



بررسی آزمایشگاهی پارامترهای هیدرولیکی شیب شکن قائم مجهز به صفحات مشبک ترکیبی

دود حسن نیا^۱، رسول دانشفراز^{۲*}، سینا صادق فام^۳

^۱ دانشجوی کارشناسی ارشد عمران آب و سازه‌های هیدرولیکی، دانشگاه مراغه، مراغه، ایران
^۲ استاد گروه مهندسی عمران، دانشکده، فنی و مهندسی، دانشگاه مراغه، مراغه، ایران
^۳ استادیار گروه مهندسی عمران، دانشکده، فنی و مهندسی، دانشگاه مراغه، مراغه، ایران

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۳۹۸-۰۳-۰۶
بازنگری: ۱۳۹۸-۰۳-۲۷
پذیرش: ۱۳۹۸-۰۳-۲۹
ارائه آنلاین: ۱۳۹۸-۰۴-۱۳

کلمات کلیدی:

سازه روگذر
مستهلك کننده انرژی
استهلاک انرژی
عمق بحرانی نسبی
درصد تخلخل

خلاصه: در بسیاری از سازه های روگذر جریان از جمله شیب شکن های قائم، استفاده از مستهلک کننده انرژی جریان و بررسی تاثیر آن بر روی پارامترهای هیدرولیکی از مهم ترین مباحث هیدرولیکی می باشد. در تحقیق حاضر به بررسی آزمایشگاهی رفتار پارامترهای هیدرولیکی ناشی از بکارگیری صفحات مشبک به صورت ترکیبی (افقی-قائم) در شیب شکن های قائم پرداخته شده است. نتایج نشان داد که استفاده از صفحات مشبک به صورت ترکیبی در شیب شکن های قائم باعث کاهش طول نسبی تلاطم و افزایش عمق نسبی استخر و افزایش استهلاک انرژی نسبی نسبت به شیب شکن قائم ساده می گردد. همچنین مشخص گردید که با افزایش پارامتر عمق بحرانی نسبی پارامترهای طول نسبی خیس شده صفحات مشبک قائم، طول نسبی تلاطم و عمق نسبی استخر، افزایش و استهلاک انرژی نسبی کاهش می یابد. بررسی میزان استهلاک انرژی کل سیستم توسط مولفه های مستهلک کننده انرژی جریان نیز نشان داد که با افزایش عمق بحرانی نسبی عملکرد مولفه شیب شکن قائم توام با صفحه مشبک افقی کاهش و عملکرد مولفه صفحه مشبک قائم افزایش می یابد. این در حالی است که سهم مولفه شیب شکن قائم توام با صفحه مشبک افقی بیش از ۸۲ درصد استهلاک انرژی کل سیستم است. افزایش درصد تخلخل صفحات مشبک نیز باعث کاهش پارامترهای طول نسبی خیس شده صفحات مشبک افقی و قائم، طول نسبی تلاطم و عمق نسبی استخر و افزایش استهلاک انرژی نسبی گردید.

۱- مقدمه

قائم استفاده نمود. این نوع از مستهلک کننده های انرژی معمولاً به دو صورت افقی و قائم در پایین دست سازه های روگذر جریان مورد استفاده قرار می گیرند. صفحات مشبک افقی با تکه تکه کردن جت در حال سقوط [۳، ۴] و صفحات مشبک قائم با تشکیل پرش هیدرولیکی باعث کاهش انرژی جریان می گردند [۵].

در گذشته رفتار پارامترهای هیدرولیکی شیب شکن های قائم از جمله پروفیل سطح بالادست و پایین دست جت در حال سقوط، عمق استخر، عمق پایین دست و استهلاک انرژی جریان توسط محققینی همچون (مور ۱۹۴۳، وایت ۱۹۴۳، رند ۱۹۵۵، گیل ۱۹۷۹، راجاراتنام و چمنی ۱۹۹۵، لین و همکاران ۲۰۰۷) مورد

شیب شکن های قائم یکی از سازه های رایج مورد استفاده در کانال های روباز می باشند که با استفاده از انتقال ناگهانی آب باعث کاهش شیب زمین به شیب طراحی می گردد. انتقال ناگهانی و فرو افتادن آب بالادست بر روی کف پایین دست در این سازه ها باعث کاهش انرژی جریان می گردد [۱، ۲]. با این وجود شیب شکن های قائم نیازمند سازه ای جهت کاهش انرژی جریان در پایین دست می باشند. صفحات مشبک از جمله مستهلک کننده های انرژی جریان می باشند که می توان از آن ها در پایین دست شیب شکن های

* نویسنده عهده دار مکاتبات: daneshfaraz@yahoo.com



بررسی قرار گرفته است [۱، ۲، ۶-۹]. مور [۱] با اندازه گیری واقعی سرعت جریان در پایین دست شیب شکن قائم نشان داد که استهلاک انرژی در شیب شکن تابعی از عمق بحرانی نسبی است. همچنین این محقق دلیل اصلی استهلاک انرژی جریان در سازه شیب شکن قائم را برخورد جت ریزشی با کف کانال عنوان کرد. بعد از آن وایت [۶] با مطالعات تجربی دلیل دیگر استهلاک انرژی جریان را تلاطم در داخل استخر بیان نمود. عدد شیب شکن نیز به عنوان پارامتری موثر بر روی پارامترهای هیدرولیکی شیب شکن قائم توسط رند [۷] معرفی گردید. این محقق با استفاده از مطالعات تجربی خود و با استفاده از داده های مور [۱] روابطی برای پارامترهای مختلف شیب شکن قائم ارائه نمود. اما به دلیل فرضیات زیاد اعمال شده نتایج خوبی از معادلات ارائه شده حاصل نشد.

راجاراتنام و چمنی [۲] با استفاده از مطالعات آزمایشگاهی روابطی جهت تخمین عمق نسبی استخر و استهلاک انرژی نسبی ارائه دادند. همچنین این محققین دلیل وجود عمق استخر را برگشت جریان به سمت دیواره شیب شکن و دلیل استهلاک انرژی را برخورد جت به کف و تلاطم در داخل استخر معرفی کردند. وو و راجاراتنام تحقیقات خود را در زمینه تغییر عمق پایاب در شیب شکن های قائم با جریان زیر بحرانی در بالادست انجام دادند. آن ها محدوده تغییرات عمق پایاب را تا لبه شیب شکن و حتی بالاتر از آن انتخاب نمودند. نتایج حاصل از آزمایش ها نشان داد که رژیم جریان در این مدل می تواند به صورت جت با سقوط آزاد و یا به صورت جریان سطحی باشد. هانگ و همکاران [۱۰] با ایجاد سه شیب مثبت در پایین دست شیب شکن های قائم نشان دادند که با افزایش شیب پایین دست طول نسبی شیب شکن نیز نسبت به شیب صفر درجه افزایش می یابد. بعد از آن لیو و همکاران [۱۱] به بررسی تاثیر شیب بالادست شیب شکن قائم بر روی پارامترهای هیدرولیکی این سازه ها پرداختند و نشان دادند که با افزایش شیب بالادست طول نسبی شیب شکن افزایش و پارامترهای عمق نسبی استخر، عمق نسبی پایین دست و زاویه برخورد جت با کف کاهش می یابند. بررسی رفتار پارامترهای هیدرولیکی شیب شکن قائم ساده تحت شرایط جریان فوق بحرانی در بالادست نیز در سال ۲۰۱۹ توسط دانشفراز و همکاران مورد بررسی آزمایشگاهی قرار گرفت [۱۲]. نتایج این محققین نشان داد که افزایش عدد فرود در یک عمق بحرانی نسبی

