

## بررسی آزمایشگاهی عملکرد صفحات مشبک افقی و قائم در استهلاک انرژی شیب‌شکن‌های مایل

رسول دانشفراز\*، مهدی ماجدی اصل و علی بازاریار<sup>۱</sup>

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۵/۷؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۷/۱۰)

### چکیده

شیب‌شکن مایل از جمله سازه‌های مولد جریان فوق‌بحرانی هستند که در کانال‌های روباز برای کاهش ارتفاع و ایجاد شیب ملایم مورد استفاده قرار می‌گیرند. با توجه به اینکه به کارگیری صفحات مشبک به صورت افقی و قائم به عنوان مستهلک کننده انرژی در پایین دست این سازه‌ها می‌تواند بر استهلاک انرژی جریان مؤثر باشد، لذا ۱۸۰ آزمایش متفاوت در تحقیق حاضر با هدف بررسی استهلاک انرژی جریان انجام شد. نتایج نشان داد که زاویه شیب‌شکن مایل تأثیر چندانی بر استهلاک انرژی جریان و عمق نسبی پایین دست شیب‌شکن مایل مجهز به صفحه مشبک قائم ندارد ولی افزایش تخلخل سبب افزایش هر دو پارامتر می‌شود. برای شیب‌شکن مایل مجهز به صفحه مشبک افقی نیز با افزایش زاویه شیب‌شکن و کاهش درصد تخلخل صفحات مشبک عمق نسبی پایین دست و استهلاک انرژی نسبی کل افزایش می‌یابند. برای یک عمق بحرانی نسبی ثابت، استهلاک انرژی نسبی کل و عمق نسبی پایین دست شیب‌شکن مایل ساده مجهز به صفحه مشبک افقی را می‌توان تابعی از طول خیس شده صفحات مشبک و طول شیب‌شکن مایل در نظر گرفت. برای صفحات مشبک قائم نیز فقط تابعی از تخلخل صفحات مشبک است.

واژه‌های کلیدی: استهلاک انرژی، طول خیس شده صفحه مشبک، زاویه شیب‌شکن مایل، عمق نسبی پایین دست

۱- گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه مراغه  
\*: مسئول مکاتبات: پست الکترونیکی: daneshfaraz@yahoo.com

## مقدمه

روی سطح شیب‌دار قرار گرفته و انتهای غلتاب ایجاد شده در انتهای سطح شیب‌دار واقع شود، پرش نوع C و در صورتی که پرش به طور کامل روی شیب اتفاق افتد پرش نوع D تشکیل خواهد یافت.

شولچین و آکیب (۱۷) به بررسی تخمین طول پرش هیدرولیکی در پایین دست شیب‌شکن‌های مایل با استفاده از عدد شیب‌شکن پرداختند. نتایج مطالعات آنها نشان داد که عدد شیب‌شکن نمی‌تواند طول پرش هیدرولیکی را برای سازه‌های شیب‌شکن مایل تخمین بزند.

مرادی سبزوکی و همکاران (۵) با مقایسه سه نوع شیب‌شکن رایج قائم، مایل مستطیلی و پلکانی نشان دادند که کمترین استهلاک انرژی مربوط به شیب‌شکن مایل است.

تأثیر استفاده از صفحات مشبک قائم با آرایش و نسبت تخلخل متفاوت در پایین دست سازه‌های هیدرولیکی کوچک برای اولین بار به عنوان مستهلک کننده انرژی توسط راجاراتنام و هارتینگ (۱۴) مورد بررسی قرار گرفت. نتایج حاکی از آن است که نسبت تخلخل ۴۰ درصد صفحات مشبک قائم دارای استهلاک انرژی بیشتری نسبت به تخلخل ۵۰ درصدی است. بالکیش (۲) به بررسی تأثیر صفحات مشبک قائم 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 تأثیر قابل ملاحظه‌ای در استهلاک انرژی جریان ندارد. آسلانکارا (۸) در مطالعات خود نشان داد که قرارگیری صفحات مشبک قائم به صورت چندتایی باعث افزایش استهلاک انرژی شده و عمق پایاب نیز تأثیری بر استهلاک انرژی جریان در صفحات مشبک قائم ندارد.

مطابق مطالعات صادق‌فام و همکاران (۹) به کارگیری صفحات مشبک قائم در پایین دست سازه‌های مولد جریان فوق بحرانی، منجر به تشکیل سه نوع پرش هیدرولیکی آزاد، مستغرق و کاذب می‌شود، همچنین نشان دادند که این صفحات در مقایسه با پرش هیدرولیکی آزاد و مستغرق استهلاک انرژی بیشتری دارد. تأثیر محل قرارگیری صفحات مشبک از سازه

شیب‌شکن‌های مایل مستطیلی معمولاً در کانال‌های آبیاری و فرسایش‌پذیر برای کاهش ارتفاع یک تا پنج متری در فواصل به نسبت کوتاه مورد استفاده قرار می‌گیرند. از آنجایی که در پایین دست این سازه‌ها انرژی جنبشی جریان افزایش می‌یابد، برای کاهش این انرژی از سازه‌های الحاقی استفاده می‌شود. صفحات مشبک نوعی از سازه‌های الحاقی مستهلک کننده انرژی شناخته شده در پایین دست سازه‌های هیدرولیکی کوچک بوده که از سال ۲۰۰۰ میلادی مورد توجه پژوهشگران قرار گرفته است. این سازه در تحقیقات گذشته بیشتر به صورت قائم در مقابل جریان فوق بحرانی قرار گرفته و با تثبیت و تشکیل پرش هیدرولیکی موجب استهلاک انرژی چشمگیری می‌شود. با توجه به اینکه تا به حال تحقیقاتی روی شیب‌شکن‌های مایل با حضور صفحات مشبک صورت نگرفته است، لذا هدف مطالعه حاضر بررسی استهلاک انرژی در شیب‌شکن‌های مایل با حضور و بدون حضور صفحات مشبک افقی و قائم است.

مطالعات واگنر (۱۸) روی استهلاک انرژی شیب‌شکن‌های مایل رودخانه کلمبیا، از جمله اولین مطالعات انجام شده در زمینه شیب‌شکن‌های مایل محسوب می‌شود. در سال ۱۹۵۸، پترکا (۱۲) آزمایش‌هایی روی شیب‌شکن مایل مانع‌دار انجام داده و ضمن تخمین استهلاک انرژی، ضوابط طراحی آن را نیز ارائه کرد. کیندزواتر (۱۰) با توجه به موقعیت پنجه پرش در سطح شیب‌شکن مایل یا تنداب و نیز موقعیت انتهای طول غلتاب نسبت به محل تقاطع شیب و قسمت افقی که وابسته به عمق پایاب است، چهار نوع پرش هیدرولیکی A، B، C و D تعریف کرد. بر همین اساس در صورتی که ابتدا و انتهای پرش پایین دست سطح شیب‌دار قرار گیرد، پرش نوع A خواهد بود. اگر ابتدای پرش روی شیب و انتهای غلتاب ایجاد شده در قسمت افقی پایین دست سطح شیب‌دار قرار گیرد، پرش نوع B خواهد بود. در مواقعی که پرش هیدرولیکی به گونه‌ای باشد که پنجه پرش

مولد جریان فوق بحرانی در میزان استهلاک انرژی جریان توسط دانشفراز و همکاران (۵) صورت گرفته و نشان دادند که وجود صفحه مشبک منجر به افزایش استهلاک انرژی نسبت به پرش آزاد شده است.

