

Experimental Investigation of the Performance of Horizontal Screen on Energy Dissipation in Inclined Drop

RASOUL DANESHFARAZ^{1*}, MAHDI MAJEDI ASL¹, ALI BAZYAR¹

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

(Received: Sep. 15, 2019- Revised: Nov. 6, 2019- Accepted: Dec. 2, 2019)

ABSTRACT

In the present study, horizontal screens at brink of inclined drop were used as an energy dissipater structure to increase the downstream energy dissipation. The experiments were carried out in three angles of drop, two drop heights, and two porosity ratios of horizontal screen. In total, 108 experiments were performed in discharge range of 200–700 L/min. The results showed that the energy dissipation increases with increasing relative wetting length of the screen, such a way that the highest energy dissipation occurs in the horizontal screen with a porosity of 40%. Inclined drop equipped with horizontal screen reduced downstream Froude numbers in three angles of drop and two porosity ratios from a range of 4.49 - 8.35 to a range of 1.48 - 5.78. Also, increasing the angle of drop increases the relative depth of downstream, so that the drop angle of 45 ° and screen porosity of 40% had the best performance in increasing the relative depth of downstream. Increasing the drop angle and screen porosity also reduces the average efficiency of energy dissipation.

Keyword: Energy dissipation, Horizontal screen, Inclined drop, Relative wetted length

بررسی آزمایشگاهی عملکرد صفحات مشبک افقی در استهلاک انرژی شیب‌شکن‌های مایل

رسول دانشفراز^{*}، مهدی ماجدی اصل^۱، علی بازاریار^۱

۱. گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه مراغه، مراغه، ایران
(تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۶/۲۴ - تاریخ بازنگری: ۱۳۹۸/۸/۱۵ - تاریخ تصویب: ۱۳۹۸/۹/۱۱)

چکیده

در تحقیق حاضر، از صفحات مشبک افقی در لبه شیب‌شکن مایل به عنوان سازه مستهلک‌کننده انرژی جهت افزایش میزان استهلاک انرژی در پایین‌دست استفاده شد. آزمایش‌های مربوطه در سه زاویه، دو ارتفاع شیب‌شکن و دو نسبت تخلخل صفحات مشبک انجام گرفت. در مجموع، ۱۰۸ آزمایش متفاوت در محدوده دبی ۲۰۰-۷۰۰ لیتر در دقیقه انجام شد. نتایج نشان داد استهلاک انرژی با افزایش طول نسبی خیس شده صفحات مشبک افزایش می‌یابد، به طوری که بیشترین استهلاک انرژی در صفحه مشبک افقی با تخلخل ۴۰ درصد رخ داد. مجهز نمودن شیب‌شکن مایل به صفحات مشبک افقی، اعداد فرود پایین‌دست را نیز در سه زاویه و دو نسبت تخلخل، از بازه ۴/۴۹ الی ۸/۳۵ به بازه ۱/۴۸ الی ۵/۷۸ کاهش داد. همچنین افزایش زاویه شیب‌شکن مایل سبب افزایش عمق نسبی پایین‌دست شد، به گونه‌ای که شیب‌شکن مایل مجهز به صفحه مشبک افقی با زاویه ۴۵ درجه و تخلخل ۴۰ درصدی صفحات، بهترین عملکرد در افزایش عمق نسبی پایین‌دست را به خود اختصاص دادند. افزایش زاویه و تخلخل صفحات مشبک نیز باعث کاهش متوسط راندمان استهلاک انرژی می‌شود.

واژه‌های کلیدی: استهلاک انرژی، صفحات مشبک افقی، شیب‌شکن مایل، طول نسبی خیس شده.

مقدمه

کاهش انرژی جریان در پایین‌دست سرریزها، دریچه‌ها و انواع شیب‌شکن‌ها برای پیشگیری از فرسایش و ایجاد گودال در کانال پایین‌دست از اهمیت به‌سزایی برخوردار است. شیب‌شکن‌های مایل در کانال‌های آبیاری، زهکشی و مناطق کوهستانی معمولاً برای تبدیل شیب تند زمین به شیب طراحی مورد استفاده قرار می‌گیرند. این سازه‌ها جریان زیر بحرانی در بالادست را به جریان فوق بحرانی در پایین‌دست تبدیل کرده و با افزایش استهلاک انرژی کل، سبب افزایش انرژی جنبشی نیز می‌شوند. از این رو، معمولاً برای استهلاک انرژی در پایین‌دست این نوع سازه‌ها از حوضچه‌های آرامش با امکان ایجاد پرش هیدرولیکی در آن استفاده می‌گردد.

تا کنون مطالعات محدود و اندکی بر روی شیب‌شکن‌های مایل صورت گرفته که عمده دلیل آن می‌تواند استهلاک انرژی کمتر این سازه نسبت به انواع سازه‌های شیب‌شکن باشد (Moradi Sabz Koochi et al. (2011)). استهلاک انرژی شیب‌شکن‌های مایل در رودخانه کلمبیا توسط (Wagner, 1956) مورد بررسی قرار گرفته است. Peterk (1958) نیز با انجام آزمایش‌هایی بر روی مدل یک شیب‌شکن مانع‌دار و با ایجاد تغییرات مختلف بر روی پارامترهای دبی، اندازه، ارتفاع و فواصل موانع از یکدیگر،

علاوه بر به‌دست آوردن میزان استهلاک انرژی در هر آزمایش و پیشنهاد ضوابط طراحی، سرعت جریان را در هر حالت توسط ادوات آزمایشگاهی محاسبه کرد. (Sholichin and Akib (2010)). به بررسی عملکرد عدد شیب‌شکن برای تخمین طول پرش هیدرولیکی در شیب‌شکن‌های قائم و مایل پرداختند. نتایج نشان داد که معادله عدد شیب‌شکن، می‌تواند طول شیب‌شکن و طول پرش را برای سازه‌های شیب‌شکن قائم پیش‌بینی کند. با این وجود معادله نمی‌تواند طول پرش هیدرولیکی را برای سازه‌های شیب‌شکن مایل تخمین بزند. بنابراین توسعه معادله‌ای برای برآورد پرش هیدرولیکی در سازه‌های شیب‌شکن مایل مورد نیاز بود که با تجزیه و تحلیل روابط غیر مستقیم بر اساس معادلات ریاضی به‌دست آوردند. صفحات مشبک نوعی از سازه‌های الحاقی مستهلک‌کننده انرژی شناخته شده در پایین‌دست سازه‌های هیدرولیکی کوچک بوده که از سال ۲۰۰۰ میلادی مورد توجه محققین قرار گرفته است. این سازه در تحقیقات گذشته اکثراً به‌صورت قائم در مقابل جریان فوق بحرانی قرار گرفته و با تشکیل و تثبیت پرش هیدرولیکی موجب استهلاک انرژی چشم‌گیری می‌گردد (Daneshfaraz et al. 2019a, b).

تأثیر استفاده از صفحات مشبک با آرایش و نسبت تخلخل متفاوت در پایین‌دست سازه‌های هیدرولیکی کوچک برای اولین

شیب‌شکن‌های قائم به صفحات مشبک افقی با دو نسبت تخلخل و سه نسبت بازشدگی دریچه تحت شرایط جریان فوق بحرانی، استهلاک انرژی جریان را مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد که استفاده از این صفحات سبب افزایش عمق نسبی استخر، عمق نسبی پایین‌دست و استهلاک انرژی جریان می‌شود.

(Nayebzadeh et al., 2020) به بررسی عددی مشخصات هیدرولیکی شیب‌شکن‌های قائم با صفحات مشبک و واگرایی تدریجی دیواره در پایین‌دست آن با استفاده از نرم‌افزار FLOW-3D پرداخته و ثابت شد سهم مشارکتی اسکری‌ن در استهلاک انرژی بیشتر از واگرایی تدریجی می‌باشد.