ثابت، باعث افزایش طول نسبی شیب شکن، طول نسبی پاشیدگی، عمق نسبی پایین دست و استهلاک انرژی نسبی و کاهش عمق نسبی پایین دست می گردد. همچنین این محققین دریافتند که افزایش عمق بحرانی نسبی در یک عدد فرود ثابت باعث افزایش پارامترهای طول نسبی شیب شکن، طول نسبی پاشیدگی و عمق نسبی استخر و کاهش عمق نسبی پایین دست و استهلاک انرژی نسبی می گردد. برای اولین بار اسن و همکاران [۱۳] در سال ۲۰۰۴ از سازه‌ی الحاقی با هدف کاهش انرژی جریان در پایین دست شیب شکن های قائم استفاده کردند. این محققین با اضافه کردن پله با ارتفاع های مختلف در پایین دست شیب شکن قائم نشان دادند که استفاده از پله باعث افزایش پارامترهای عمق نسبی پایین دست و استهلاک انرژی نسبی نسبت به شیب شکن قائم ساده می گردد. کبیری سامانی و همکاران [۳] به بررسی رفتار پارامترهای هیدرولیکی شیب شکن های قائم مجهز به مستهلک کننده های شبکه ای و شیاری پرداختند و نشان دادند که استفاده از مستهلک کننده های شبکه ای و شیاری باعث افزایش پارامترهای عمق نسبی پایین دست، عمق نسبی استخر و استهلاک انرژی نسبی نسبت به شیب شکن قائم ساده می گردد. شریف و کبیری سامانی [۱۴] در ادامه تحقیقات کبیری سامانی و همکاران [۳] به بررسی تاثیر عمق پایین دست در رفتار پارامترهای هیدرولیکی شیب شکن های قائم مجهز به مستهلک کننده های شبکه ای و شیاری پرداختند. نتایج نشان داد که افزایش عمق نسبی پایین دست شیب شکن باعث کاهش تداخل آب با هوا، طول نسبی اولین جت برخوردی به استخر و طول نسبی تداخل جریان و افزایش عمق نسبی استخر می گردد.

در سال های اخیر تحقیقات بر روی مستهلک کننده جدیدی با عنوان صفحه مشبک توسط محققین زیادی صورت پذیرفته است. برای اولین بار راجاراتنام و هورتیگ [۵] تاثیر استفاده از صفحات مشبک با دو نسبت تخلخل ۴۰ و ۵۰ درصد در استهلاک انرژی جریان در پایین دست سازه های هیدرولیکی کوچک را مورد بررسی قرار دادند. نتایج این محققین نشان داد که استفاده از صفحات مشبک به طور کلی باعث افزایش استهلاک انرژی نسبی نسبت به پرش هیدرولیکی آزاد می گردد. تاثیر ضخامت صفحات مشبک و درصد تخلخل بر روی استهلاک انرژی جریان توسط چاکیر [۱۵] مورد بررسی آزمایشگاهی قرار گرفت. نتایج آزمایش های این محققین

مشبک افقی و قائم به صورت همزمان در پایین دست شیب شکن قائم صورت پذیرفته است. لذا در تحقیق حاضر تاثیر استفاده از صفحات مشبک افقی و قائم به صورت همزمان و ترکیبی بر روی پارامترهای هیدرولیکی شیب شکن های قائم نظیر طول نسبی خیس شده صفحات مشبک افقی و قائم، طول نسبی تلاطم، عمق نسبی استخر و استهلاك انرژی نسبی مورد بررسی قرار خواهد گرفت.

۲- مواد و روش ها

۲-۱- شرح تجهیزات آزمایشگاهی

به منظور دستیابی به اهداف تحقیق حاضر، مدل های آزمایشگاهی در فلوم آزمایشگاهی دانشگاه مراغه به طول موثر ۵، عرض ۰/۳ و ارتفاع ۰/۴۵ متر با شیب صفر درجه انجام شد. دیواره ها و کف فلوم از جنس پلکسی گلس شفاف و بدون زبری می باشد. جریان مورد نیاز با سیستم چرخشی توسط دو عدد پمپ با توان پمپاژ ۴۵۰ لیتر بر دقیقه از مخزن پایین دست به مخزن بالادست فلوم پمپاژ شده و پس از عبور از حوضچه آرام کننده جریان وارد فلوم می گردد. اندازه گیری دبی جریان توسط روتامتر نصب شده بر روی فلوم با دقت نسبی ۲ درصد و عمق جریان نیز توسط عمق سنج نقطه ای با دقت یک میلی متر صورت پذیرفت.

برای ساخت مدل آزمایشگاهی از باکس های شیشه ای به طول ۱/۲، عرض ۰/۳ و ارتفاع ۰/۲ متر برای ساخت سازه شیب شکن در فلوم استفاده شد. به منظور هوادهی جریان زیر جت در حال سقوط نیز، در دیواره لبه شیب شکن سوراخ هایی ایجاد گردید [۱۹]. هوادهی جت در حال سقوط مانع از چسبیدن جت در حال سقوط به دیواره لبه شیب شکن می گردد. همچنین از یک صفحه ی پلی اتیلنی به ضخامت یک سانتی متر و با روزه های دایره ایی با ساختار زیگزاگی و به قطر یک سانتی متر با دو نسبت تخلخل ۴۰ و ۵۰ درصد به عنوان صفحه مشبک در تحقیق حاضر استفاده گردید. صفحات مشبک مورد استفاده در دو حالت افقی (نصب شده بر روی لبه شیب شکن) و قائم (نصب شده در محل اتمام صفحه مشبک افقی) با تخلخل های یکسان و به صورت همزمان مورد استفاده قرار گرفت. صفحه مشبک افقی مورد استفاده در تحقیق حاضر به طول ۷۰ سانتی متر و صفحه مشبک قائم نیز به طول ۳۰ سانتی متر انتخاب گردید. در تحقیق حاضر ۴۵ آزمایش که ۱۵ آزمایش برای مدل شیب شکن قائم ساده

نشان داد که درصد تخلخل بهینه برای این صفحات وابسته به فاصله ی قرارگیری صفحات نسبت به بازشدگی دریچه و ضخامت نسبی اسکرین ها می داند. همچنین مشخص گردید که ضخامت صفحات مشبک تأثیر چندانی بر میزان استهلاك انرژی ندارد. بالکیش [۱۶] تأثیر شیب صفحات مشبک بر میزان کارایی این صفحات در استهلاك انرژی جریان را مورد بررسی قرار داد. نتایج آزمایش های این محقق نشان داد که تغییر شیب صفحات مشبک نسبت به حالتی که این صفحات به صورت عمود قرار گرفته تأثیر چندانی بر استهلاك انرژی جریان ندارد.

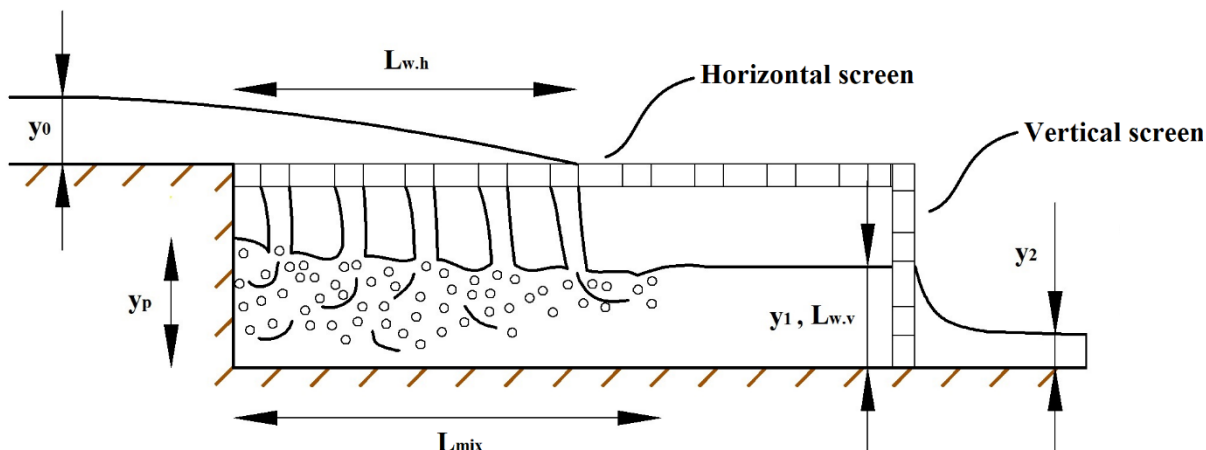
صادق فام و همکاران [۱۷] رفتار پرش هیدرولیکی تشکیل شده ناشی از حضور صفحات مشبک قائم در مقابل جریان فوق بحرانی را مورد بررسی قرار دادند. نتایج آزمایش ها نشان داد که جریان بعد عبور از صفحات مشبک، نسبت به دو پرش هیدرولیکی آزاد و مستغرق بدون حضور صفحات مشبک دارای انرژی کمتری می باشد. دانشفراز و همکاران [۱۸] نیز با بررسی آزمایشگاهی و عددی تاثیر حضور متناظر بلوک و صفحات مشبک نشان دادند که استفاده از بلوک مابین مولد جریان فوق بحرانی و صفحات مشبک باعث افزایش استهلاك انرژی نسبت به حالت بدون بلوک می باشد. تاثیر استفاده از صفحات مشبک افقی در لبه شیب شکن های قائم با جریان فوق بحرانی در بالادست نیز توسط دانشفراز و همکاران [۴] مورد بررسی قرار گرفت. نتایج این محققین نشان داد که شیب شکن های قائم مجهز به صفحات مشبک افقی نسبت به شیب شکن های قائم ساده دارای عمق نسبی پایین دست، عمق نسبی استخر و استهلاك انرژی بیشتری می باشند. این در حالی است که استفاده از این صفحات طول نسبی حوضچه آرامش پایین دست شیب شکن های قائم را به میزان ۶۹ درصد نسبت به حالت ساده کاهش می دهد.