دانشفراز و همکاران (۷) تأثیر به کارگیری بلوک به همراه صفحات مشبک قائم در پایین دست دریچه را مورد بررسی قرار داده و نشان دادند که مدل‌های دارای بلوک در مقایسه با مدل‌های بدون بلوک استهلاک انرژی بیشتری دارند. دانشفراز و همکاران (۴) با مجهز کردن شیب‌شکن‌های قائم به صفحات مشبک افقی تحت شرایط جریان فوق بحرانی، استهلاک انرژی جریان را مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد در یک عمق بحرانی نسبی ثابت با افزایش عدد فرود استهلاک انرژی افزایش می‌یابد. دانشفراز و همکاران (۶) با به کارگیری صفحات مشبک در بالادست بستر متحرک با جریان فوق بحرانی به بررسی استهلاک انرژی جریان پرداختند. آنها در مطالعات خود از صفحات مشبک منفرد و دوبل با نسبت‌های تخلخل ۴۰ و ۵۰ درصد استفاده کردند. نتایج آنها نشان داد که صفحات مشبک دوبل با نسبت تخلخل ۴۰ درصد بیشترین استهلاک انرژی را نسبت به بقیه مدل‌ها به خود اختصاص داده است.

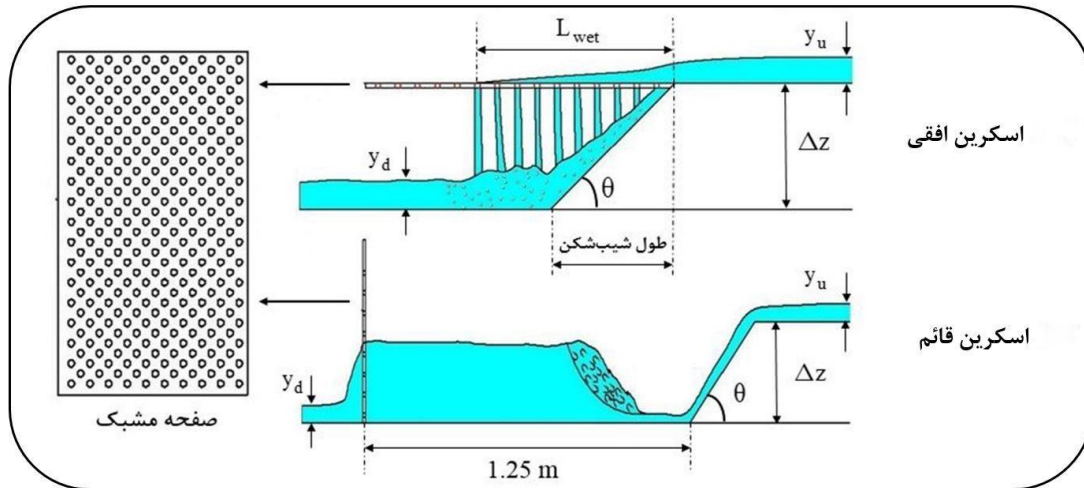
صفحات مشبک قائم به عنوان یک سازه مستهلک کننده انرژی با امکان ایجاد تلاطم با جریان دوفازی، تشکیل و تثبیت پرش هیدرولیکی می‌تواند در پایین دست شیب‌شکن مایل باعث افزایش استهلاک انرژی شود. همچنین با توجه به اینکه به کارگیری صفحات مشبک در شیب‌شکن‌ها به صورت افقی با مکانیزم تداخل آب با هوا و ایجاد جریان ریزشی به کف کانال پایین دست می‌تواند باعث ایجاد تلاطم و افزایش استهلاک انرژی شود، لذا تحقیق حاضر برای اولین بار، برای بررسی پارامترهای هیدرولیکی و استهلاک انرژی در پایین دست شیب‌شکن‌های مایل با به کارگیری صفحات مشبک افقی و قائم صورت پذیرفته و عملکرد این صفحات در استهلاک انرژی شیب‌شکن‌های مایل مورد مقایسه و

ارزیابی قرار گرفت.

## مواد و روش‌ها

به منظور بررسی تأثیر صفحات مشبک افقی و قائم در استهلاک انرژی شیب‌شکن‌های مایل و هیدرولیک جریان عبوری از آن ۱۸۰ آزمایش مختلف انجام گرفت. آزمایش‌های تحقیق حاضر در 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 انجام شد. برای ساخت مدل شیب‌شکن مایل از جعبه‌هایی به جنس شیشه با ضخامت ۰/۸ سانتی‌متر استفاده شد. این جعبه هم‌عرض کانال، طولی برابر ۱/۲۰ متر و دو ارتفاع ۱۵ و ۲۵ سانتی‌متر است. سه زاویه ۲۶/۵۶، ۳۳/۷ و ۴۵ درجه نیز برای ایجاد سطح شیب‌دار شیب‌شکن مایل انتخاب شدند. همچنین از صفحات مشبک به جنس پلی‌اتیلن با طول ۷۰ سانتی‌متر، ضخامت ۱ سانتی‌متر و هم‌عرض کانال به کار گرفته شد. این صفحات دارای روزنه‌های دایره‌ای شکل، به قطر ۱ سانتی‌متر با آرایش زیگزاگی و نسبت‌های تخلخل ۴۰ و ۵۰ درصدی است (۳، ۸ و ۱۶). برای مجهز کردن شیب‌شکن مایل به صفحه مشبک افقی، این صفحات در لبه شیب‌شکن به موازات کف بستر پایین دست قرار داده شد. صفحه مشبک قائم نیز مطابق مطالعات دانشفراز و همکاران (۵ و ۶) به فاصله ۱/۲۵ متر از لبه انتهایی سطح شیب‌دار شیب‌شکن قرار داده شد. نمادینی از مدل آزمایشگاهی تحقیق حاضر در شکل (۱) نشان داده شده است.

در هر آزمایش با روشن کردن پمپ و با در نظر گرفتن جریان در بالادست شیب‌شکن به صورت زیربحرانی، دبی مربوطه با استفاده از روماترهای نصب شده روی فلوم با خطای نسبی ۲ درصد تنظیم شد. بعد از پایداری شرایط جریان، عمق بالادست و پایین دست شیب‌شکن برای مدل‌ها اندازه‌گیری شده و طول خیس شده صفحات مشبک نیز در شیب‌شکن مایل مجهز به صفحه مشبک افقی اندازه‌گیری شدند. عمق بالادست و پایین دست شیب‌شکن با استفاده از یک



شکل ۱. نمادین مدل آزمایشگاهی تحقیق حاضر

پایین دست و استهلاك انرژی در هر دو شیب‌شکن مایل مجهز به صفحه مشبک افقی و قائم به صورت زیر قابل بیان است:

$$y_d, \Delta E = f_1(\mu, \rho, g, q, \Delta Z, \theta, p, y_c, y_u, E_u) \quad (1)$$

در این رابطه،  $\mu$  لزوجت دینامیکی،  $\rho$  جرم مخصوص آب،  $g$  شتاب گرانش زمین،  $q$  دبی واحد عرض،  $\Delta Z$  ارتفاع شیب‌شکن،  $\theta$  زاویه شیب شیب‌شکن،  $p$  نسبت تخلخل صفحه مشبک،  $y_u$  عمق بالادست شیب‌شکن،  $y_c$  عمق بحرانی،  $\Delta E$  استهلاك انرژی کل ( $\Delta E = E_u - E_d$ )، انرژی کل در بالادست شیب‌شکن ( $E_u = \Delta Z + 1.5y_c$ )، انرژی کل در پایین دست شیب‌شکن و  $y_d$  عمق پایین دست شیب‌شکن هستند.