با بررسی تحقیقات پیشین در خصوص شیب‌شکن‌های مایل و ضرورت کاربرد این نوع سازه‌ها در کانال‌های آبیاری و زهکشی برای تبدیل شیب تند زمین به شیب طراحی، یکی از معایب این سازه‌ها افزایش انرژی جنبشی در پایین‌دست بوده و نسبت به سایر انواع شیب‌شکن‌ها دارای استهلاک انرژی به مراتب کمتری می‌باشد. از طرفی با توجه به این که به کارگیری صفحات مشبک در شیب‌شکن‌ها بصورت افقی نیز با مکانیزم تداخل آب با هوا و برخورد جت ریزشی به کف کانال می‌تواند باعث ایجاد تلاطم و افزایش استهلاک انرژی گردد، لذا تحقیق حاضر برای اولین بار جهت بررسی استهلاک انرژی در پایین‌دست شیب‌شکن‌های مایل با بکارگیری صفحات مشبک به صورت افقی در لبه انجام شد.

مواد و روش‌ها

در تحقیق حاضر برای انجام آزمایش‌ها از یک فلوم آزمایشگاهی با مقطع مستطیلی افقی به طول ۵، عرض ۰/۳ و ارتفاع ۰/۴۵ متر با دیواره و کف از جنس پلکسی گلس شفاف استفاده شد. برای ساخت مدل شیب‌شکن مایل از جعبه‌هایی به جنس شیشه با ضخامت ۰/۸ سانتی‌متر استفاده گردید. این جعبه هم‌عرض کانال، طولی برابر ۱/۲۰ متر و دو ارتفاع ۱۵ و ۲۵ سانتی‌متر می‌باشد. سه زاویه ۲۶/۵۶، ۳۳/۷ و ۴۵ درجه نیز برای ایجاد سطح شیب‌دار شیب‌شکن مایل انتخاب شدند. همچنین از صفحات مشبک به جنس پلی اتیلن با طول ۷۰ سانتی‌متر، ضخامت یک سانتی‌متر و هم‌عرض کانال به کار گرفته شد. این صفحات دارای روزه‌های دایره‌ای شکل، به قطر یک سانتی‌متر با آرایش زیگزاگی و نسبت‌های تخلخل ۴۰ و ۵۰ درصدی می‌باشد. شکل (۱) شماتیکی از مدل آزمایشگاهی تحقیق حاضر را نشان می‌دهد. با در نظر گرفتن جریان در بالادست شیب‌شکن به صورت زیربحرانی، در هر آزمایش با روشن نمودن پمپ، دبی مربوطه با استفاده از روماترهای نصب شده بر روی فلوم با خطای نسبی ۲ درصد تنظیم گردید. بعد از پایداری شرایط جریان عمق بالادست

بار به عنوان مستهلک‌کننده انرژی توسط (Rajaratnam and Hurtig, 2000) مورد بررسی قرار گرفت. نتایج آن‌ها نشان داد که نسبت تخلخل ۴۰ درصد صفحات مشبک دارای استهلاک انرژی بیشتری نسبت به تخلخل ۵۰ درصدی می‌باشد. (Cakir, 2003) با استفاده از صفحات مشبک در پایین‌دست سازه‌های مولد جریان فوق بحرانی به بررسی ضخامت و فاصله این صفحات در استهلاک انرژی جریان پرداخت. این محقق نشان داد که ضخامت صفحات مشبک تاثیر چندانی در استهلاک انرژی جریان ندارد. همچنین فاصله قرارگیری صفحات مشبک از دریچه را معیاری برای انتخاب بهترین تخلخل صفحات مشبک انتخاب نمود.

Balkis (2004) به بررسی تاثیر صفحات مشبک با سه زاویه ۶۰، ۷۵ و ۹۰ درجه نسبت به افق، در استهلاک انرژی جریان پرداخت. نتایج این تحقیق نشان داد که زاویه قرارگیری صفحات مشبک تاثیر قابل ملاحظه‌ای در استهلاک انرژی جریان ندارد. تاثیر آرایش مثلثی با زاویه داخلی ۶۰ درجه صفحات مشبک در استهلاک انرژی جریان نیز توسط (Gungor, 2005) مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج این تحقیق حاکی از تاثیر ناچیز آرایش مثلثی صفحات مشبک در استهلاک انرژی جریان نسبت به صفحات مشبک قائم تحقیقات پیشین می‌باشد.

شکل روزه‌های صفحات مشبک نیز توسط (Mahmoud et al., 2013) مورد بررسی قرار گرفت و نتایج نشان داد که روزه‌های مربعی شکل نسبت به روزه‌های دایره‌ای استهلاک انرژی بیشتری دارند. (Sadeghfam et al., 2015) با بکارگیری صفحات مشبک با آرایش منفرد و دوپل در پایین‌دست دریچه به بررسی استهلاک انرژی جریان پرداختند. نتایج آنان نشان داد که صفحات مشبک منفرد نسبت به دوپل استهلاک انرژی کمتری دارد. (Daneshfaraz et al., 2017a) به بررسی استهلاک انرژی جریان با محل قرارگیری و نسبت تخلخل متفاوت صفحات مشبک قائم پرداخته و نشان دادند که صفحات مشبک با تخلخل ۵۰ درصد در فاصله ۱/۲۵ متری بهترین عملکرد را به خود اختصاص داده است. (Daneshfaraz et al., 2017b) با بررسی صفحات مشبک قائم به همراه بلوک در پایین دست دریچه نشان دادند که استهلاک انرژی جریان در مدل با بلوک بیشتر از مدل بدون بلوک می‌باشد.

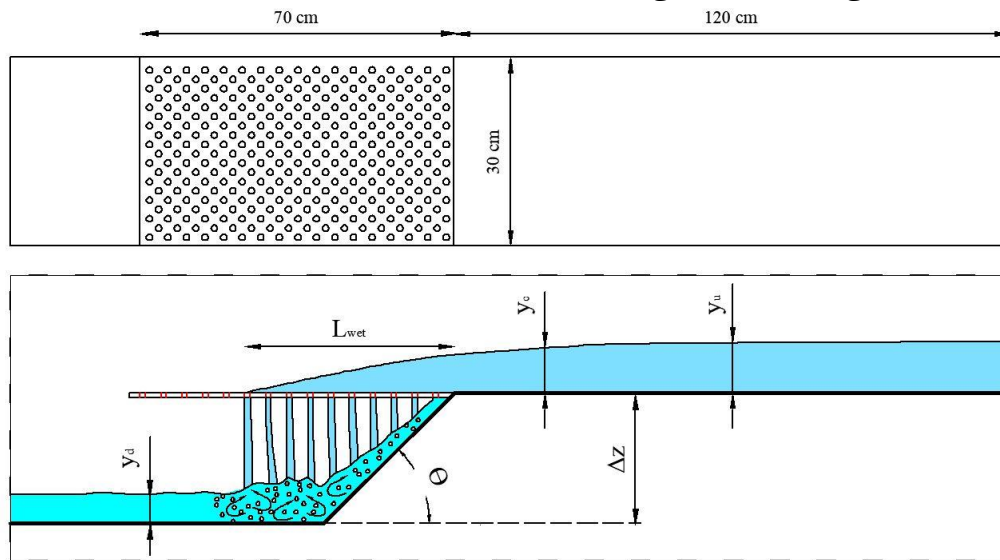
همچنین استفاده از صفحات شیاری و صفحات مشبک افقی در مسیر جریان در سال‌های اخیر توسط محققان مختلف مورد بررسی قرار گرفته است. (Kabiri-Samani et al., 2017) نشان دادند که این مستهلک‌کننده‌ها شیاری منجر به افزایش استهلاک انرژی نسبت به شیب‌شکن قائم ساده و کاهش طول حوضچه آرامش شده است. (Daneshfaraz et al., 2019c) با مجهز نمودن

حاضر را نشان می‌دهد.

تجهیزات و مدل آزمایشگاهی

در مجموع ۱۰۸ آزمایش با محدوده دبی ۲۰۰-۷۰۰ لیتر بر دقیقه به منظور بررسی طول نسبی خیس شده، عمق نسبی پایین‌دست، عدد فرود پایین‌دست و استهلاک انرژی نسبی برای شیب‌شکن-های مایل ساده و مجهز به صفحات مشبک افقی صورت گرفت. در جدول (۱) محدوده متغیرهای اندازه‌گیری شده برای مدل‌های شیب‌شکن مایل ساده و شیب‌شکن مایل مجهز به صفحات مشبک افقی ارائه گردید.