با بررسی مطالعات صورت گرفته بر روی شیب شکن های قائم، یکی از مسائل مهم در این سازه ها استفاده از سازه مستهلک کننده انرژی جریان در پایین دست، جهت کاهش انرژی جنبشی جریان می باشد. از آنجاییکه صفحات مشبک یکی از سازه های مستهلک کننده انرژی جریان می باشد که از مکانیسم افزایش تلاطم جریان و تداخل آب با هوا به عنوان یکی از روش های موثر در استهلاك انرژی جریان در پایین دست سازه های کوچک هیدرولیکی بهره می گیرد. همچنین با توجه به اینکه تاکنون مطالعه ای بر روی ترکیب صفحات

جدول ۱. مشخصات هندسی مدل شیبشکن قائم مجهز به صفحات مشبک ترکیبی

Table 1. Geometric characteristics of the vertical drop model equipped with a combinatorial screen

صفحات مشبک						شیبشکن قائم		
قائم			افقی			ارتفاع (cm)	عرض (cm)	طول (cm)
تخلخل	عرض (cm)	طول (cm)	تخلخل	عرض (cm)	طول (cm)			
۵۰٪-۴۰٪	۳۰	۳۰	۵۰٪-۴۰٪	۳۰	۷۰	۲۰	۳۰	۱۲۰



شکل ۱. نمای شماتیک جریان در شیبشکن قائم مجهز به صفحات مشبک ترکیبی

Fig. 1. Schematic view of the flow in the vertical drop model equipped with a combinatorial screen

که در آن E_0 هد کل بالادست شیب شکن و E_2 انرژی پایین دست شیب شکن می باشد. هد کل بالادست با استفاده از رابطه ارائه شده توسط بختلف [۲۰] به صورت رابطه (۳) و انرژی پایین دست نیز از رابطه عمومی انرژی به صورت رابطه (۴) محاسبه می گردد.

$$E_0 = h + 1.5y_c \quad (3)$$

$$E_2 = y_2 + \frac{q^2}{2gy_2^2} \quad (4)$$

که در آن، h ارتفاع شیب شکن، y_c عمق بحرانی، y_0 عمق آب بالادست شیب شکن، q دبی در واحد عرض کانال، g شتاب گرانش زمین و y_2 عمق پایین دست شیب شکن می باشد. همچنین راندمان استهلاک انرژی (η) شیب شکن قائم مجهز به صفحات مشبک ترکیبی نسبت به شیب شکن قائم ساده با استفاده از رابطه (۵) قابل محاسبه است.

و ۳۰ آزمایش جهت تعیین تاثیر حضور صفحات مشبک ترکیبی بر روی رفتار پارامترهای هیدرولیکی شیب شکن های قائم با جریان زیر بحرانی در بالادست انجام شد. مشخصات مدل مورد بررسی در جدول (۱) و نمای کلی جریان در شکل (۱) نشان داده شده است.

۲-۲- محاسبات مربوط به استهلاک انرژی

به منظور دستیابی به اهداف تحقیق حاضر ابتدا نحوه محاسبات مربوط به استهلاک انرژی در شیب شکن های قائم مجهز به صفحات مشبک ترکیبی بیان می شود. در تحقیق حاضر مقدار استهلاک انرژی (ΔE) و استهلاک انرژی نسبی ($\frac{\Delta E}{E_0}$) از روابط (۱) و (۲) محاسبه شدند:

$$\Delta E = E_0 - E_2 \quad (1)$$

$$\frac{\Delta E}{E_0} = 1 - \frac{E_2}{E_0} \quad (2)$$

جدول ۲. محدوده متغیرهای اندازه گیری شده

Table 2. The range of measured

محدوده متغیرها		شیب شکن قائم ساده	متغیرهای اندازه گیری شده
P=50%	P=40%		
۱۵۰-۸۵۰	۱۵۰-۸۵۰	۱۵۰-۸۵۰	$Q(L / \text{min})$
۶/۲-۹۵/۵	۶/۲-۹۵/۵	۲-۷/۵	$y_0(\text{cm})$
۱۱/۴-۹۵/۲۵	۱۴/۴-۲/۸	-	$y_1(\text{cm})$
۴/۱-۳۹/۴۲	۴/۱-۰۲/۳۶	۲/۰-۳/۶۵	$y_2(\text{cm})$
۱۳/۵-۷/۱	۱۵/۵-۷/۵	۹/۴-۷	$y_p(\text{cm})$
۳۸/۷-۵/۸	۴۳/۹-۵/۵	-	$L_{W,h}(\text{cm})$
۱۱/۴-۹۵/۲۵	۱۴/۴-۲/۸	-	$L_{W,v}(\text{cm})$
۱۲-۴۲	۱۵-۴۸/۲	-	$L_{mix}(\text{cm})$

، طول تلاطم (L_{mix})، عمق استخر (y_p)، عمق پایین دست (y_2) و استهلاک انرژی (ΔE) به عنوان متغیرهای وابسته در نظر گرفته شدند. متغیرهای مستقل نیز عبارتند از: مشخصات هندسی شیب شکن قائم و صفحات مشبک شامل (h, p) و مشخصات مربوط به جریان شامل ($\rho, \mu, g, V_0, B, y_c, y_0, y_2$) می باشد. که در آن p تخلخل صفحات مشبک، h ارتفاع شیب شکن، ρ جرم مخصوص آب، μ لزوجت دینامیکی، g شتاب گرانش زمین، V_0 سرعت بالادست شیب شکن، B عرض کانال، y_c عمق بحرانی، y_0 عمق بالادست شیب شکن و y_2 عمق پایین دست می باشند.

با استفاده از روش پی باکینگهام و با در نظر گرفتن پارامترهای ρ و g به عنوان پارامترهای تکراری در نهایت پارامترهای وابسته به صورت تابعی از پارامترهای مستقل به صورت زیر به دست آمدند.

$$\frac{\Delta E}{E_0}, \frac{L_{mix}}{h}, \frac{L_{w,v}}{h}, \frac{y_p}{h} = f_1\left(\frac{y_c}{h}, p\right) \quad (8)$$

طول خیس شده صفحات مشبک افقی پارامتر بسیار مهمی است که در شیب شکن های مجهز به صفحه مشبک ترکیبی باید مورد تجزیه و تحلیل ابعادی قرار گیرد. با توجه به اینکه تمامی آزمایشات، در شرایطی صورت پذیرفت که عمق استخر زیر صفحه مشبک تأثیری بر جریان بالادست نداشته باشد، بنابراین ارتفاع شیب شکن و شرایط جریان در پایین دست بر طول خیس شده صفحه مشبک افقی

$$\eta = \frac{\Delta E_{\text{vertical drop equipped with screens}}}{\Delta E_{\text{(plain vertical drop)}}} - 1 \quad (5)$$

با اندازه گیری عمق جریان در بالادست شیب شکن قائم، در قبل و بعد از صفحه مشبک قائم و نیز با محاسبه انرژی در هر مقطع، میزان استهلاک انرژی نسبی هر کدام از سیستم های مستهلک کننده انرژی توسط رابطه (۶) محاسبه شد.