با در نظر گرفتن روش پی باکینگهام، انتخاب  $g, \rho$  و  $y_u$  به عنوان پارامترهای تکراری و پس از ساده سازی، عمق نسبی پایین دست و استهلاك انرژی نسبی تابعی از پارامترهای مستقل به صورت روابط (۲) و (۳) قابل بیان می‌شود:

$$\frac{y_d}{\Delta Z} = f_2\left(\frac{y_c}{\Delta Z}, p, \theta, Fr_u = \frac{v_u}{\sqrt{g y_u}}\right), \quad (2)$$

$$Re_u = \frac{v_u y_u \rho}{\mu} = \frac{q y_u \rho}{y_u \mu} = \frac{q \rho}{\mu}$$

$$\frac{\Delta E}{E_u} = f_3\left(\frac{y_c}{\Delta Z}, p, \theta, Fr_u, Re_u\right) \quad (3)$$

در روابط حاصل شده،  $Fr_u$  عدد فرود بالادست شیب‌شکن

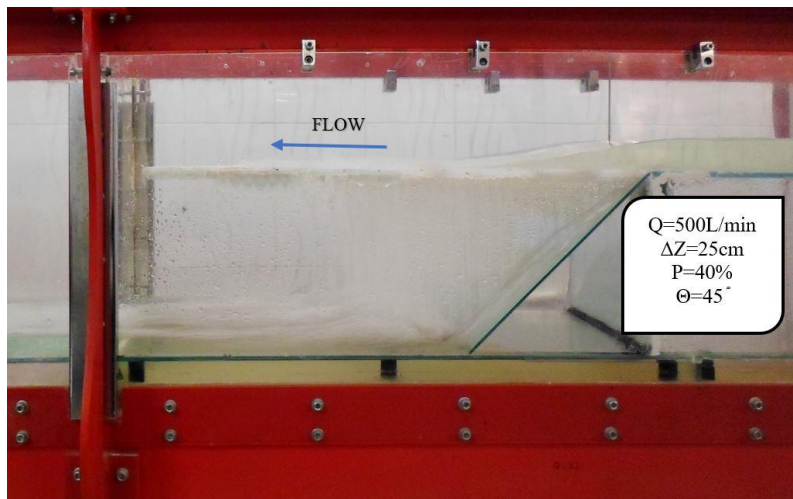
عمق سنج نقطه‌ای با دقت  $\pm 1$  میلی‌متر در ۵ تا ۷ نقطه از مقطع عرضی (بسته به تلاطم موجود در جریان) اندازه‌گیری شده و مقدار متوسط آنها به عنوان عمق نهایی در نظر گرفته شد. طول خیس شده نیز با استفاده از یک خط‌کش با دقت یک میلی‌متر اندازه‌گیری شد. شکل‌های (۲) و (۳) نمایی از مدل‌های آزمایشگاهی تحقیق حاضر را نشان می‌دهد.

در تحقیق حاضر در کل ۱۸۰ آزمایش متفاوت برای تمامی مدل‌های آزمایشگاهی انجام شد. در هر مدل آزمایشگاهی تعداد ۶ دبی با محدوده ۲۰۰ تا ۷۰۰ لیتر بر دقیقه با گام ۱۰۰ لیتر بر دقیقه صورت گرفت که تعداد ۳۶ آزمایش مربوط به شیب‌شکن مایل ساده با دو ارتفاع و سه زاویه متفاوت، ۷۲ آزمایش برای شیب‌شکن مایل مجهز به صفحات مشبک قائم با دو تخلخل متفاوت و ۷۲ آزمایش نیز برای شیب‌شکن مایل مجهز به صفحات مشبک افقی با دو تخلخل متفاوت است.

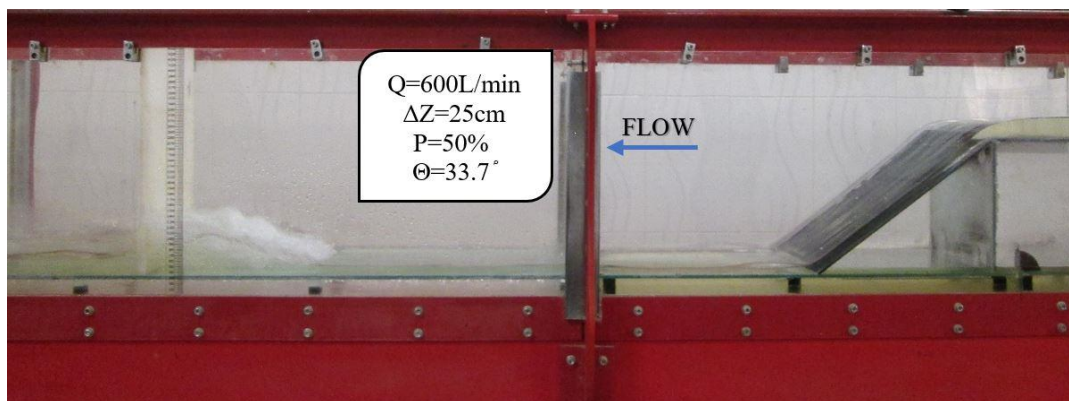
محدوده متغیرهای اندازه‌گیری شده برای شیب‌شکن مایل مجهز به صفحات مشبک افقی و قائم در جدول ۱ ارائه شده است.

### آنالیز ابعادی

با در نظر گرفتن شکل‌های (۲)، (۳) و خصوصیات سیال، پارامترهای مؤثر در مدل آزمایشگاهی برای بررسی عمق



شکل ۲. نمایی از مدل آزمایشگاهی صفحات مشبک افقی



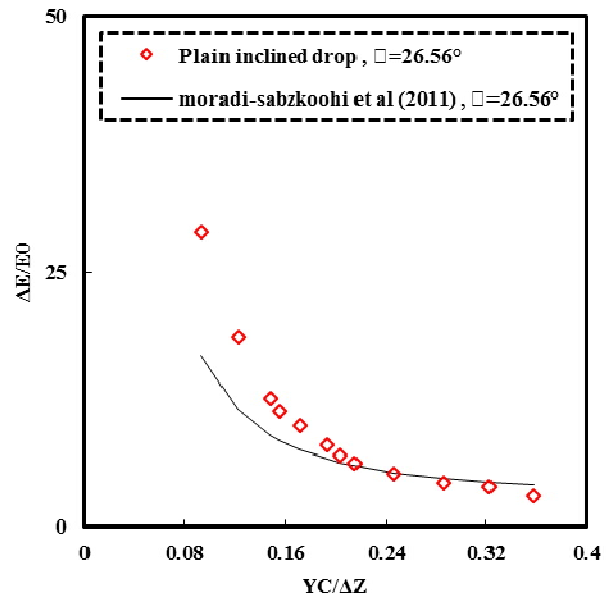
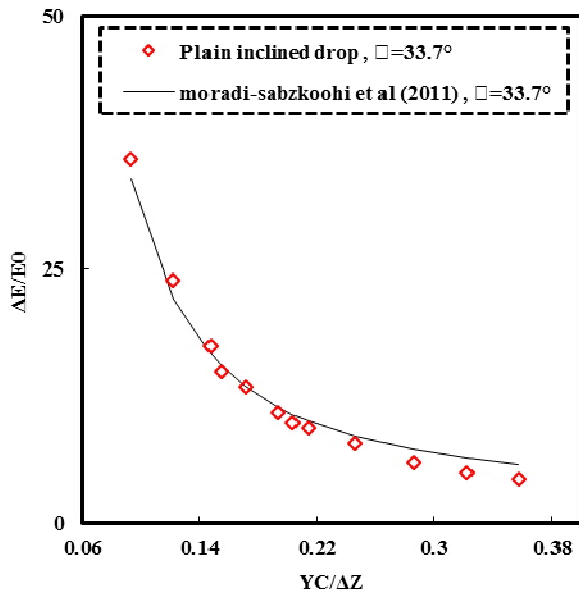
شکل ۳. نمای شیب شکن مایل مجهز به صفحات مشبک قائم