شیب‌شکن، طول خیس شده صفحات مشبک و همچنین عمق پایین‌دست شیب‌شکن مایل اندازه‌گیری شد. عمق بالادست با استفاده از یک عمق‌سنج نقطه‌ای با دقت ± 1 میلی‌متر در ۵ نقطه از مقطع عرضی اندازه‌گیری شده و مقدار متوسط آن‌ها به عنوان عمق نهایی در نظر گرفته شد. طول خیس شده نیز با استفاده از یک خط‌کش با دقت یک میلی‌متر اندازه‌گیری گردید. اندازه‌گیری عمق پایین‌دست نیز به دلیل تلاطم و تداخل هوای ناشی از برخورد جت به کف در هفت نقطه از عرض کانال و در فاصله‌های ۱۰ الی ۲۰ سانتی‌متری پایین‌دست محل برخورد جت ریزشی به کف صورت پذیرفت. شکل (۲) نمایی از مدل آزمایشگاهی تحقیق



شکل ۱. شماتیک نمای جانبی و بالا از مدل آزمایشگاهی



شکل ۲. نماهای مختلف از مدل آزمایشگاهی

جدول ۱. محدوده متغیرهای اندازه‌گیری شده مدل شیب‌شکن‌های مایل ساده و مجهز به صفحات مشبک افقی

متغیرهای اندازه‌گیری شده	محدوده متغیرها	
	شیب‌شکن مایل ساده	شیب‌شکن مایل مجهز به صفحات مشبک افقی
Q (lit / min)	۲۰۰-۷۰۰	۲۰۰-۷۰۰
y_u (cm)	۲/۹۷-۶/۲	۲/۹۷-۶/۲
y_d (cm)	۰/۵۶-۱/۹۷	۰/۷۲-۴/۱۲
L_{wet} (cm)	-	۱۰/۱۶-۳۸/۰۴

محاسبات انرژی

برای محاسبه انرژی در بالادست و پایین دست شیب شکن مایل به ترتیب از روابط (۱) و (۲) استفاده گردید.

$$E_u = 1.5y_c + \Delta Z \quad (\text{رابطه ۱})$$

$$E_d = y_d + \frac{q^2}{2gy_d^2} \quad (\text{رابطه ۲})$$

که در آن: E_u انرژی در بالادست شیب شکن، y_c عمق بحرانی، ΔZ ارتفاع شیب شکن، E_d انرژی در پایین دست شیب شکن، y_d عمق پایین دست شیب شکن، g شتاب گرانش زمین و q دبی واحد عرض می باشد.

استهلاک انرژی نسبی از رابطه (۳) و راندمان استهلاک انرژی (λ) از رابطه (۴) محاسبه شد.

$$\frac{\Delta E}{E_u} = \frac{E_u - E_d}{E_u} (100) \quad (\text{رابطه ۳})$$

$$\lambda = \left(\frac{\Delta E_{drop+screen}}{\Delta E_{drop}} - 1 \right) \quad (\text{رابطه ۴})$$

در رابطه (۴): $\Delta E_{drop+screen}$ استهلاک انرژی نسبی شیب شکن قائم مجهز به صفحات مشبک افقی و ΔE_{drop} استهلاک انرژی نسبی شیب شکن مایل ساده می باشد.

آنالیز ابعادی

پارامترهای موثر در استهلاک انرژی شیب شکن های مایل مجهز به صفحات مشبک افقی متاثر از ویژگی های سیال، مشخصات مدل فیزیکی و شرایط هیدرولیکی جریان مطابق رابطه (۵) می باشد.

(رابطه ۵)

$$f_1(\rho, \mu, g, Q, t, p, \Delta Z, \theta, y_u, y_c, y_d, L_{wet}, E_u, \Delta E) = 0$$

که در آن: ρ جرم مخصوص آب $[ML^{-3}]$ ، μ لزوجت دینامیکی $[ML^{-1}T^{-1}]$ ، g شتاب گرانش زمین $[LT^{-2}]$ ، دبی Q جریان $[L^3T^{-1}]$ ، t ضخامت صفحات مشبک $[L]$ ، p نسبت تخلخل صفحه مشبک $[-]$ ، ΔZ ارتفاع شیب شکن $[L]$ ، θ زاویه شیب شکن مایل $[-]$ ، y_u عمق بالادست شیب شکن $[L]$ ، y_c عمق بحرانی $[L]$ ، y_d عمق پایین دست شیب شکن $[L]$ ، L_{wet} طول خیس شده صفحات مشبک $[L]$ ، E_u انرژی در بالادست شیب شکن $[L]$ و ΔE استهلاک انرژی $[L]$ می باشد. بر اساس پارامترهای موثر استخراج شده، با روش پی باکینگهام تحلیل ابعادی صورت گرفته و معادله بدون بعد زیر حاصل گردید.

(رابطه ۶)

$$f_2\left(\frac{\Delta E}{y_u}, \frac{E_u}{y_u}, p, \theta, \frac{\Delta Z}{y_u}, \frac{t}{y_u}, \frac{y_c}{y_u}, \frac{y_d}{y_u}, \frac{L_{wet}}{y_u}, Fr_u, Fr_d, Re_u\right) = 0$$

در رابطه (۶): Fr_u و Fr_d به ترتیب عدد فرود بالادست، عدد رینولدز بالادست و عدد فرود پایین دست شیب شکن مایل می باشند. با تقسیم برخی از پارامترهای بی بعد برهم و با ساده سازی، رابطه (۶) بصورت رابطه (۷) معنادار گردید.

(رابطه ۷)

$$f_3\left(p, \theta, Fr_u, Fr_d, Re_u, \frac{y_c}{\Delta Z}, \frac{t}{\Delta Z}, \frac{y_d}{\Delta Z}, \frac{L_{wet}}{y_c}, \frac{\Delta E}{E_u}\right) = 0$$

با توجه به متلاطم بودن جریان ($Re_u \geq 2000$) در تمامی مدل های تحقیق حاضر، از تاثیرات Re_u صرف نظر گردید (Rajaratnam, 1976). مطابق مطالعات (Chakir, 2003, Daneshfaraz et al. 2020, Bozkush et al., 2005, Daneshfaraz et al. 2019d,e, Nayebzadeh et al. 2020 و Sadeghfam et al., 2019) ملاحظه شد که ضخامت صفحات مشبک تاثیر چندانی در استهلاک انرژی نداشته و می توان از اثر ضخامت این صفحات ($\frac{t}{\Delta Z}$) صرف نظر کرد. بنابراین با صرف نظر کردن از پارامترهای بی بعد $\frac{t}{\Delta Z}$ و Re_u ساده سازی رابطه (۷)، می توان پارامترهای وابسته بدون بعد را با تابعی از پارامترهای مستقل بدون بعد به صورت رابطه (۸) نوشت:

$$\frac{y_d}{\Delta Z}, \frac{L_{wet}}{y_c}, \frac{\Delta E}{E_u}, Fr_d = f_4\left(Fr_u, \frac{y_c}{\Delta Z}, p, \theta\right) \quad (\text{رابطه ۸})$$

در رابطه فوق: $\frac{y_d}{\Delta Z}, \frac{L_{wet}}{y_c}, \frac{\Delta E}{E_u}, \frac{y_c}{\Delta Z}$ به ترتیب عمق بحرانی

نسبی، استهلاک انرژی نسبی، طول خیس شده نسبی و عمق نسبی پایین دست می باشد.

از آنجایی که عدد فرود بالادست فقط بر روی پارامتر طول نسبی خیس شده موثر بوده و به دلیل محدوده کم ($0.683 < Fr_u < 0.804$) بر روی پارامترهای استهلاک انرژی نسبی، عمق نسبی پایین دست و عدد فرود پایین دست تاثیری ندارد (Kabiri-Samani et al., 2017). بنابراین با تفکیک پارامترهای وابسته و مستقل، بالادست و پایین دست شیب شکن مایل می توان رابطه (۸) را به صورت رابطه (۹) و (۱۰) بیان نمود.

$$\frac{y_d}{\Delta Z}, \frac{\Delta E}{E_u}, Fr_d = f_5\left(\frac{y_c}{\Delta Z}, p, \theta\right) \quad (\text{رابطه ۹})$$

$$\frac{L_{wet}}{y_c} = f_6(Fr_u, p) \quad (\text{رابطه ۱۰})$$

معیارهای ارزیابی

برای تخمین عدد فرود پایین دست، عمق نسبی پایین دست و طول نسبی خیس شده براساس آزمایشات تحقیق حاضر روابطی ارائه شد. برای ارائه روابط، پارامتر وابسته مورد نظر مطابق رابطه (۱۵) به صورت تابعی از پارامترهای مستقل با ضرایب ثابت a, b, c, d و e در نظر گرفته شده در برنامه اکسل با استفاده از دستور Solver به صورت سعی و خطا ضرایب بدست آمدند. همچنین روابط ارائه شده با استفاده از شاخص‌های آماری ضریب تعیین R^2 و خطای جذر میانگین مربعات نرمال سازی شده $NRMSE$ مورد ارزیابی قرار گرفت.