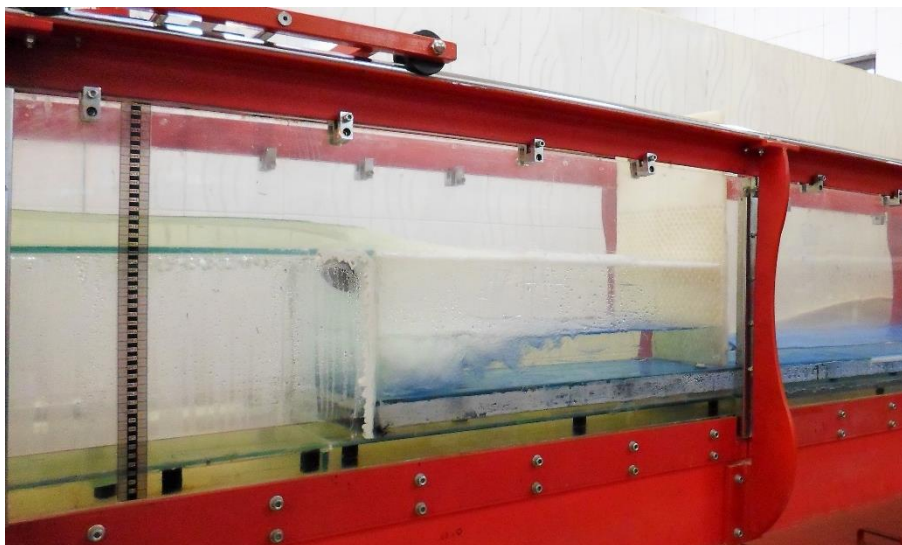
$$\frac{\Delta E_{\text{(Energy dissipator systems)}}}{E_0} = \frac{E_n - E_{n+1}}{E_0} \quad (6)$$

E_n انرژی در مقطع n ام و E_{n+1} انرژی در مقطع $(n+1)$ می باشد. این در حالی است که برای محاسبه متوسط درصد سهم استهلاک انرژی سیستم های مستهلک کننده انرژی (Φ) در شیب شکن های قائم مجهز به صفحات مشبک ترکیبی از رابطه (۷) استفاده گردید:

$$\Phi = \frac{E_n - E_{n+1}}{E_0 - E_2} \quad (7)$$

۲-۳- آنالیز ابعادی

برای بیان پارامترهای هیدرولیکی مختلف شیب شکن های قائم مجهز به صفحات مشبک ترکیبی، پارامترهای طول خیس شده صفحه مشبک افقی ($L_{w,h}$)، طول خیس شده صفحات مشبک قائم ($L_{w,v}$)



شکل ۲. نمایی از جریان در شیب شکن قائم مجهز به صفحات مشبک ترکیبی
 Fig. 2. View of the flow in the vertical drop model equipped with a combinatorial screen

جریان بعد از برخورد به کف کانال با پرش هیدرولیکی کوچک همراه می شود که جریان با حالت زیر بحرانی به سمت پایین دست حرکت می کند. با رسیدن جریان به صفحات مشبک قائم نصب شده در محل اتمام صفحه مشبک افقی، وجود این صفحات باعث افزایش بیشتر عمق جریان در بین صفحه مشبک قائم و لبه شیب شکن می گردد. رخ دادن این پدیده باعث کاهش تلاطم ناشی از برخورد جت به سطح آب داخل استخر می گردد. این در حالی است که عبور جریان از داخل روزنه های صفحه مشبک قائم باعث افزایش تلاطم جریان و ایجاد شرایطی برای تداخل آب با هوا می گردند.

در مرحله بعد با افزایش دبی جریان مشاهده گردید که طول خیس شده صفحات مشبک افقی، طول تلاطم ناشی از برخورد جت به آب داخل استخر و عمق پشت صفحات مشبک قائم افزایش می یابند. شکل (۲) نمایی از جریان در شیب شکن قائم مجهز به صفحات مشبک ترکیبی را نشان می دهد.

۳-۲- طول نسبی خیس شده

طول نسبی خیس شده صفحات مشبک افقی در شیب شکن های مجهز به صفحات مشبک افقی و قائم یکی از پارامترهای مهمی است که جهت طراحی اقتصادی و بهینه طرح باید مورد بررسی قرار گیرد. لذا با توجه به آنالیز ابعادی صورت گرفته طول نسبی خیس شده صفحات مشبک افقی و قائم مورد استفاده در شیب شکن های قائم

تأثیری ندارد. بنابراین با آنالیز ابعادی در نهایت طول نسبی خیس شده صفحات مشبک افقی به صورت تابعی از عدد فرود بالادست (Fr_0) و تخلخل صفحات مشبک بدست آمد.

$$\frac{L_{w,v}}{h} = f_2(Fr_0, p) \quad (9)$$

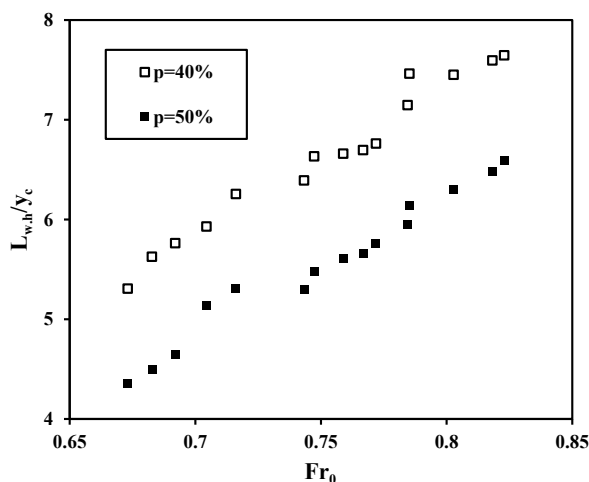
محدوده متغیرهای اندازه گیری شده در تحقیق حاضر در جدول (۱) ارائه شده است.

در این تحقیق ۸۰ درصد از داده های آزمایشگاهی به طور تصادفی انتخاب شده و به عنوان ورودی برای به دست آوردن روابط استفاده شدند. ۲۰ درصد باقی مانده از داده ها نیز برای صحت سنجی معادلات ارائه شده، استفاده گردید. همچنین از شاخص های آماری NRMSE خطای جذر میانگین مربعات نرمال سازی شده و R^2 ضریب همبستگی جهت ارزیابی روابط ارائه شده استفاده گردید.

۳- نتایج و بحث

۳-۱- مشاهدات آزمایشگاهی

با تنظیم مدل آزمایشگاهی و باز کردن شیر تنظیم دبی جریان در مرحله اول با رسیدن جریان به لبه شیب شکن و ورودی صفحه مشبک افقی، وجود روزنه های دایره ای و تو خالی باعث تقسیم جت ورودی به جت های ریزشی کوچک می گردد. جت های ریزشی



شکل ۳. تغییرات طول نسبی خیس شده صفحات مشبک افقی در مقابل عدد فرود

Fig. 3. Variation of the relative length of the wet of the horizontal screen to Froude number

تغییرات طول نسبی خیس شده صفحات مشبک قائم در شیب شکن های قائم مجهز به صفحات مشبک ترکیبی در مقابل عمق بحرانی نسبی در شکل (۴) نشان داده شده و بیان می دارد که با افزایش عمق بحرانی نسبی، طول خیس شده صفحات مشبک افزایش می یابد.