جدول ۱. محدوده متغیرهای اندازه گیری شده شیب شکن مایل مجهز به صفحه مشبک افقی و قائم در هر سه زاویه

محدوده متغیرهای اندازه گیری شده				متغیرهای اندازه گیری شده
تخلخل ۵۰ درصد		تخلخل ۴۰ درصد		
صفحه مشبک قائم	صفحه مشبک افقی	صفحه مشبک قائم	صفحه مشبک افقی	
۲/۹۹-۶/۲۱	۲/۹۹-۶/۲۱	۲/۹۷-۶/۲	۲/۹۷-۶/۲	عمق بالادست شیب شکن (cm)
۱/۴۷-۳/۷۲	۰/۷۲-۳/۵	۱/۴۹-۳/۴۷	۰/۷۴-۴/۱۲	عمق پایین دست شیب شکن (cm)
-	۱۲/۵-۳۵	-	۱۳/۵-۴۰	طول نسبی خیس شده صفحات (cm)

بنابراین می توان از اثر  $Re_{u1}$  صرف نظر کرد (۱۷). همچنین از تأثیرات  $Fr_{u1}$  به دلیل زیر بحرانی بودن جریان در بالادست و محدوده کم آن ( $0.68 < Fr_{u1} < 0.8$ ) صرف نظر شد (۱۸). پس از ساده سازی و صرف نظر کردن از برخی

مایل،  $Re_{u1}$  عدد رینولدز بالادست شیب شکن مایل و  $\frac{y_c}{\Delta Z}$  عمق بحرانی نسبی بوده و محدوده آن از ۰/۰۹ تا ۰/۳۵ است. با توجه به اینکه محدوده عدد رینولدز در تمامی مدل های آزمایشگاهی بین ۹۱۸۶۳-۵۳۰۷۸ و جریان کاملاً متلاطم بوده



شکل ۴. مقایسه تغییرات استهلاك انرژی نسبی شیب‌شکن مایل ساده تحقیق حاضر با تحقیقات مرادی سبزوکی و همکاران (۱۱): الف) زاویه ۲۶/۵۶ درجه و ب) زاویه ۳۳/۷ درجه

نتایج مربوط به پارامترهای عمق نسبی پایین‌دست و استهلاك انرژی نسبی کل در زیر به صورت مجزا بحث و بررسی قرار گرفته است.

#### عمق نسبی پایین‌دست

با در نظر گرفتن رابطه (۴)، مقادیر عمق نسبی پایین‌دست به ازای سه زاویه و دو تخلخل صفحات مشبک در مقابل عمق بحرانی نسبی در شکل (۵) نشان داده شده است.

همان‌گونه که در شکل (۵) مشاهده می‌شود برای شیب‌شکن مایل ساده و مجهز به صفحه مشبک افقی و قائم، افزایش عمق بحرانی نسبی سبب افزایش عمق نسبی پایین‌دست می‌شود و به‌کارگیری صفحات مشبک افقی و قائم سبب افزایش عمق نسبی پایین‌دست در مقایسه با شیب‌شکن مایل ساده شده است. در شیب‌شکن مایل ساده در یک عمق بحرانی نسبی ثابت (در یک دبی ثابت با ارتفاع ثابت) با افزایش زاویه عمق نسبی پایین‌دست افزایش می‌یابد که مرادی سبزوکی و همکاران (۱۱) نیز در مطالعات خود آن را گزارش کرده‌اند. همچنین ملاحظه می‌شود که شیب‌شکن مایل مجهز به صفحات

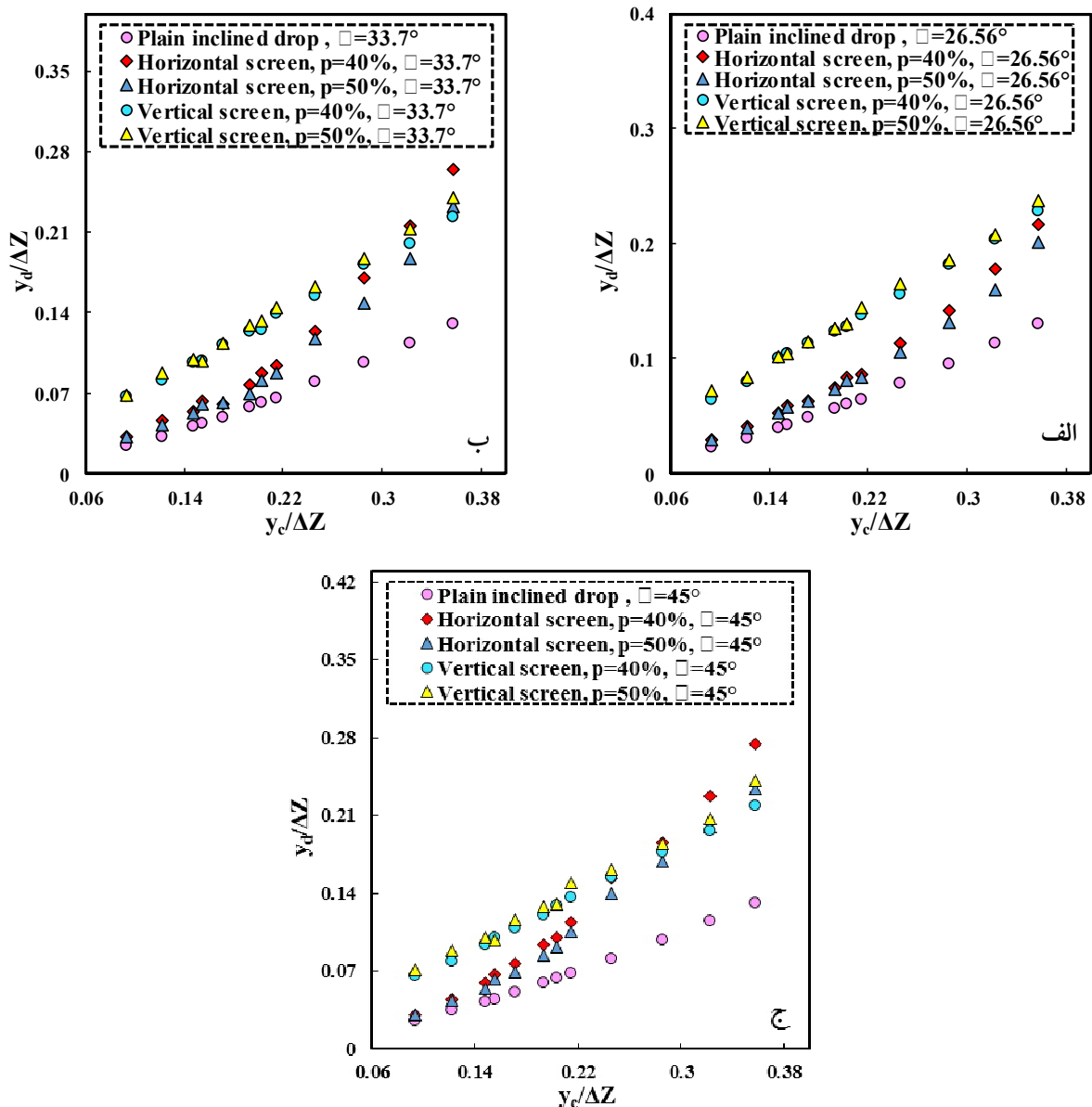
پارامترهای بی‌بعد روابط (۲) و (۳) به صورت روابط (۴) و (۵) اصلاح شد:

$$\frac{y_d}{\Delta Z} = f_4\left(\frac{y_c}{\Delta Z}, p, \theta\right) \quad (4)$$

$$\frac{\Delta E}{E_u} = f_5\left(\frac{y_c}{\Delta Z}, p, \theta\right) \quad (5)$$

#### نتایج و بحث

در تحقیق حاضر برای بررسی استهلاك انرژی نسبی کل شیب‌شکن‌های مایل مستطیلی مجهز به صفحات مشبک افقی و قائم آزمایش‌های متعددی انجام شد. آزمایش‌های اولیه روی شیب‌شکن مایل ساده انجام شد و نتایج حاصل از آن با نتایج حاصل از مطالعات مرادی سبزوکی و همکاران (۱۱) مورد مقایسه قرار گرفت (شکل ۴). مطابق شکل (۴) استهلاك انرژی نسبی کل تحقیق حاضر در مقایسه با نتایج مطالعات مرادی سبزوکی و همکاران (۱۱) دارای تطابق و نزدیکی مناسبی بود به‌گونه‌ای که در زوایای سطح شیب‌دار ۲۶/۵۶ و ۳۳/۷ درجه نسبت به هم دارای ضریب تعیین ۰/۹۹۷ است. برای شیب‌شکن مایل مجهز به صفحه مشبک افقی و قائم نیز



شکل ۵. تغییرات عمق نسبی پایین دست شیب شکن مایل مجهز به صفحه مشبک قائم و افقی و شیب شکن مایل ساده:

الف) زاویه  $26/56^\circ$  درجه، ب) زاویه  $33/7^\circ$  درجه و ج) زاویه  $45^\circ$  درجه

تخلخل، می توان به طول نسبی خیس شده در شیب شکن مایل مجهز به صفحه مشبک افقی اشاره کرد. در مواقعی که این طول خیس شده بیشتر از طول شیب شکن مایل باشد در این صورت جت ریزشی روی سطح افقی ریخته و تلاطم ایجاد شده را افزایش می دهد. می توان نتیجه گرفت که در شیب شکن مایل مجهز به صفحه مشبک افقی، افزایش عمق نسبی پایین دست رابطه مستقیمی با نسبت طول خیس شده به طول

مشبک قائم در هر سه زاویه دارای عمق نسبی پایین دست بیشتری نسبت به شیب شکن مایل مجهز به صفحات مشبک افقی است. همچنین در هر سه زاویه با افزایش عمق بحرانی نسبی، برای هر دو مدل شیب شکن های مایل مجهز به صفحات مشبک قائم و افقی، مقادیر عمق نسبی پایین دست به هم نزدیک تر می شوند. با افزایش زاویه این نزدیکی افزایش می یابد. از دلایل این نزدیک شدن مقادیر عمق نسبی پایین دست در هر دو

جدول ۲. افزایش نسبی عمق پایین دست برای شیب شکن مایل مجهز به صفحه مشبک افقی و قائم در مقایسه با شیب شکن مایل ساده و متوسط عمق نسبی پایین دست

افزایش نسبی عمق پایین دست (%)				زاویه شیب شکن
درصد تخلخل صفحات مشبک				
تخلخل ۵۰ درصد		تخلخل ۴۰ درصد		
صفحه مشبک قائم	صفحه مشبک افقی	صفحه مشبک قائم	صفحه مشبک افقی	
۱۳۰	۳۵	۱۲۲	۴۱	$\theta = 26.56^\circ$
۱۲۴	۴۱	۱۱۵	۵۲	$\theta = 33.7^\circ$
۱۱۸	۴۹	۱۰۵	۶۴	$\theta = 45^\circ$

شیب دار (کاهش طول شیب شکن) و کاهش نسبت تخلخل صفحات مشبک، عمق نسبی پایین دست افزایش می یابد. این درحالی است که در جدول (۲) برای شیب شکن مایل مجهز به صفحه مشبک قائم با افزایش زاویه و کاهش نسبت تخلخل صفحه مشبک، عمق نسبی پایین دست کاهش یافته است. دلیل اصلی این کاهش در زوایای مربوطه تفاوت در مقادیر عمق نسبی پایین دست شیب شکن مایل ساده است که پیش تر بیان شد که افزایش زاویه شیب شکن مایل ساده منجر به افزایش عمق نسبی پایین دست می شود. برای درک بهتر این مطلب تمامی مدل های آزمایشگاهی شیب شکن مایل مجهز به صفحه مشبک قائم و افقی نسبت به شیب شکن مایل ساده با زاویه ۲۶/۵۶ درجه مقایسه شده و نتایج به شرح زیر است:

نتایج نشان می دهد که شیب شکن مایل مجهز به صفحه مشبک قائم در تخلخل ۴۰ درصد برای زوایای ۲۶/۵۶، ۳۳/۷ و ۴۵ درجه نسبت به شیب شکن مایل ساده با زاویه ۲۶/۵۶ درجه عمق نسبی پایین دست را به طور متوسط ۲/۰۷، ۲/۰۴ و ۲/۰۲ درصد افزایش می دهد در تخلخل ۵۰ درصد صفحات مشبک نیز این میزان افزایش نسبت به شیب شکن مایل ساده با زاویه ۲۶/۵۶ درجه به ترتیب ۲/۱۳۷، ۲/۱۴۰ و ۲/۱۴۱ درصد است. که این مقادیر نشان می دهند که زاویه سطح شیب دار تأثیر چندانی در عمق نسبی پایین دست شیب شکن مایل مجهز به صفحه مشبک قائم ندارد. برای شیب شکن مایل مجهز به

شیب شکن مایل دارد. این درحالی است که تغییر زاویه (طول شیب شکن) تأثیر چندانی بر افزایش عمق نسبی پایین دست در شیب شکن مایل مجهز به صفحات مشبک قائم ندارد.

از آنجایی که به کارگیری صفحات مشبک افقی و قائم با مکانیزم تداخل آب و هوا، تلاطم در پایین دست شیب شکن را افزایش داده و موجب افزایش عمق نسبی پایین دست در مقایسه با شیب شکن مایل ساده شده است، لذا درصد افزایش عمق نسبی شیب شکن مایل مجهز به صفحه مشبک افقی و قائم نسبت به شیب شکن مایل ساده محاسبه شده و مقادیر آن در جدول (۲) آورده شده است.