(رابطه ۱۱)

$$R^2 = \left(\frac{(N \sum M_{exp} M_{cal}) - (\sum M_{exp})(\sum M_{cal})}{\sqrt{N(\sum M_{exp}^2) - (\sum M_{exp})^2} \sqrt{N(\sum M_{cal}^2) - (\sum M_{cal})^2}} \right)^2$$

(رابطه ۱۲)

$$NRMSE = \left(\sqrt{\frac{1}{N} \sum_1^N (M_{exp} - M_{cal})^2} \right) \times \frac{100}{L}$$

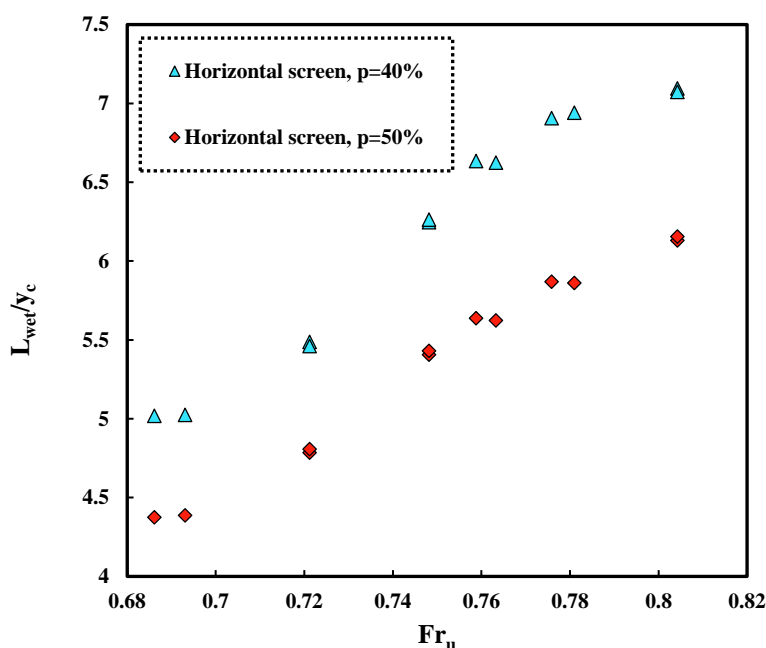
در روابط فوق: N ، M_{exp} ، M_{cal} و L به ترتیب تعداد داده‌های آزمایشگاهی، مقادیر داده‌های آزمایشگاهی، مقادیر داده‌های محاسباتی و متوسط مقادیر داده‌های آزمایشگاهی است. در صورتی که مقادیر $NRMSE$ و R^2 به ترتیب کمتر از ۱۰ درصد و نزدیک به یک باشد، معادلات حاصل، قابل قبول خواهند بود. برای ارائه روابط نیز ابتدا ۷۵ درصد داده‌های آزمایشگاهی به عنوان آموزش انتخاب شده و ۲۵ درصد باقی‌مانده، برای تست

روابط حاصله به کار گرفته شد. لازم به توضیح می‌باشد که معیارهای ارزیابی برای داده‌های تست، ارائه گردید.

نتایج و بحث

طول نسبی خیس شده

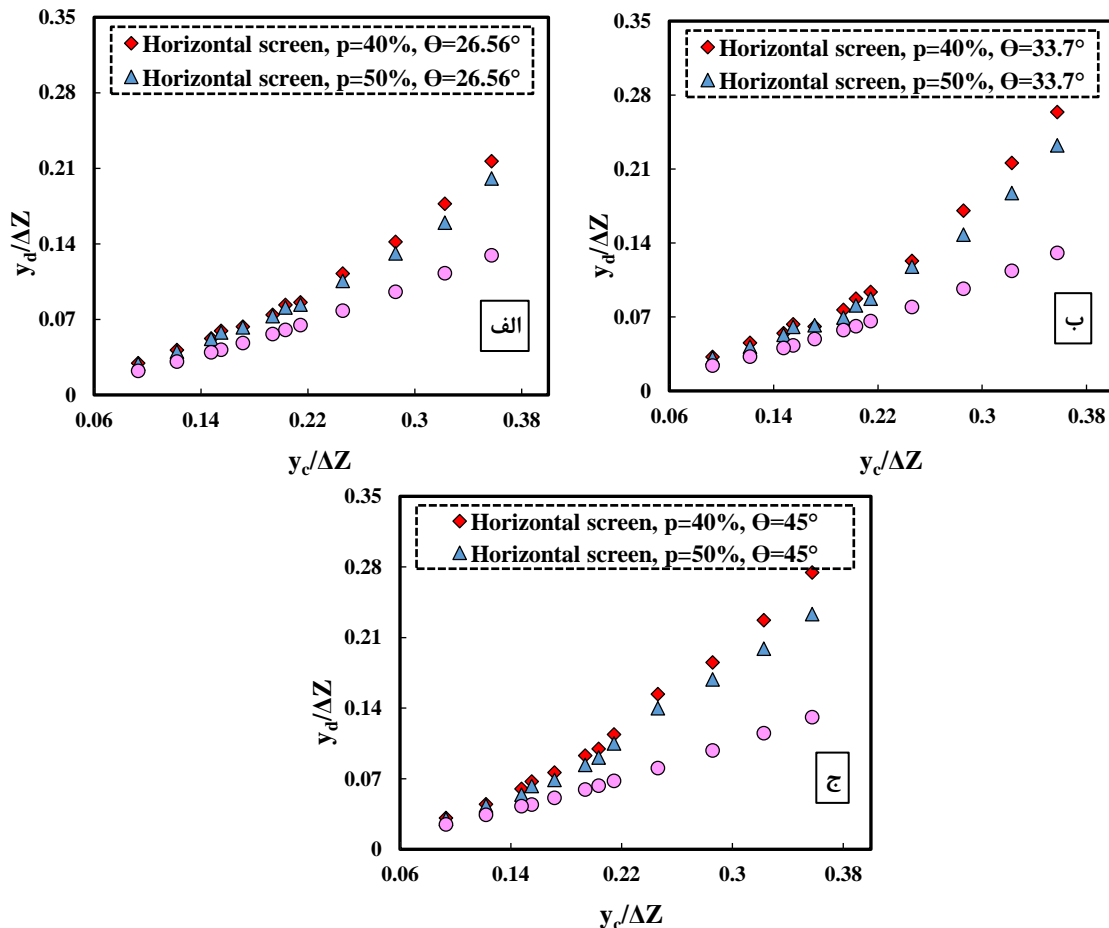
مطابق آنالیز ابعادی صورت گرفته، طول نسبی خیس شده صفحات مشبک تابعی از عدد فرود بالادست، تخلخل صفحات مشبک و زاویه شیب‌شکن می‌باشد. بر همین اساس شکل (۳) بیانگر تغییرات طول نسبی خیس شده به ازای نسبت تخلخل صفحات مشبک در مقابل عدد فرود بالادست می‌باشد. با توجه به شکل مشاهده می‌گردد که با افزایش عدد فرود بالادست، در هر سه زاویه شیب‌شکن مایل و دو نسبت تخلخل صفحات مشبک، طول خیس شده نسبی روند افزایشی داشته است. با افزایش عدد فرود در بالادست شیب‌شکن، دبی جریان افزایش می‌یابد. از آنجایی که با افزایش دبی جریان روی صفحات مشبک، این صفحات قابلیت عبور جریان ریزشی را در یک حجم ثابت ندارد، به همین دلیل با پیشروی جریان بر روی صفحات مشبک و افزایش طول خیس شده این صفحات، جریان به طور کامل از روزنه‌های دایره‌ای شکل بر روی سطح شیب‌دار و سطح افقی می‌ریزد. ریزش و برخورد جریان بر روی سطح شیب‌دار و کف فلوم نیز موجب وارد شدن هوا به داخل جریان شده و تداخل آب و هوا و جریان دوفازی را ایجاد می‌کند.