نتایج تاثیر افزایش عمق بحرانی نسبی بر روی طول نسبی خیس شده مشخص کرد که با افزایش عمق بحرانی نسبی، طول نسبی خیس شده صفحات مشبک قائم با تخلخل ۴۰ درصد به میزان بیشتری نسبت به تخلخل ۵۰ درصدی افزایش می یابد. همچنین نتایج مقایسه تخلخل صفحات مشبک قائم نشان داد که در صفحات مشبک قائم نیز، تخلخل ۴۰ درصد صفحات مشبک به میزان ۱۵ درصد دارای طول نسبی خیس شده بیشتری نسبت به تخلخل ۵۰ درصد را دارد. بهترین رابطه ارائه شده برای تخمین طول نسبی خیس شده صفحات مشبک قائم در شیب شکن های قائم مجهز به صفحات مشبک ترکیبی طبق معیار های ارزیابی، رابطه (۱۱) می باشد:

$$\frac{L_{w,v}}{h} = 1.21 \left(\frac{y_c}{h} \right)^{0.91} (p)^{-0.65}$$

$$R^2 = 0.992 \quad \text{and} \quad \text{NRMSE} = 0.02 \quad (11)$$

۳-۳- طول نسبی تلاطم

فاصله لبه شیب شکن تا آخرین نقطه تلاطم ناشی از برخورد

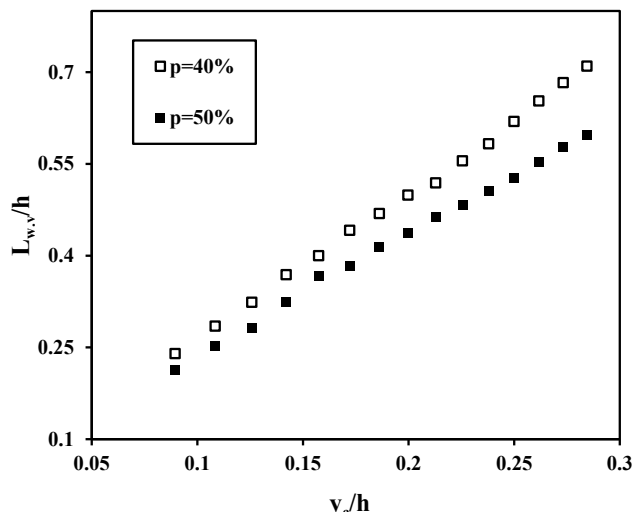
مجهز به صفحات مشبک ترکیبی باید به صورت جداگانه مورد بررسی و تجزیه و تحلیل قرار گیرد. شکل (۳) بیانگر تغییرات طول نسبی خیس شده صفحات مشبک افقی در شیب شکن های قائم مجهز به صفحات مشبک ترکیبی در مقابل عدد فرود بالادست می باشد.

مطابق شکل (۳) ملاحظه می گردد که با افزایش عدد فرود بالادست طول نسبی خیس شده صفحات مشبک افقی افزایش می یابد. همچنین نتایج نشان داد که برای شرایط یکسان با افزایش درصد تخلخل، طول خیس شده صفحات مشبک کاهش می یابد. به طوریکه صفحات مشبک افقی با تخلخل ۴۰ درصد به میزان ۲۰ درصد طول نسبی خیس شده بیشتری نسبت به صفحه مشبک افقی با تخلخل ۵۰٪ دارد. دلیل این امر مربوط به حفره های خالی روی صفحات مشبک افقی بوده، طوریکه صفحات مشبک ۵۰ درصد نسبت به صفحات مشبک ۴۰ درصد در یک حجم ثابت به دلیل داشتن حفره های خالی بیشتر توانایی عبور بیشتر جریان را از خود دارا می باشد.

با در نظر گرفتن داده های آزمایشگاهی مربوط به شیب شکن قائم مجهز به صفحات مشبک ترکیبی با جریان زیر بحرانی در بالادست بهترین رابطه برای تخمین طول نسبی خیس شده صفحات مشبک افقی طبق معیار های ارزیابی به صورت رابطه (۱۰) ارائه گردید:

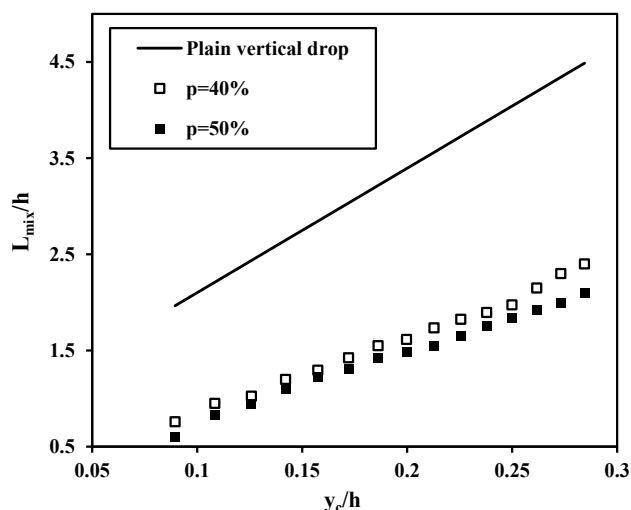
$$\frac{L_{w,h}}{y_c} = 5.39 (Fr_0)^{1.86} (p)^{-0.817}$$

$$R^2 = 0.982 \quad \text{and} \quad \text{NRMSE} = 0.03 \quad (10)$$



شکل ۴. تغییرات طول نسبی خیس شده صفحات مشبک قائم نسبت به عمق بحرانی نسبی

Fig. 4. Variation of the relative length of the wet of the vertical screen to Relative critical depth

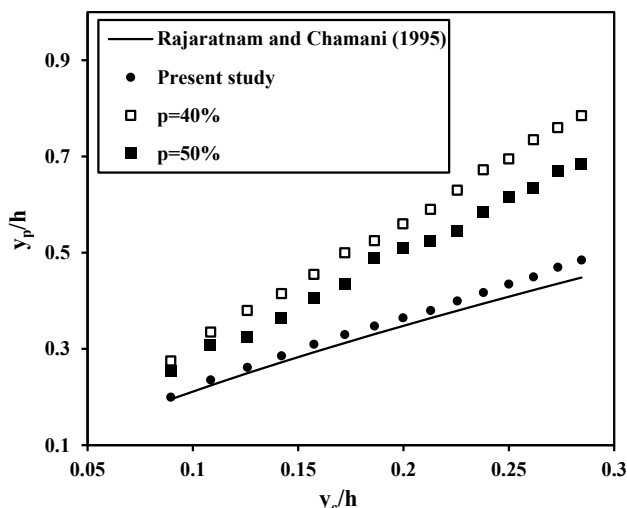


شکل ۵. تغییرات طول نسبی تلاطم جریان نسبت به عمق بحرانی نسبی

Fig. 5. Variation of the relative mixing length of the flow to Relative critical depth

به شیب شکن قائم ساده می گردد. دلیل این امر حذف پارامتر طول شیب شکن به وسیله صفحات مشبک افقی و حذف پرش هیدرولیکی می باشد. همچنین مقایسه نتایج مربوط به تخلخل صفحات مشبک ترکیبی نشان داد که تخلخل ۵۰ درصدی صفحات مشبک دارای طول نسبی تلاطم کمتری نسبت به تخلخل ۴۰ درصدی می باشد. به طوریکه شیب شکن قائم مجهز به صفحه مشبک ترکیبی با تخلخل های ۴۰ و ۵۰ درصدی نسبت به شیب شکن قائم ساده طول

جت به آب داخل استخر و تلاطم ناشی از پرش هیدرولیکی در پایین دست شیب شکن های قائم طول تلاطم نامیده می شود. شکل (۵) بیانگر تغییرات طول نسبی تلاطم جریان در حوضچه پایین دست شیب شکن های قائم مجهز به صفحات مشبک ترکیبی با دو نسبت تخلخل متفاوت، نسبت به عمق بحرانی نسبی می باشد. نتایج نشان داد که استفاده از صفحات مشبک ترکیبی در شیب شکن های قائم باعث کاهش طول نسبی حوضچه آرامش نسبت



شکل ۶. تغییرات عمق نسبی استخر نسبت به عمق بحرانی نسبی
 Fig. 6. Variation of the relative pool depth to relative critical depth

مشبک ترکیبی مقدار عمق نسبی استخر افزایش پیدا می کند. نتایج نشان می دهد که استفاده از صفحات مشبک ترکیبی در شیب شکن های قائم با جریان زیر بحرانی در بالادست باعث افزایش عمق نسبی استخر نسبت به شیب شکن های قائم ساده می گردد. دلیل این امر افزایش تداخل آب با هوا در کناره های دیواره لبه شیب شکن توسط صفحات مشبک افقی و افزایش عمق آب توسط صفحات مشبک قائم می باشد. با مقایسه افزایش عمق نسبی استخر در مقابل اعماق بحرانی نسبی مشاهده می گردد که استفاده از صفحات مشبک ترکیبی در شیب شکن های قائم در اعماق بحرانی نسبی بیشتر، عمق نسبی استخر را به میزان بیشتری نسبت به اعماق بحرانی نسبی کم افزایش می دهد.