برای به دست آوردن درصد افزایش نسبی عمق پایین دست شیب شکن مایل مجهز به صفحه مشبک قائم و افقی نسبت به شیب شکن مایل ساده از رابطه زیر استفاده شده است:

$$(۶) \quad \text{درصد افزایش نسبی عمق پایین دست} = (DX/DP) \times 100$$

در رابطه (۶): DX عمق نسبی پایین دست شیب شکن مایل مجهز به صفحه مشبک قائم یا افقی با زاویه n و DP عمق نسبی پایین دست شیب شکن مایل ساده با زاویه n است.

از مقادیر جدول (۲) می توان استنباط کرد که شیب شکن مایل مجهز به صفحه مشبک قائم در مقایسه با شیب شکن مایل مجهز به صفحه مشبک افقی عمق نسبی پایین دست شیب شکن را به صورت قابل ملاحظه ای افزایش داده است. در شیب شکن مایل مجهز به صفحه مشبک افقی، با افزایش زاویه سطح



جدول ۳. ضرایب ثابت رابطه تجربی عمق نسبی پایین دست برای شیب شکن مایل مجهز به صفحه مشبک افقی و قائم

معیارهای ارزیابی		ضرایب ثابت رابطه (۴)					نوع شیب شکن مایل
NRMSE (%)	R <sup>2</sup>	e	d	c	b	a	
۱/۸۹	۰/۹۹۶	۰/۰۲۶۵	۰/۲۳۵۵	-۰/۰۱۹۳	۱/۱۹	۰/۸۳	مجهز به صفحه مشبک قائم
۶/۶۷	۰/۹۹۳	۰/۰۱۵	-۰/۵۱۵۸	۰/۴۳۹	۱/۹۲۸	۱/۲۹۷۳	مجهز به صفحه مشبک افقی

بحرانی نسبی و به‌ازای سه زاویه و دو تخلخل صفحات در شکل (۶) نشان داده شده است. در شکل (۶) مشاهده می‌شود که برای شیب شکن مایل ساده و شیب شکن مایل مجهز به صفحه مشبک قائم، با افزایش عمق بحرانی نسبی، استهلاک انرژی نسبی کل کاهش می‌یابد و به‌کارگیری صفحات مشبک قائم سبب افزایش چشمگیر استهلاک انرژی نسبی کل نسبت به شیب شکن مایل ساده شده است. این درحالی است که برای شیب شکن مایل مجهز به صفحه مشبک افقی، روند تغییرات استهلاک انرژی نسبی کل در مقابل عمق بحرانی نسبی یکنواخت نبوده و به‌صورت نزولی و صعودی است.

در شیب شکن مایل مجهز به صفحه مشبک افقی برای زوایای سطح شیب‌دار ۲۶/۵۶ و ۳۳/۷ درجه دو ناحیه نزولی و صعودی مشاهده می‌شود. ناحیه نزولی در هر دو زاویه تا جایی ادامه دارد که جت ریزشی روی انتهای سطح شیب‌دار می‌ریزد. با افزایش عدد فرود بالادست، که سبب افزایش طول نسبی خیس شده صفحات مشبک می‌شود و به‌تبع آن جت ریزشی روی سطح افقی می‌ریزد، ارتفاع جت ریزشی افزایش یافته و سبب افزایش تداخل آب‌وهوا و تلاطم می‌شود. لذا همین امر باعث افزایش استهلاک انرژی در بازه صعودی شده است.

برای زاویه سطح شیب‌دار ۴۵ درجه نیز سه ناحیه نزولی، صعودی و نزولی مشاهده می‌شود. ناحیه اول صعودی مربوط به حالتی است که جت ریزشی روی سطح شیب‌دار می‌ریزد. از آنجایی که زاویه ۴۵ درجه دارای طول سطح شیب‌دار کمتری نسبت به دو زاویه دیگر است، لذا در این زاویه نسبت به دو زاویه دیگر بازه مربوط به قسمت نزولی محدوده کوچکی دارد.

صفحه مشبک افقی نیز در تخلخل ۴۰ درصد برای زوایای مذکور نسبت به شیب شکن مایل ساده با زاویه ۲۶/۵۶ درجه عمق نسبی پایین دست را به‌طور متوسط و به‌ترتیب ۱/۴۵، ۱/۶۴ و ۱/۸۲ درصد افزایش می‌دهد در تخلخل ۵۰ درصد صفحات مشبک نیز این میزان افزایش نسبت به شیب شکن مایل ساده با زاویه ۲۶/۵۶ درجه به‌ترتیب ۱/۳۷، ۱/۴۹ و ۱/۶۳ درصد به‌دست آمد. با توجه به مقادیر می‌توان نتیجه گرفت که با افزایش زاویه سطح شیب‌دار، عمق نسبی پایین دست شیب شکن مایل مجهز به صفحه مشبک افقی افزایش یافته است.

برای تخمین عمق نسبی پایین دست صفحات مشبک افقی و قائم، می‌توان رابطه‌ای به‌صورت زیر در نظر گرفت:

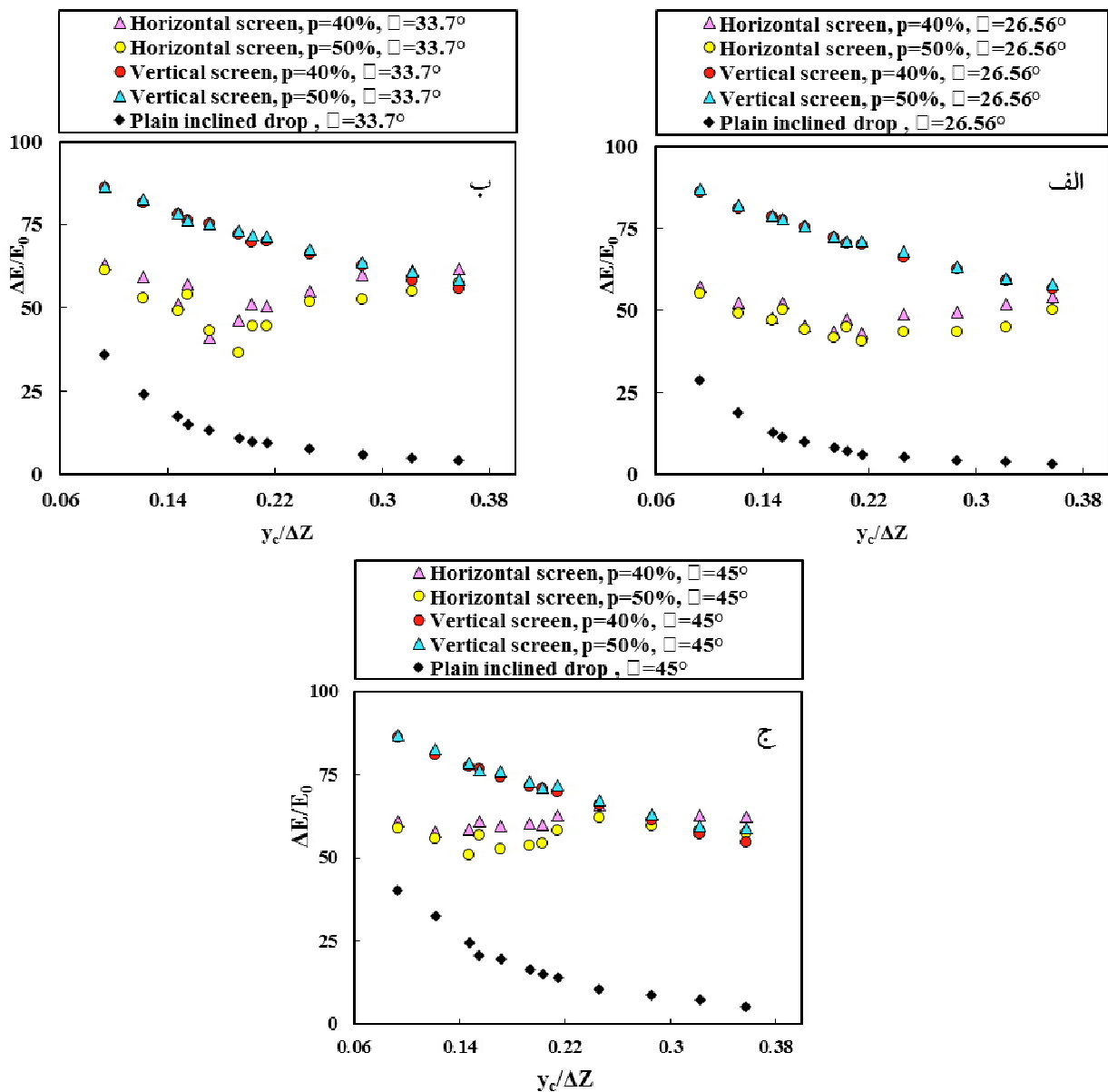
$$\frac{Y_d}{\Delta Z} = a \left( \frac{Y_c}{\Delta Z} \right)^b (\theta)^c (p)^d + e \quad (7)$$