شکل ۳. تغییرات طول نسبی خیس شده در مقابل عدد فرود بالادست

صفحات مشبک افقی در مقابل عمق بحرانی نسبی در شکل‌های (۴-الف)، (۴-ب) و (۴-ج) نمایش داده شده است. مطابق شکل مشاهده می‌گردد که با افزایش عمق بحرانی نسبی در شیب‌شکن مایل ساده و شیب‌شکن مایل مجهز به صفحات مشبک افقی عمق نسبی پایین‌دست در هر سه زاویه روند افزایشی دارد. برای شیب‌شکن مایل ساده، عمق نسبی پایین‌دست با افزایش زاویه شیب‌شکن افزایش محسوسی دارد. با افزایش زاویه، نیروی ثقل افزایش یافته به موجب آن نیروی مقاومت هوا افزایش می‌یابد و سبب افزایش در عمق نسبی پایین‌دست می‌گردد.

با مشاهده شکل (۴-الف-ب-ج) استنباط می‌شود که به-کارگیری صفحات مشبک افقی در لبه شیب‌شکن مایل منجر به افزایش عمق نسبی پایین‌دست در هر دو تخلخل این صفحات نسبت به شیب‌شکن مایل ساده شده است. این افزایش با افزایش عمق بحرانی نسبی، با شیب بیشتری خود را نشان می‌دهد. در هر سه زاویه شیب‌شکن مایل، تخلخل ۴۰ درصد صفحات مشبک، تاثیر بیشتری نسبت به تخلخل ۵۰ درصدی در افزایش عمق نسبی پایین‌دست دارد. همچنین در یک تخلخل ثابت صفحات مشبک، با افزایش زاویه شیب‌شکن، عمق نسبی پایین‌دست افزایش می‌یابد.



شکل ۴. تغییرات عمق نسبی پایین‌دست در مقابل عمق بحرانی نسبی

مقادیر متوسط طول نسبی خیس شده برای تخلخل ۴۰ و ۵۰ درصدی صفحات مشبک افقی به ترتیب برابر ۶/۲۲ و ۵/۳۷۵ به‌دست آمد. ملاحظه می‌گردد که با افزایش تخلخل صفحات مشبک طول نسبی خیس شده کاهش یافته است، به‌گونه‌ای که صفحات مشبک با تخلخل ۵۰ درصدی در مقایسه با صفحات مشبک با تخلخل ۴۰ درصدی، به‌صورت متوسط دارای ۱۵/۷ درصد طول خیس شده کمتری می‌باشند. با افزایش تخلخل صفحات مشبک، روزه‌های خالی این صفحات بیشتر شده و جریان زیادتری را از خود عبور می‌دهد. با عبور بیشتر جریان از صفحات مشبک طول نسبی خیس شده کاهش می‌یابد.

برای تخمین طول نسبی خیس شده در شیب‌شکن مایل مجهز به صفحات مشبک افقی رابطه (۱۳) با ضریب تعیین ۰/۹۷۱ و خطای جذر میانگین مربعات نرمال سازی شده ۲/۶۱ درصد ارائه گردید. (رابطه ۱۳)

$$\frac{L_{wet}}{y_c} = 10.24985(Fr_u)^{1.39415} (p)^{-0.42135} - 3.83563$$

عمق نسبی و عدد فرود پایین‌دست شیب‌شکن

تغییرات عمق نسبی پایین‌دست شیب‌شکن مایل ساده و مجهز به

در سه زاویه شیب‌شکن، مقادیر درصد افزایش عمق نسبی پایین- دست محاسبه و متوسط آن‌ها در جدول (۲) ارائه شد.

برای مقایسه دقیق‌تر تاثیر استفاده از صفحات مشبک در افزایش عمق نسبی پایین‌دست نسبت به شیب‌شکن مایل ساده

جدول ۲. درصد افزایش عمق نسبی پایین‌دست شیب‌شکن مایل مجهز به صفحات مشبک افقی نسبت به شیب‌شکن مایل ساده

درصد تخلخل صفحه مشبک	زاویه شیب‌شکن مایل مجهز به صفحه مشبک افقی		
	$\theta = 26.56^\circ$	$\theta = 33.7^\circ$	$\theta = 45^\circ$
	درصد افزایش عمق نسبی پایین‌دست (%)		
P=40%	۴۰/۶۹	۵۱/۶۳	۶۳/۵۸
P=50%	۳۴/۷۸	۴۰/۵۹	۴۸/۹۳

مایل ساده افزایش می‌یابد. با ملاحظه مقادیر عدد فرود پایین- دست شیب‌شکن مایل مجهز به صفحات مشبک افقی نیز چنین استنباط می‌شود که برای تمامی مقادیر عمق بحرانی نسبی، عدد فرود پایین دست کاهش قابل ملاحظه‌ای در هر سه زاویه داشته است. این میزان کاهش برای صفحه مشبک با تخلخل ۴۰ درصد کمتر از صفحه مشبک با تخلخل ۵۰ درصدی می‌باشد. برای مدل آزمایشگاهی شیب‌شکن مایل مجهز به صفحه مشبک افقی نیز با افزایش زاویه شیب‌شکن، عدد فرود پایین‌دست کاهش یافته است. همچنین در شکل (۵- الف-ب-ج) مشاهده می‌شود برای تمامی مدل‌ها با به‌کارگیری صفحات مشبک افقی در لبه شیب- شکن مایل عدد فرود پایین‌دست در هر سه زاویه و دو نسبت تخلخل از بازه ۴/۴۹ الی ۸/۳۵ به بازه ۱/۴۸ الی ۵/۷۸ نسبت به شیب‌شکن مایل ساده کاهش داده است، به‌گونه‌ای که میزان کاهش عدد فرود برای زوایای شیب‌شکن ۲۶/۵۶، ۳۳/۷ و ۴۵ درجه در نسبت تخلخل ۴۰ درصد به ترتیب و به‌طور متوسط برابر ۳۹/۴۳، ۴۴/۲۷ و ۴۹/۹۱ درصد به‌دست آمد. برای تخلخل ۵۰ درصد نیز در زوایای ذکر شده به ترتیب برابر ۳۵/۷۷، ۳۸/۶۱ و ۴۳/۲۱ درصد محاسبه گردید.

در تحقیق حاضر برای تخمین عدد فرود پایین‌دست در شیب‌شکن‌های مایل ساده و مجهز به صفحات مشبک افقی با در نظر گرفتن داده‌های آزمایشگاهی رابطه (۱۵) با معیارهای ارزیابی قابل قبول ارائه گردید.

$$Fr_d = a \left(\frac{y_c}{\Delta Z} \right)^b (\theta)^c (p)^d + e \quad (\text{رابطه ۱۵})$$

ضرایب ثابت رابطه فوق به همراه معیارهای ارزیابی برای شیب‌شکن مایل ساده و مجهز به صفحات مشبک افقی در جدول (۳) ارائه گردیده است. مطابق جدول (۳) مشاهده می‌شود که معیارهای ارزیابی برای هر دو نوع شیب‌شکن دارای مقادیر قابل قبولی است.