همچنین مقایسه تأثیر تخلخل صفحات مشبک در مقدار عمق نسبی استخر نشان داد که شیب شکن های قائم مجهز به صفحه مشبک ترکیبی با تخلخل ۴۰ درصد به دلیل ظرفیت کم عبور جریان از داخل صفحات مشبک قائم نسبت به صفحات مشبک ۵۰ درصدی عمق نسبی استخر بیشتری دارند. به طوریکه شیب شکن مجهز به صفحه مشبک ترکیبی با تخلخل ۴۰ و ۵۰ درصد عمق نسبی استخر را نسبت به شیب شکن قائم ساده به ترتیب ۵۲/۸ و ۳۲/۵ درصد افزایش می دهند. برای پیش بینی رفتار عمق نسبی استخر برای شیب شکن قائم مجهز به صفحات مشبک ترکیبی رابطه (۱۳) بر حسب عمق بحرانی نسبی و تخلخل صفحات مشبک ارائه گردید:

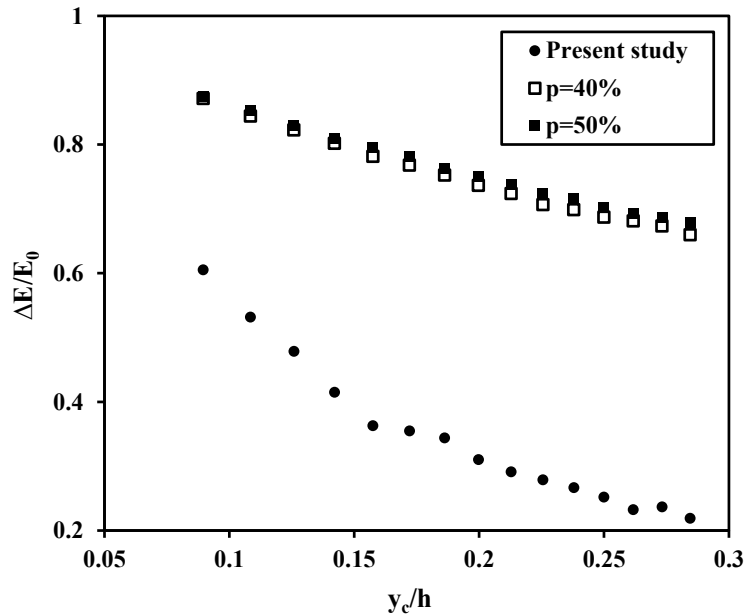
نسبی حوضچه آرامش پایین دست را به ترتیب به میزان ۵۳ و ۵۷ درصد کاهش می دهد. دلیل این امر این است که مطابق نتایج ارائه شده صفحات مشبک ۴۰ درصدی دارای طول خیس شده بیشتری بوده و به تبع آن آخرین نقطه جت برخوردی با کف و تلاطم ایجاد شده ناشی از برخورد آن نیز با فاصله بیشتری از لبه شیب شکن رخ می دهد. همچنین با استفاده از داده های آزمایشگاهی رابطه ی (۱۲) برای پیش بینی طول نسبی تلاطم جریان بر حسب عمق بحرانی نسبی و تخلخل صفحات مشبک ارائه گردید:

$$\frac{L_{mix}}{h} = 5.16 \left(\frac{y_c}{h} \right)^{0.97} (p)^{-0.45}$$

$$R^2 = 0.991 \quad \text{and} \quad \text{NRMSE} = 0.24 \quad (12)$$

۳-۴- عمق نسبی استخر

عمق نسبی استخر یکی دیگر از پارامترهای هیدرولیکی شیب شکن های قائم می باشد که می تواند با توجه به نوع کاربرد آن حائز اهمیت باشد. شکل (۶) تغییرات عمق نسبی استخر در شیب شکن های قائم مجهز به صفحات مشبک ترکیبی با دو نسبت تخلخل نسبت به عمق بحرانی نسبی و در مقایسه با شیب شکن های قائم ساده می باشد. با توجه به شکل (۶) مشاهده می گردد که با افزایش عمق بحرانی نسبی برای هر دو شیب شکن قائم ساده و شیب شکن مجهز به صفحات



شکل ۷. تغییرات استهلاک انرژی نسبی در مقابل عمق بحرانی نسبی
 Fig. 7. Variation relative energy loss to relative critical depth

ناشی از عبور جریان از داخل صفحات مشبک قائم تشکیل می شود. مقایسه نتایج مربوط به تأثیر نسبت تخلخل صفحات مشبک بر روی استهلاک انرژی نسبی نشان داد که شیب شکن مجهز به صفحات مشبک با تخلخل ۵۰ درصد انرژی بیشتری نسبت به شیب شکن مجهز به صفحات مشبک با تخلخل ۴۰ درصد مستهلک می کند. با این حال نتایج مربوط به هر دو تخلخل دارای مقادیر تقریباً یکسانی می باشد. این امر نشان دهنده تأثیر کم تخلخل بر روی استهلاک انرژی جریان می باشد. محاسبه راندمان استهلاک انرژی نشان داد که شیب شکن های قائم مجهز به صفحات مشبک ترکیبی با تخلخل های ۴۰ و ۵۰ درصد نسبت به شیب شکن قائم ساده به ترتیب دارای راندمان ۱۳۱ و ۱۳۵ می باشند. همچنین نتایج نشان داد که با افزایش عمق بحرانی نسبی میزان راندمان استهلاک انرژی نسبی شیب شکن قائم مجهز به صفحات مشبک ترکیبی نسبت به شیب شکن قائم ساده افزایش می یابد. بهترین رابطه ارائه شده برای تخمین استهلاک انرژی نسبی طبق معیار های ارزیابی، رابطه (۱۴) می باشد:

$$\frac{\Delta E}{E_0} = 0.54 \left(\frac{y_c}{h} \right)^{-0.23} (p)^{0.063}$$

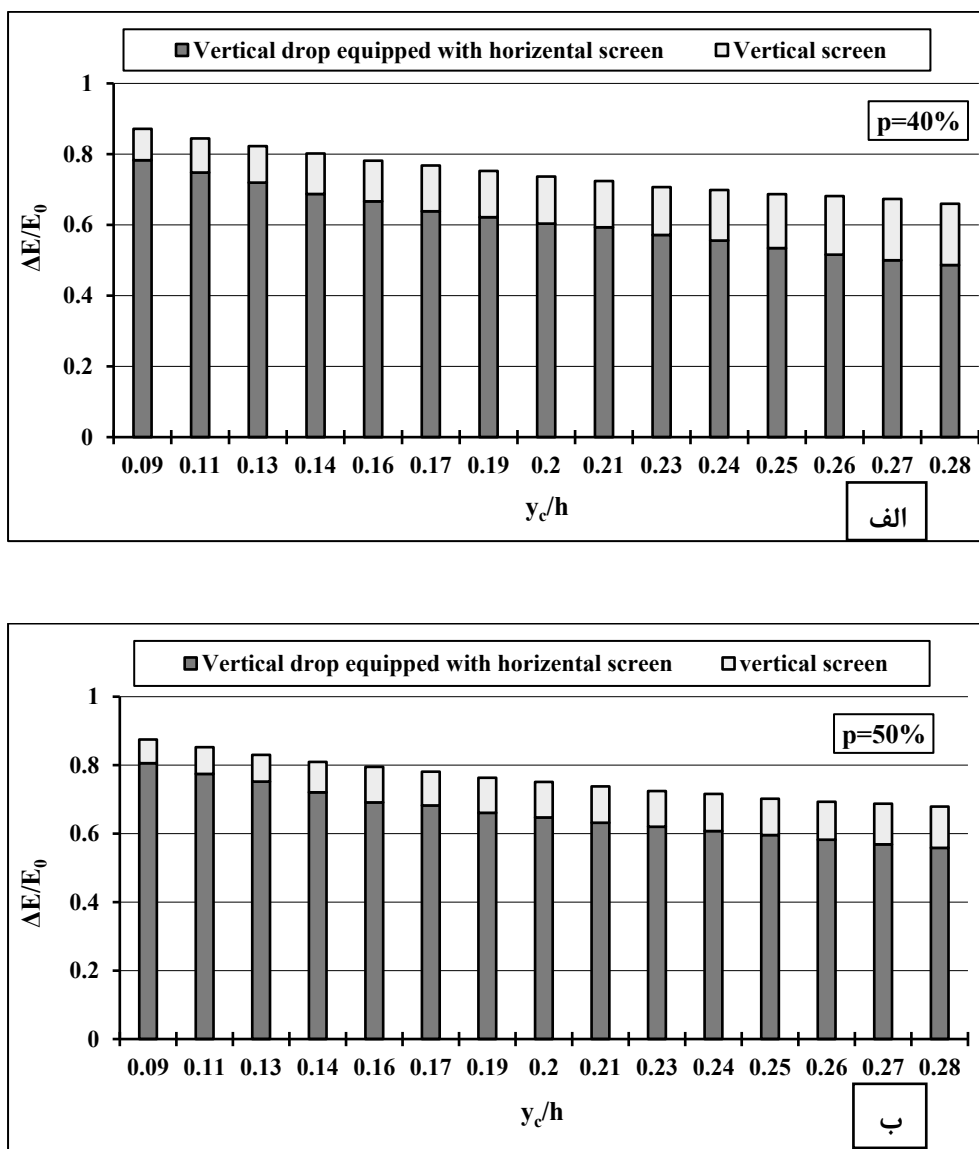
$$R^2 = 0.997 \quad \text{and} \quad \text{NRMSE} = 0.012 \quad (14)$$

$$\frac{y_p}{h} = 1.21 \left(\frac{y_c}{h} \right)^{0.916} (p)^{-0.647}$$

$$R^2 = 0.998 \quad \text{and} \quad \text{NRMSE} = 0.013 \quad (13)$$

۵-۳- استهلاک انرژی

شکل (۷) مقایسه تغییرات استهلاک انرژی نسبی شیب شکن قائم مجهز به صفحات مشبک ترکیبی با شیب شکن قائم ساده در حالت جریان زیر بحرانی در بالادست را نشان می دهد. مشاهده می گردد که با افزایش عمق بحرانی نسبی استهلاک انرژی نسبی در شیب شکن قائم مجهز به صفحات مشبک ترکیبی همانند شیب شکن قائم ساده کاهش می یابد. به عبارت دیگر رفتار عمومی هر دو شیب شکن با تغییرات عمق بحرانی نسبی یکسان است. نتایج مربوط به شکل (۷) نشان می دهد که استفاده از صفحات مشبک ترکیبی در شیب شکن های قائم با جریان زیر بحرانی در بالادست استهلاک انرژی نسبی را نسبت به شیب شکن قائم ساده افزایش می دهد. استهلاک انرژی در شیب شکن مجهز به صفحات مشبک ترکیبی به وسیله تکه تکه شدن جت جریان توسط صفحات مشبک افقی، تلاطم ناشی از برخورد جت های تکه تکه شده با آب داخل استخر و تلاطم

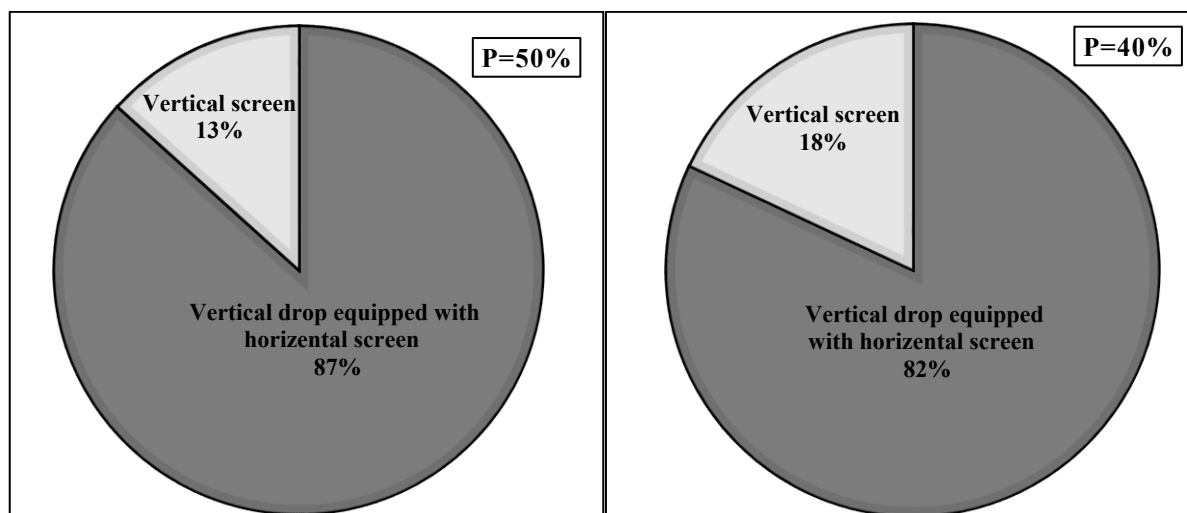


شکل ۸. تغییرات میزان استهلاک انرژی مولفه های مستهلک کننده انرژی نسبت به عمق بحرانی نسبی با الف) تخلخل ۴۰ درصد ب) با تخلخل ۵۰ درصد
 Fig. 8. Variation of energy loss in energy dissipater components than the relative critical depth with a) porosity of 40% b) porosity of 50%

عملکرد توامان دو مولفه سازه شیب شکن و صفحه مشبک افقی، محاسبات برای دو مولفه به صورت یکجا آورده می شود. در شکل (۸) میزان استهلاک انرژی هر یک از مولفه های مستهلک کننده انرژی در شیب شکن های قائم مجهز به صفحات مشبک ترکیبی برای دو تخلخل مختلف نسبت به عمق بحرانی نسبی نشان داده شده است. با توجه به شکل (۸) مشاهده می گردد که سهم عمده ای از استهلاک انرژی جریان ناشی از عملکرد توامان دو مولفه سازه شیب شکن قائم و صفحه مشبک افقی می باشد. این دو مولفه

۱-۵-۳- میزان و سهم مستهلک کننده های انرژی

استهلاک انرژی در شیب شکن قائم مجهز به صفحه مشبک ترکیبی توسط سه مولفه مستهلک کننده انرژی صورت می پذیرد: (۱) استهلاک مربوط به سازه شیب شکن؛ (۲) استهلاک توسط صفحه مشبک افقی و (۳) استهلاک مربوط به عبور جریان از داخل صفحه مشبک قائم. با توجه به اهمیت موضوع و بررسی میزان استهلاک انرژی هر یک از مولفه های مستهلک کننده انرژی در شیب شکن های قائم مجهز به صفحات مشبک ترکیبی، لازم به ذکر است با توجه به



شکل ۹. تغییرات سهم استهلاک انرژی سیستم های مستهلک کننده انرژی در تخلخل های مختلف صفحات مشبک

Fig. 9. Variation of energy loss percentage of energy dissipater components in different different screen porosity

افقی افزایش و سهم مولفه صفحه مشبک قائم نیز کاهش می یابد. دلیل این امر این است که با افزایش درصد تخلخل صفحات مشبک میزان دبی عبوری از صفحات مشبک قائم افزایش یافته و به تبع آن عمق داخل استخر نیز کاهش می یابد که منجر به افزایش تلاطم بیشتر جریان ناشی از برخورد جت های تکه تکه شده توسط صفحه مشبک افقی و کاهش تلاطم به وجود آمده ناشی از صفحات مشبک قائم می گردد.