در رابطه فوق  $a$ ،  $b$ ،  $c$ ،  $d$  و  $e$  ضرایب ثابتی هستند که با استفاده از دستور Solver در اکسل برای هر دو مدل شیب شکن مایل مجهز به صفحات مشبک افقی و قائم به‌دست آمده و در جدول (۳) ارائه شده است. لازم به‌ذکر است که برای ارائه روابط از معیارهای ارزیابی ضریب تعیین و خطای جذر میانگین مربعات نرمال‌سازی شده استفاده شد.

همان‌گونه که مشاهده می‌شود برای هر دو مدل آزمایشگاهی معیارهای ارزیابی دارای مقادیر قابل قبول بوده و می‌توانند تخمین درستی از داده‌های آزمایشگاهی تحقیق حاضر را ارائه دهند.

### استهلاک انرژی نسبی کل

بر اساس آنالیز ابعادی استهلاک انرژی نسبی کل در مقابل عمق

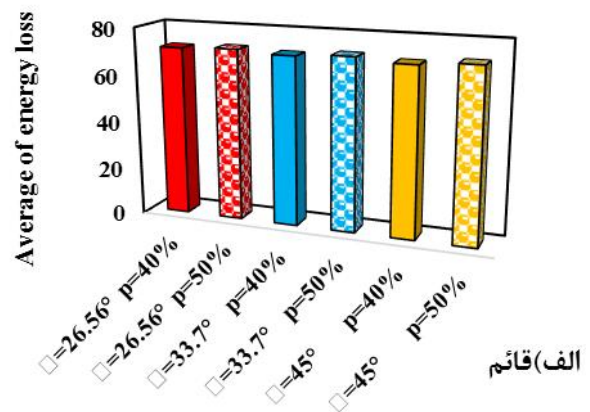
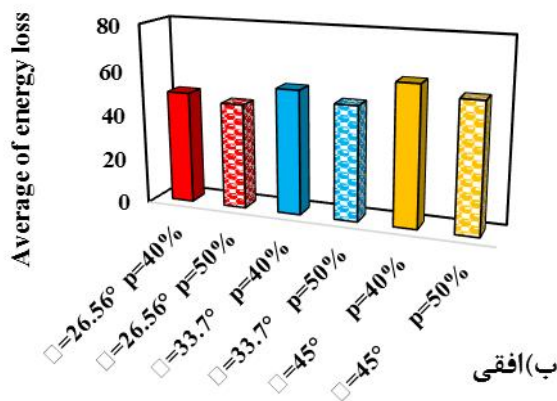


شکل ۶. تغییرات استهلاك انرژی نسبی شیب‌شکن مایل مجهز به صفحه مشبک قائم و افقی و شیب‌شکن مایل ساده:

الف) زاویه ۲۶/۵۶ درجه، ب) زاویه ۳۳/۷ درجه و ج) زاویه ۴۵ درجه

در شیب‌شکن مایل مجهز به صفحه مشبک افقی، افزایش زاویه سطح شیب‌دار سبب کاهش طول سطح شیب‌دار و کاهش درصد تخلخل سبب افزایش طول خیس شده صفحه مشبک می‌شود، لذا در این مدل، با افزایش زاویه سطح شیب‌دار و کاهش نسبت تخلخل صفحه مشبک، جت ریزشی روی بستر افقی قرار گرفته و سبب افزایش تلاطم و افزایش استهلاك انرژی می‌شود. این افزایش در اعماق بحرانی نسبی

ناحیه دوم صعودی مربوط به ریزش جریان روی قسمت افقی و پایین‌دست سطح شیب‌دار بوده و در ناحیه سوم نزولی، از آنجایی که جت ریزشی روی بستر افقی می‌ریزد و با توجه به اینکه با افزایش عمق بحرانی نسبی انرژی مخصوص پایین‌دست افزایش می‌یابد، لذا استهلاك انرژی نسبی کل روند کاهشی پیدا می‌کند (مطابق روند کاهشی شیب‌شکن مایل ساده و مجهز به صفحه مشبک قائم).



شکل ۷. متوسط استهلاك انرژی نسبی برای شیب‌شکن مایل مجهز به صفحه مشبک: الف) قائم و ب) افقی

تأثیر چندانی نداشته و بیشترین استهلاك انرژی در صفحات مشبک با تخلخل ۵۰ درصدی اتفاق افتاده است.

### نتیجه‌گیری کلی

در تحقیق حاضر در مجموع ۱۸۰ آزمایش متفاوت روی شیب‌شکن مایل ساده و مجهز به صفحه مشبک افقی و قائم، برای بررسی استهلاك انرژی جریان انجام شد. آزمایش‌ها در دو ارتفاع شیب‌شکن، دو نسبت تخلخل صفحه مشبک و سه زاویه سطح شیب‌دار شیب‌شکن مایل برای صفحه مشبک افقی و قائم در نظر گرفته شد و نتایج حاصل از هر دو مدل با هم مورد مقایسه و ارزیابی قرار گرفت. در هر دو مدل مورد آزمایش افزایش عمق بحرانی نسبی، سبب افزایش عمق نسبی پایین دست می‌شود. افزایش زاویه سطح شیب‌دار، تأثیری بر عمق نسبی پایین دست و استهلاك انرژی نسبی کل برای شیب‌شکن مایل مجهز به صفحه مشبک قائم ندارد ولی با افزایش درصد تخلخل صفحات مشبک، هر دو پارامتر در مقایسه با شیب‌شکن مایل ساده افزایش قابل ملاحظه‌ای پیدا می‌کند. برای شیب‌شکن مایل مجهز به صفحه مشبک افقی نیز استهلاك انرژی نسبی کل با افزایش زاویه سطح شیب‌دار و کاهش درصد تخلخل صفحات مشبک افزایش می‌یابد، به‌گونه‌ای که بیشترین استهلاك انرژی نسبی کل در زاویه سطح شیب‌دار ۴۵ درجه و درصد تخلخل ۴۰ درصدی اتفاق می‌افتد.