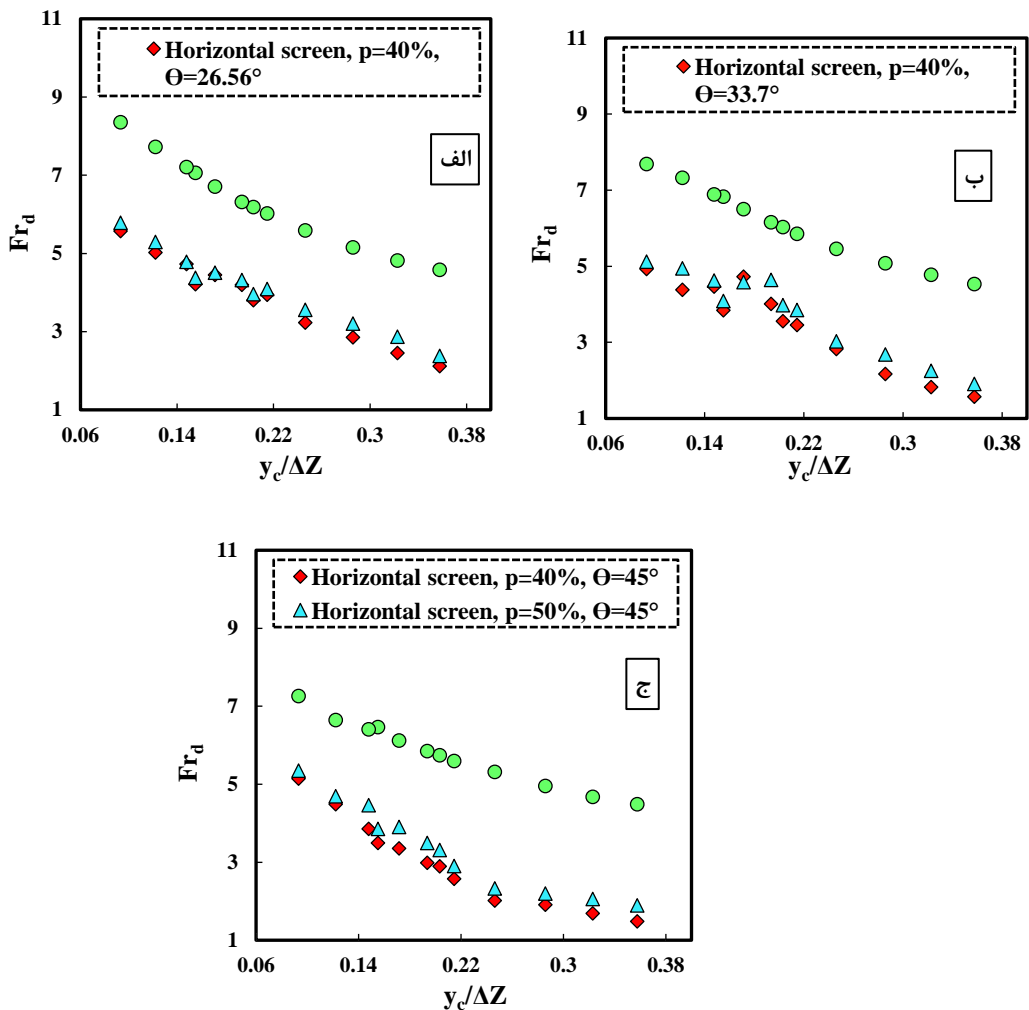
در جدول (۲) مشاهده می‌شود که در هر سه زاویه شیب- شکن، صفحات مشبک با نسبت تخلخل ۴۰ درصد بیش‌تر از تخلخل ۵۰ درصد باعث افزایش عمق نسبی پایین‌دست شده است. علت این امر بیشتر بودن طول خیس شده صفحات مشبک ۴۰ درصدی نسبت به تخلخل ۵۰ درصدی می‌باشد. همچنین با توجه به جدول (۲) ملاحظه می‌گردد که در هر دو تخلخل صفحات مشبک با افزایش زاویه شیب‌شکن، عمق نسبی پایین- دست افزایش می‌یابد. با افزایش زاویه شیب‌شکن، طول سطح شیب‌دار کاهش یافته و سبب برخورد زودتر جت ریزشی به سطح افقی می‌شود. با عبور جت ریزشی از سطح شیب‌دار، ارتفاع ریزش جت افزایش یافته و به‌صورت قائم با شدت بیشتری به سطح افقی کانال پایاب برخورد می‌کند. افزایش ارتفاع ریزش جت و برخورد جت ریزشی بر سطح افقی در پایین‌دست شیب‌شکن سبب افزایش تلاطم، عمق نسبی پایین‌دست و استهلاک انرژی می‌گردد.

رابطه غیر خطی (۱۴) با ضریب تعیین ۰/۹۹۳ و خطای جذر میانگین مربعات نرمال سازی شده ۶/۶۷ درصد، با در نظر گرفتن مقادیر داده‌های آزمایشگاهی برای محاسبه عمق نسبی پایین‌دست شیب‌شکن‌های مایل مجهز به صفحات مشبک افقی ارائه شده است.

(رابطه ۱۴)

$$\frac{y_d}{\Delta Z} = 1.29732 \left(\frac{y_c}{\Delta Z} \right)^{1.92793} (\theta)^{0.43890} (p)^{-0.51851} + 0.01506$$

برای بررسی عدد فرود در پایین‌دست شیب‌شکن مایل نسبت به عمق بحرانی نسبی با زوایا و نسبت تخلخل صفحات مشبک، تغییرات آن در شکل (۵- الف-ب-ج) نشان داده شده است. در شکل (۵- الف-ب-ج) مشاهده می‌شود با افزایش عمق بحرانی نسبی برای تمامی مدل‌های آزمایشگاهی عدد فرود پایین- دست کاهش می‌یابد. همچنین در یک عمق بحرانی نسبی ثابت، با کاهش زاویه شیب‌شکن عدد فرود پایین‌دست برای شیب‌شکن



شکل ۵. تغییرات اعداد فرود در مقابل عمق بحرانی نسبی

جدول ۳. ضرایب ثابت و معیارهای ارزیابی رابطه (۱۵) برای شیب‌شکن مایل ساده و مجهز به صفحات مشبک افقی

نوع شیب‌شکن مایل	ضرایب					معیارهای ارزیابی	
	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	<i>d</i>	<i>e</i>	R^2	$NRMSE(\%)$
ساده ($P=1$)	۳۰/۳۸۴۷	-۰/۰۷۱۲۲	-۰/۰۳۱۱۷	۱	-۲۸/۶۳۰۱	۰/۹۹۷	۲/۲۹
مجهز به صفحه مشبک افقی	-۱۲/۷۴۴۵	۰/۳۹۰۶۶	۰/۲۱۹۱۸	-۰/۱۷۴۷۴	۱۰/۶۴۱۴	۰/۹۵۱	۶/۲۵

انرژی نسبی متفاوت می‌باشد.

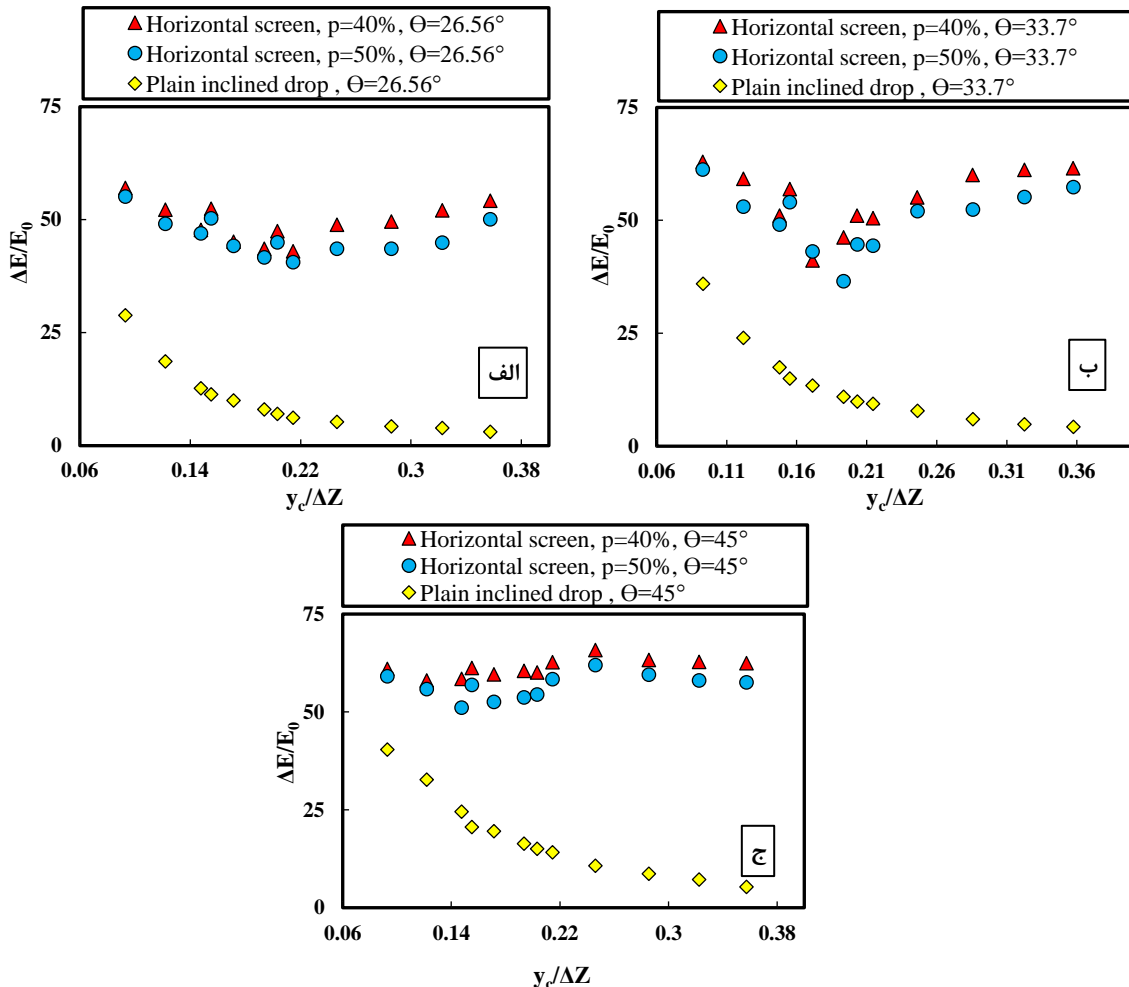
در شکل‌های (۶-الف)، (۶-ب) و (۶-ج) برای زوایای ۲۶/۵۶، ۳۳/۷ و ۴۵ درجه تغییرات استهلاک انرژی ارائه شده است. در شکل‌های (۶-الف) و (۶-ب) شیب‌شکن مایل مجهز به صفحات مشبک افقی، با افزایش عمق بحرانی نسبی ابتدا استهلاک انرژی نسبی مشابه شیب‌شکن مایل ساده روند کاهشی داشته، سپس افزایش می‌یابد. روند کاهشی استهلاک انرژی نسبی تا زمانی می‌باشد که جت ریزشی از صفحات مشبک بر روی سطح شیب‌دار برخورد می‌کند. با افزایش عمق بحرانی نسبی، طول