۴- نتیجه گیری کلی

در تحقیق حاضر تاثیر استفاده از صفحات مشبک ترکیبی (افقی-قائم) در شیب شکن های قائم بر روی پارامترهای هیدرولیکی این سازه ها پرداخته شده است. مشاهده شد که استفاده از صفحات مشبک ترکیبی با تکه تکه کردن جت در حال سقوط توسط صفحات مشبک افقی و عبور جریان از داخل هر دو صفحه مشبک افقی و قائم باعث افزایش تداخل آب با هوا و افزایش تلاطم می گردد. نتایج نشان داد که استفاده از صفحات مشبک ترکیبی در شیب شکن های قائم باعث افزایش عمق نسبی استخر و استهلاک انرژی نسبی و کاهش طول نسبی تلاطم نسبت به شیب شکن قائم ساده می گردد. همچنین مشخص گردید که در شیب شکن های قائم مجهز به صفحه مشبک ترکیبی با افزایش عمق بحرانی نسبی پارامترهای طول نسبی خیس شده صفحه مشبک قائم، طول نسبی تلاطم و عمق نسبی استخر

مستهلك کننده انرژی با تکه تکه کردن جت و تلاطم ناشی از برخورد آن با آب داخل استخر باعث افت انرژی می گردند. این در حالی است که بخش کوچکی از افت انرژی کل سیستم نیز توسط مولفه صفحه مشبک قائم مستهلک می گردد. همچنین مطابق شکل مشاهده می گردد که با افزایش عمق بحرانی نسبی عملکرد توامان دو مولفه سازه شیب شکن و صفحه مشبک افقی، کاهش و عملکرد مولفه صفحه مشبک قائم افزایش پیدا می کند. دلیل این امر این است که با افزایش عمق بحرانی نسبی عمق داخل استخر افزایش یافته و در نتیجه آن جت برخوردی با شدت کمتری به آب داخل استخر برخورد می کند. این در حالی است که با افزایش پارامتر عمق بحرانی نسبی و به تبع آن افزایش عمق داخل استخر، صفحه مشبک قائم با عبور بیشتر جریان از داخل خود باعث بیشتر شدن تلاطم در حین عبور جریان از داخل روزه های خود می گردد.

شکل (۹) نشان دهنده متوسط درصد سهم استهلاک انرژی هر یک از مولفه های مستهلک کننده انرژی در شیب شکن های قائم مجهز به صفحات مشبک ترکیبی برای مدل های مختلف می باشد. مطابق این نمودار مشاهده می گردد که سازه شیب شکن قائم همراه با صفحه مشبک افقی بیش از ۸۲ درصد استهلاک انرژی کل سیستم را به خود اختصاص داده اند. همچنین نتایج نشان داد که با افزایش تخلخل صفحات مشبک سهم استهلاک انرژی مربوط به عملکرد توامان دو مولفه سازه شیب شکن قائم و صفحه مشبک

- [7] Rand W. (1955) "Flow geometry at straight drop spillways", In Proceedings of the American Society of Civil Engineers, 81(9) 1-13.
- [8] Gill M.A. (1979) "Hydraulics of rectangular vertical drop structures", Journal of Hydraulic Research, 17(4) 289-302.
- [9] Lin C. Hwung W.Y. Hsieh S.C. and Chang K.-A. (2007) "Experimental study on mean velocity characteristics of flow over vertical drop", Journal of Hydraulic Research 45(1) 33-42.
- [10] Hong Y.M. Huang, H.S. and Wan S. (2010) "Drop characteristics of free-falling nappe for aerated straight-drop spillway", Journal of Hydraulic Research 48(1) 125-129.
- [11] Liu S.I. Chen J.Y. Hong, Y.M. Huang H.S. and 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.
- [12] Daneshfaraz R. Sadeghfam S. and Hasannia, S. (2020) "Experimental investigating effect of Froude number on hydraulic parameters of vertical drop with supercritical flow upstream", Amirkabir Journal of Civil Engineering, 52(7) 1-17 (in Persian).
- [13] Esen I.I. Alhumoud J.M. and Hannan K.A. (2004) "Energy Loss at a Drop Structure with a Step at the Base", Water international 29(4) 523-529
- [14] Sharif M. and Kabiri-Samani A. (2018) "Flow regimes at grid drop-type dissipators caused by changes in tail-water depth", Journal of Hydraulic Research, 56(4) 1-12.
- [15] Çakir P. (2003) "Experimental investigation of energy dissipation through screens", Citeseer.
- [16] Balkış, G. (2004) "Experimental investigation of energy dissipation through inclined screens", M. Sc. Thesis, Department of Civil Engineering Middle East Technical.
- [17] Sadeghfam S. Akhtari A. ADaneshfaraz R. and Tayfur G. (2015) "Experimental investigation of screens as energy dissipaters in submerged hydraulic jump", Turkish Journal of Engineering and Environmental

افزایش و استهلاک انرژی نسبی کاهش می یابند. این در حالی است که بررسی میزان و سهم مستهلک کننده های انرژی نشان داد که با افزایش عمق بحرانی نسبی عملکرد توامان دو مولفه سازه شیب شکن قائم و صفحه مشبک افقی کاهش و سازه صفحه مشبک افزایش می یابد. همچنین مشخص گردید که در این سازه ها دو مولفه سازه شیب شکن قائم و صفحه مشبک افقی بیش از ۸۲ درصد سهم استهلاک انرژی کل را به خود اختصاص می دهند. مقایسه تخلخل صفحات مشبک نیز نشان داد که با افزایش درصد تخلخل، طول نسبی خیس شده صفحات مشبک افقی و قائم، طول نسبی تلاطم و عمق نسبی استخر کاهش و استهلاک انرژی نسبی افزایش پیدا می کند. لازم به ذکر است مشاهدات آزمایشگاهی نشان داد که استفاده از صفحات مشبک ترکیبی در پایین دست شیب شکن های قائم باعث حذف ضربه برخوردی جت به کف استخر می گردد که می تواند مشکل خردگی و آبستگی پایین دست شیب شکن های قائم را برطرف نماید.

منابع

- [1] 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.
- [2] Rajaratnam N. and Chamani M.R. (1995) "Energy loss at drops", Journal of Hydraulic Research, 33(3) 373-384.
- [3] Kabiri-Samani A.R. Bakhshian, E. and Chamani M.R. (2017) Flow characteristics of grid drop-type dissipators, Flow Measurement and Instrumentation, 54 298-306.
- [4] Daneshfaraz R. Sadeghfam and S. Hasanniya V. (2019) "Experimental investigation of energy dissipation the vertical drops equipped with a horizontal screen with the supercritical flow", Iranian Journal of Soil and Water Research, 50(6) 1421-1436 (in Persian).
- [5] Rajaratnam N. and Hurtig K. (2000) "Screen-type energy dissipator for hydraulic structures", Journal of Hydraulic Engineering 126(4) 310-312.
- [6] White M.P. (1943) "Discussion of Moore", ASCE 108 1361-1364.

[19] Chanson H. and Toombes L. (1998) "Supercritical flow at an abrupt drop: Flow patterns and aeration", Canadian Journal of Civil Engineering 25(5) 956-966.

[20] Bakhmeteff M.W. (1932) "Hydraulics of open channels", McGraw-Hill book company, Inc, New York and London.

Sciences, 38(2) 126-138.

[18] Daneshfaraz R. Sadeghfam S. and Ghahramanzadeh A. (2017) "Three-dimensional numerical investigation of flow through screens as energy dissipators", Canadian Journal of Civil Engineering 44(10) 850-859

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

V. Hasanniya, R. Daneshfaraz, S. Sadeghfam, *Experimental investigating on hydraulic parameters of vertical drop equipped with combined screens, Amirkabir J. Civil Eng., 52(10) (2021) 2487-2500.*

DOI: [10.22060/ceej.2019.16431.6223](https://doi.org/10.22060/ceej.2019.16431.6223)