بالا به‌گونه‌ای است که در مقایسه با شیب‌شکن مایل مجهز به صفحه مشبک قائم بیشتر است. به بیان دیگر، استهلاك انرژی نسبی شیب‌شکن مایل مجهز به صفحه مشبک افقی تابعی از طول خیس شده صفحات مشبک نیز است. در کل می‌توان گفت که تغییر زاویه سطح شیب‌دار شیب‌شکن تأثیری بر استهلاك انرژی شیب‌شکن مایل مجهز به صفحه مشبک قائم نداشته و بیشترین استهلاك انرژی در صفحه مشبک با تخلخل ۵۰ درصد اتفاق می‌افتد. در مقابل برای شیب‌شکن مایل مجهز به صفحه مشبک افقی، بیشترین استهلاك انرژی در زاویه سطح شیب‌دار ۴۵ درجه و درصد تخلخل صفحه مشبک ۴۰ درصد اتفاق می‌افتد.

برای درک بهتر تأثیر زاویه شیب‌شکن و تخلخل صفحات مشبک افقی و قائم در میزان استهلاك انرژی نسبی کل، مقادیر متوسط آنها به‌ازای تمامی مقادیر عمق بحرانی نسبی محاسبه شده و در شکل (۷) نشان داده شده است.

در شکل (۷) مشاهده می‌شود که بیشترین استهلاك انرژی در شیب‌شکن مایل مجهز به صفحات مشبک افقی در تخلخل ۴۰ درصدی با زاویه شیب‌شکن ۴۵ درجه است. همچنین استنباط می‌شود که با افزایش زاویه و کاهش تخلخل صفحات مشبک در این مدل‌ها استهلاك انرژی افزایش می‌یابد. برای شیب‌شکن مایل مجهز به صفحه مشبک قائم نیز ملاحظه می‌شود که در هر دو تخلخل صفحات مشبک زاویه شیب‌شکن

است. هرچه طول خیس شده صفحات مشبک بیشتر از طول شیب‌شکن باشد، استهلاک انرژی افزایش می‌یابد.

برای شیب‌شکن مایل مجهز به صفحه مشبک افقی می‌توان بیان کرد که در یک عمق بحرانی نسبی ثابت، استهلاک انرژی جریان وابسته به طول خیس شده صفحات مشبک و طول شیب‌شکن

### منابع مورد استفاده

1. Aslankara, V. 2007. Experimental investigation of tailwater effect on the energy dissipation through screens (Doctoral dissertation, MS thesis, Middle East Technical Univ. Ankara, Turkey).
2. 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).
3. Daneshfaraz, R., S. Sadeghfam and A. Ghahramanzadeh. 2017. Three-dimensional numerical investigation of flow through screens as energy dissipators. *Canadian Journal of Civil Engineering* 44(10): 850-859.
4. Daneshfaraz, R., S. Sadeghfam and A. Rezazadeh Joudi. 2017. 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. DOI: 10.22092/ARIDSE.2017.109616.
5. Daneshfaraz, R., S. Sadeghfam and A. Tahni. 2019. 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.
6. Daneshfaraz, R., S. Sadeghfam and V. Hasanniya. 2019a. Experimental investigation of energy dissipation the vertical drops equipped with a horizontal screen with the supercritical flow. *Iranian Journal of Soil and Water Research*. doi: 10.22059/ijswr.2019.269301.668053. (In Farsi)
7. Daneshfaraz, R., V. hasanniya, R. Mirzaei and A. Bazyar. 2019. Experimental investigating effect of positive slope of the horizontal screen on hydraulic characteristics of vertical drop. *Iranian Journal of Soil and Water Research* doi: 10.22059/ijswr.2019.283685.668238.
8. Hasannia, V., R. Daneshfaraz and S. Sadeghfam. 2019. Experimental investigating on hydraulic parameters of vertical drop equipped with combined screens. *Amirkabir Journal of Civil Engineering*. doi: 10.22060/ceej.2019.16431.6223.
9. Kabiri-Samani, A. R., E. Bakhshian and M. R. Chamani. 2017. Flow characteristics of grid drop-type dissipate. *Flow Measurement and Instrumentation* 54: 298-306.
10. Kindsvater, C. E. 1944. The hydraulic jump in sloping channels. *Transactions ASCE* 109: 1107-1154.
11. Moradi Sabz Koohi, A., S. M. Kashefipour and M. Bina, M. 2011. Experimental comparison of energy dissipation on drop structures. *JWSS-Isfahan University of Technology* 15(56): 209-223.
12. Peterka, A. J. 1958. Hydraulic design of Stilling Basins and Energy Dissipaters Engineering Monograph No. 25. US Bureau of Reclamation, Denver Colorado.
13. Rajaratnam, N. 1976. Turbulent Jets (Vol. 5). Elsevier.
14. Rajaratnam, N. and K. I. Hurlig. 2000. Screen-type energy dissipator for hydraulic structures. *Journal of Hydraulic Engineering* 126(4): 310-312.
15. Sadeghfam, S., A. A. Akhtari, R. Daneshfaraz and G. Tayfur. 2015. Experimental investigation of screens as energy dissipaters in submerged hydraulic jump. *Turkish Journal of Engineering and Environmental Sciences* 38(2): 126-138.
16. Sadeghfam, S., R. Daneshfaraz, R. Khatibi and O. Minaei. 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.
17. Sholichin, M. and S. Akib. 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.
18. Wagner, W. E. 1956. Hydraulic Model Studies of the Check Intake Structure-Potholes East Canal.

## Experimental Investigation of Performance of Horizontal and Vertical Screen on Energy Dissipation of Inclined Drop

R. Daneshfaraz\*, M. Majedi Asl and A. Bazyar<sup>1</sup>

(Received: July 29-2019; Accepted: October 2-2019)

### Abstract

Inclined drop is one of the supercritical flow producers used in open channels to reduce slope and elevation of the ground. Given that the application of horizontal and vertical screen in the downstream of this drop as an energy dissipater can be effective in the energy dissipation of flow, in the present study, 180 different experiments were performed to investigate the energy dissipation of flow. The results showed that the angle of the drop had no marginal impact on energy dissipation and the relative depth of downstream of inclined drop equipped with a vertical screen, but increasing the porosity of screen caused enhancement in both parameters. Also, for the inclined drop equipped with a horizontal screen, by increasing angle and decreasing the porosity of screen, the energy dissipation and relative depth of downstream were raised. Also, for inclined drop equipped with a horizontal screen, by increasing the angle and decreasing the porosity of screen, the energy dissipation and relative depth of downstream were enhanced. For a constant relative critical depth, the relative depth of downstream and the energy dissipation of the inclined drop equipped with a horizontal screen considered the function of the wetted length of screen and length of the drop. For vertical screen, it is only a function of screen porosity.

**Keywords:** Energy dissipation, Wetted length of screen, Angle of inclined drop, Relative depth of downstream.

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

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