استهلاک انرژی نسبی

تغییرات استهلاک انرژی نسبی شیب‌شکن مایل ساده و شیب‌شکن مایل مجهز به صفحات مشبک افقی با دو نسبت تخلخل و سه زاویه شیب‌شکن در مقابل عمق بحرانی نسبی در شکل‌های (۶-الف)، (۶-ب) و (۶-ج) نشان داده شده است. مطابق شکل برای شیب‌شکن‌های مایل ساده در هر سه زاویه با افزایش عمق بحرانی نسبی استهلاک انرژی نسبی کاهش می‌یابد. اما این در حالی است که در شیب‌شکن‌های مایل مجهز به صفحات مشبک افقی، با افزایش عمق بحرانی نسبی در هر سه زاویه تغییرات استهلاک

شده صفحات بیشتر شده و سبب پیشروی جت ریزشی از سطح شیبدار به سطح افقی در پایین دست شیب‌شکن می‌گردد. با پیشرفت جت ریزشی به سطح افقی، ارتفاع جت ریزشی افزایش یافته و با شدت بیشتری به صورت قائم به سطح افقی برخورد می‌کند. با برخورد جریان ریزشی به سطح افقی از طریق مکانیزم تداخل آب با هوا، تلاطم جریان افزایش یافته و منجر به استهلاک انرژی بیشتر جریان می‌شود. همچنین با بیشتر شدن طول خیس

شده صفحات بیشتر شده و سبب پیشروی جت ریزشی از سطح شیبدار به سطح افقی در پایین دست شیب‌شکن می‌گردد. با پیشرفت جت ریزشی به سطح افقی، ارتفاع جت ریزشی افزایش یافته و با شدت بیشتری به صورت قائم به سطح افقی برخورد می‌کند. با برخورد جریان ریزشی به سطح افقی از طریق مکانیزم تداخل آب با هوا، تلاطم جریان افزایش یافته و منجر به استهلاک انرژی بیشتر جریان می‌شود. همچنین با بیشتر شدن طول خیس



شکل ۶. تغییرات استهلاک انرژی نسبی کل در مقابل عمق بحرانی نسبی

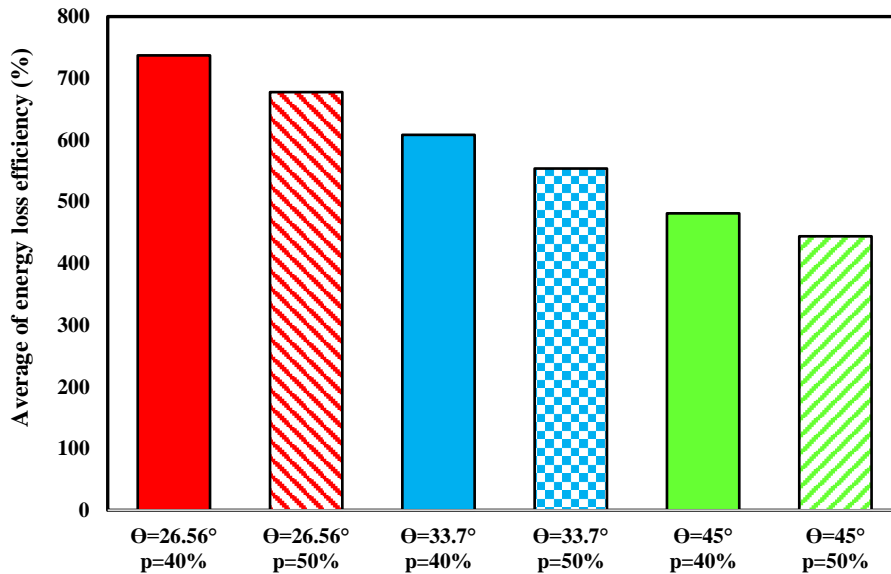
اتفاق افتاده و زودتر به حداکثر تلاطم و استهلاک انرژی نسبی می‌رسد. به همین خاطر در این زاویه روند استهلاک انرژی جریان یک گام جلوتر از دو زاویه دیگر می‌باشد. لازم به توضیح است که بعد از ریزش جریان بر روی سطح افقی بیشترین تلاطم و استهلاک انرژی نسبی در محدوده ۰/۲۶ عمق بحرانی نسبی بوده که بعد از آن با افزایش عمق بحرانی نسبی، انرژی جنبشی جریان افزایش یافته و استهلاک انرژی نسبی کاهش می‌یابد.

به منظور بررسی بهتر زوایا و تخلخل صفحات مشبک در استهلاک انرژی نسبی جریان تحقیق حاضر، با استفاده از رابطه (۴) راندمان استهلاک انرژی برای سه زاویه و دو نسبت تخلخل محاسبه و متوسط آن‌ها در شکل (۷) آورده شده است.

همچنین مطابق شکل (۶-ج) مشاهده می‌شود از محدوده عمق بحرانی نسبی ۰/۰۹ الی ۰/۱۵، ۰/۱۵ الی ۰/۲۶ و ۰/۲۶ الی ۰/۳۵ استهلاک انرژی نسبی کل به ترتیب کاهش، افزایش و کاهش می‌یابد. در شکل (۶-ج) تغییرات استهلاک انرژی در مقابل عمق بحرانی نسبی برای شیب‌شکن مجهز به صفحات مشبک افقی دارای سه بخش مجزا می‌باشد. تغییرات استهلاک انرژی در دو بخش اولی مشابه زوایای ۲۶/۵۶ و ۳۳/۷ درجه بوده است. تفاوت زاویه ۴۵ درجه نسبت به دو زاویه دیگر در این است که در زاویه ۴۵ درجه به دلیل کم بودن طول سطح شیب‌دار، ریزش جریان بر روی سطح افقی در عمق بحرانی نسبی $(\frac{y_c}{\Delta Z})$ کمتر،

مشبک با نسبت تخلخل ۴۰ درصد بیشتر از نسبت تخلخل ۵۰ درصدی می‌باشد. از دلایل بیشتر بودن راندمان استهلاک انرژی صفحات مشبک با نسبت تخلخل ۴۰ درصد، بیشتر بودن طول خیس شده این صفحات می‌باشد.

