (بی بعد)
$Fr_1$	عدد فرود پایین‌دست (بی بعد)
$g$	شتاب گرانشی زمین (متر بر مجذور ثانیه)
$h$	ارتفاع شیب‌شکن (متر)
$L_D$	طول کلی شیب‌شکن (متر)
$L_j$	طول پرش هیدرولیکی (متر)
$L_{mix}$	طول تلاطم جریان پایین‌دست (متر)
$L_{st}$	طول حوضچه آرامش (متر)
$L_{wet}$	طول خیس شده (متر)
$p$	تخلخل صفحات مشبک (بی بعد)
$Q$	دبی کل (متر مکعب بر ثانیه)
$q$	دبی در واحد عرض کانال (متر مربع بر ثانیه)
$Re$	عدد رینولدز (بی بعد)
$t$	ضخامت صفحه مشبک (متر)
$y_0$	عمق بالادست شیب‌شکن (متر)
$y_1$	عمق پایین‌دست شیب‌شکن (متر)
$y_c$	عمق بحرانی (متر)
$y_p$	عمق استخر زیر جت (متر)
$h_L$	استهلاک انرژی (متر)
$\eta$	راندمان استهلاک انرژی (بی بعد)
$\rho$	جرم مخصوص آب (کیلوگرم بر متر مکعب)
$\mu$	لزوجت دینامیکی (نیوتن بر متر مربع در ثانیه)

## 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*).
- Bozkuş, Z., Balkış, G., & Ger, M. (2005). Effect of inclination of screens on energy dissipation downstream of small hydraulic structures. *In Proceedings of the 17th Canadian Hydrotechnical Conference, Edmonton, Alberta, Canada* (pp. 881-890).
- Bradley, J. N., & Peterka, A. J. (1957). The hydraulic design of stilling basins: hydraulic jumps on a horizontal apron (basin i). *Journal of the Hydraulics Division*, 83(5), 1-24.
- Çakır, P. (2003). Experimental investigation of energy dissipation through screens (Doctoral dissertation, M. Sc. thesis, Department of Civil Engineering, Middle East Technical University, Ankara, Turkey).
- Chamani, M., & Beirami, M. K. (2002). Flow characteristics at drops. *Journal of hydraulic engineering*, 128(8), 788-791.
- Chamani, M. R., Rajaratnam, N., & Beirami, M. K. (2008). Turbulent jet energy dissipation at vertical drops. *Journal of hydraulic engineering*, 134(10), 1532-1535.
- Daneshfaraz, R., Sadeghfam, S., & Hasannia, V. (2019a). Experimental investigating effect of Froude number on hydraulic parameters of vertical drop with supercritical flow upstream. *AUT Journal of Civil Engineering*. Doi: 10.22060/CEEJ.2019.15655.5985 (in Faersi)
- Daneshfaraz, R., Chabokpour, J., & Nezafat, H. (2019b). Experimental Investigation of the Scouring due to Hydraulic Jump in Screens. *Iranian Journal of Soil and Water Research*. 50(5), 1039-1051. (in Faersi)
- Daneshfaraz, R., MajediAsl, M., Mirzaee & Nezafat, H. (2019c). The S-jump's Characteristics in the Rough Sudden Expanding Stilling Basin. *Iranian AUT Journal of Civil Engineering*. Doi: 10.22060/AJCE.2019.16427.5586 (in Faersi)
- Daneshfaraz, R., Sadeghfam, S., & Mirzaeereza, 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 Faersi)
- Daneshfaraz, R., Sadeghfam, S., & Tahni, A. (2019e). Experimental Investigation of Screen as Energy Dissipators in the Movable-Bed Channel. *Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Civil Engineering*. Doi: 10.1007/s40996-019-00306-7.
- Daneshfaraz, R., Sadeghfam, S., & Ghahramanzadeh, A. (2017). Three-dimensional numerical investigation of flow through screens as energy dissipators. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 44(10), 850-859.
- Daneshfaraz, R., Sadeghfam, S., & Rezazadeh-Joudi, A. (2016). Laboratory Investigation on the Effect of Screen's Location on the Flow Energy Dissipation. *Irrigation and drainage structures engineering research*, 17(68), 47-62. (in Faersi)
- 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.
- Hager, W. H., & Bremen, R. (1989). Classical hydraulic jump: sequent depths. *Journal of Hydraulic Research*, 27(5), 565-585.
- Hasannia, V., Daneshfaraz, R., & Sadeghfam, S. (2019). Experimental investigating on hydraulic parameters of vertical drop equipped with combined screens. *AUT Journal of Civil Engineering*. Doi: 10.22060/CEEJ.2019.16431.6223 (in Faersi)
- 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.
- Moore, W. L. (1943). Energy loss at the base of a free overfall. *Transactions of the American Society of Civil Engineers*, 108(1), 1343-1360.
- Nayebzadeh, B., Lotfollahi-yaghin, M. A. & 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*. Doi: 10.22060/CEEJ.2019.16493.6265 (in Faersi)
- Norouzi Sarkarabad, R., Daneshfaraz, R., & Bazyar, 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). *AUT Journal of Civil Engineering*. Doi: 10.22060/CEEJ.2019.16694.6305 (in Faersi)
- Rajaratnam, N. (1976). Turbulent jets (Vol. 5). *Elsevier*.
- 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 dissipaters in submerged hydraulic jump. *Turkish Journal of Engineering and Environmental Sciences*, 38(2), 126-138.
- Sadeghfam, S., Daneshfaraz, R., & 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.
- Tokyay, N. D., & Yildiz, D. (2007). Characteristics of free overfall for supercritical flows. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 34(2), 162-169.
- White, M.P. (1943). Discussion of Moore (1943), *ASCE*, 108, 1361-1364.