با توجه به شکل (۷) می‌توان استنباط نمود که با افزایش زاویه شیب‌شکن مایل مجهز به صفحات مشبک افقی، راندمان استهلاک انرژی در هر دو نسبت تخلخل صفحات مشبک کاهش می‌یابد. همچنین در تمامی زوایا راندمان استهلاک انرژی صفحات



شکل ۷. متوسط راندمان استهلاک انرژی برای زوایا و نسبت تخلخل‌های مختلف

مجهز به صفحات مشبک صورت گرفت و پارامترهای طول نسبی خیس شده، عمق نسبی پایین‌دست، عدد فرود پایین‌دست و استهلاک انرژی نسبی کل مورد بررسی قرار گرفت. نتایج بدست آمده به شرح زیر می‌باشد.

در تمامی مدل‌ها با افزایش عدد فرود بالادست طول نسبی خیس شده افزایش می‌یابد. با مقایسه متوسط مقادیر طول نسبی خیس شده مشاهده شد که زاویه شیب‌شکن تأثیری در طول نسبی خیس شده ندارد. همچنین تخلخل ۴۰ درصدی صفحات مشبک، طول نسبی خیس شده بیشتری نسبت به تخلخل ۵۰ درصدی را دارا می‌باشد.

نتایج نشان داد که با افزایش عمق بحرانی نسبی برای هر دو شیب‌شکن مایل ساده و مجهز به صفحات مشبک افقی عمق نسبی پایین‌دست افزایش می‌یابد. همچنین با افزایش زاویه شیب‌شکن و تخلخل صفحات مشبک، عمق نسبی پایین‌دست به ترتیب افزایش و کاهش یافت.

با به کارگیری صفحات مشبک افقی در لبه شیب‌شکن مایل، عدد فرود پایین‌دست نسبت به شیب‌شکن مایل ساده در نسبت تخلخل ۴۰ درصد برای زوایای ۲۶/۵۶، ۳۳/۷ و ۴۵ درجه به ترتیب و به طور متوسط ۳۹/۴۳، ۴۴/۲۷ و ۴۹/۹۱ درصد کاهش یافت. در تخلخل ۵۰ درصدی برای زوایای فوق نیز به ترتیب برابر ۳۵/۷۷، ۳۸/۶۱ و ۴۳/۲۱ درصد کاهش داد.

کاربرد

با توجه به اینکه عدد فرود پایین‌دست شیب‌شکن مایل ساده در دو ارتفاع و سه زاویه شیب‌شکن از بازه ۴/۴۹ الی ۸/۳۵ می‌باشد، از این رو به منظور استهلاک انرژی جریان در پایین‌دست شیب‌شکن مایل ساده با محدوده عدد فرود ذکر شده، معمولاً حوضچه آرامش نوع ۲ و نوع ۳ پیشنهاد می‌شود. در تحقیق حاضر با به کارگیری سازه الحاقی صفحه مشبک در لبه شیب‌شکن مایل عدد فرود پایین‌دست از بازه ۴/۴۹ الی ۸/۳۵ به بازه ۱/۴۸ الی ۵/۷۸ تغییر یافت. همچنین طول پرش هیدرولیکی کلاسیک که از رابطه (۱۶) (Bradley & Peterka., 1957) محاسبه شده، از محدوده ۴۰/۰۲ الی ۶۸/۸۷ سانتی‌متر به محدوده ۱۹/۷ الی ۳۳/۹۲ سانتی‌متر کاهش یافته است. بنابراین با کاهش عدد فرود و طول پرش هیدرولیکی می‌توان حوضچه آرامش نوع ۲ یا ۳ را با ابعادی کمتر و اقتصادی‌تر اجرا نمود.

$$\frac{L_j}{y_1} = 220 \tanh\left(\frac{Fr_1 - 1}{22}\right) \quad (\text{رابطه ۱۶})$$

نتیجه‌گیری کلی

تحقیق حاضر با هدف بررسی استهلاک انرژی در پایین‌دست شیب‌شکن‌های مایل با به کارگیری صفحات مشبک افقی با دو نسبت تخلخل در سه زاویه و دو ارتفاع شیب‌شکن انجام شد. در مجموع ۱۰۸ آزمایش متفاوت بر روی شیب‌شکن مایل ساده و

در شیب‌شکن مایل مجهز به صفحات مشبک افقی، روابطی برای تخمین پارامترهای طول نسبی خیس شده، عمق نسبی پایین‌دست و عدد فرود پایین‌دست با معیارهای ارزیابی با دقت بالا ارائه شد. لازم به ذکر است که با استفاده از ۷۵ درصد داده‌های آزمایشگاهی روابط ارائه شده و با ۲۵ درصد مابقی به تست رابطه با معیارهای ارزیابی پرداخته شد.

با به‌کارگیری صفحات مشبک افقی در لبه شیب‌شکن مایل عدد فرود پایین‌دست در هر سه زاویه و دو نسبت تخلخل از بازه ۴/۴۹ الی ۸/۳۵ به بازه ۱/۴۸ الی ۵/۷۸ نسبت به شیب‌شکن مایل ساده کاهش یافت.

با مجهز نمودن شیب‌شکن مایل به صفحات مشبک افقی مشاهده شد که کاهش زاویه شیب‌شکن و تخلخل صفحات مشبک منجر به افزایش متوسط راندمان استهلاک انرژی می‌گردد.

REFERENCES

- Balkis, G. (2004). Experimental investigation of energy dissipation through inclined screens (Doctoral dissertation, M. Sc. Thesis, Department of Civil Engineering Middle East Technical University, Ankara, Turkey).
- Bozkush, Z., Balkish, 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.
- Cakir, 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. and Rezazadeh Joudi, A. (2017a). 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.
- Daneshfaraz, R., Sadeghfam, S., & Ghahramanzadeh, A. (2017b). Three-dimensional numerical investigation of flow through screens as energy dissipaters. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 44(10), 850-859.
- Daneshfaraz, R., Chabokpour, J., & Nezafat, H. (2019a). 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., Sadeghfam, S. and Hasannia, 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 Faersi)
- Daneshfaraz, R., Sadeghfam, S. and Hasannia, V. (2019c). Experimental investigating effect of Froude number on hydraulic parameters of vertical drop with supercritical flow upstream, *Amirkabir Journal of Civil Engineering*, DOI: 10.22060/CEEJ.2019.15655.5985.
- Daneshfaraz, R., Sadeghfam, S., & Tahni, A. (2019d). Experimental Investigation of Screen as Energy Dissipaters in the Movable-Bed Channel. *Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Civil Engineering*. Doi: 10.1007/s40996-019-00306-7.
- Daneshfaraz, R., Majedi Asl, M.M., Razmi, S., Norouzi, R. and Abraham, J., 2020. Experimental investigation of the effect of dual horizontal screens on the hydraulic performance of a vertical drop. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 17, 2927-2936.
- Gungor, E. (2005). Experimental Investigation of Energy Dissipation through Triangular Screens (Doctoral dissertation, MSc Thesis Department of Civil Engineering Middle East Technical University, Ankara, Turkey).
- Kabiri-Samani, A. R., Bakhshian, E., & Chamani, M. R. (2017). Flow characteristics of grid drop-type, dissipaters. *Flow Measurement and Instrumentation*, 54, 298-306.
- 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.
- Moradi Sabz Koochi, A. Kashefipour, S.M. Bina, M. (2011). Experimental Comparison of Energy Dissipation on Drop Structures. *JWSS-Isfahan University of Technology*, 15(56), 209-223.
- 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*.
- Nayebzadeh, B., Lotfollahi-yaghin, M., Daneshfaraz, R. (2020). Numerical Investigation of Hydraulic Characteristics of Vertical Drops with Screens and Gradually Wall Expanding, *Amirkabir Journal of Civil Engineering*, (), pp. -. doi: 10.22060/ceej.2020.17779.6671
- Rajaratnam, N. (1976). *Turbulent jets* (Vol. 5). Elsevier.
- Rajaratnam, N., & Hurtig, K. I. (2000). Screen-type energy dissipator for hydraulic structures. *Journal of Hydraulic Engineering*, 126(4), 310-312.
- Sholichin, M., & Akib, S. (2010). Development of drop number performance for estimate hydraulic jump on vertical and sloped drop structure. *International Journal of Physical Sciences*, 5(11), 1678-1687.
- 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.

Wagner, W. E. (1956). Hydraulic Model Studies of the Check Intake Structure-Potholes East Canal. Bureau of Reclamation Hydraulic Laboratory Report Hyd. 411.