



بررسی آزمایشگاهی استهلاک انرژی در شیب‌شکن های قائم مجهز به صفحه مشبک قائم با واگرایی تدریجی در پایین دست

بهنام نایب زاده^{۱*}، محمد علی لطف الهی یقین^۲، رسول دانشفراز^۳

^۱ دانشجوی دکتری عمران آب و سازه‌های هیدرولیکی دانشکده عمران، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران

^۲ استاد دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران

^۳ استاد گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه مراغه، مراغه، ایران

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۳۹۸-۰۳-۲۳

بازنگری: ۱۳۹۸-۰۵-۲۳

پذیرش: ۱۳۹۸-۰۵-۲۶

ارائه آنلاین: ۱۳۹۸-۰۶-۰۸

کلمات کلیدی:

شیب‌شکن قائم

راندمان استهلاک انرژی

واگرایی تدریجی

صفحات مشبک

عمق استخر

خلاصه: در مطالعه حاضر برای افزایش راندمان استهلاک انرژی جریان، اثر توامان شیب شکن قائم، واگرایی تدریجی و صفحات مشبک قائم مورد بررسی قرار گرفت. آزمایش ها در یک فلوم آزمایشگاهی افقی با مقطع مستطیلی، با دو ارتفاع شیب شکن قائم و در نسبت های واگرایی دیواره ۰/۵ تا ۱، نسبت تخلخل صفحات مشبک ۴۰٪ و ۵۰٪ و محدوده عدد فرود ۰/۶۸ تا ۰/۹۲ انجام گرفت. نتایج نشان داد که استفاده از صفحات مشبک و واگرایی دیواره ها باعث افزایش استهلاک انرژی و کاهش عمق استخر و عمق پایین دست می گردد. بکارگیری دیواره واگرایی، صفحات مشبک و تاثیر استفاده همزمان از صفحات مشبک و دیواره واگرایی به ترتیب باعث افزایش ۲۵، ۴۴ و ۴۸ درصدی راندمان استهلاک انرژی می گردد. نسبت تخلخل صفحات مشبک تاثیر چندانی بر روی استهلاک انرژی ندارند ولی باعث کاهش عمق استخر و افزایش عمق پایین دست می گردد. در شرایط هیدرولیکی یکسان، با افزایش ارتفاع شیب شکن میزان استهلاک انرژی جریان در اثر شدت برخورد بیشتر جت جریان عبوری از روی شیب شکن با کف پایین دست آن افزایش و عمق استخر کاهش می یابد. با افزایش دبی، پرفش هیدرولیکی تشکیل شده در بالادست صفحات مشبک با نسبت تخلخل ۴۰ درصد از نوع مستغرق بوده و به بالادست حرکت می کند. این در حالی است که در صفحات مشبک ۵۰ درصد پرفش ایجاد شده بصورت آزاد بوده و به سمت پایین دست حرکت می کند.

۱- مقدمه

از جمله متداول ترین سازه های هیدرولیکی مستهلک کننده ی انرژی هستند که در شبکه های آبیاری و زهکشی، آبراهه های فرسایش پذیر، سیستم های تصفیه ی آب و جمع آوری و دفع فاضلاب استفاده می شوند. این سازه ها با توجه به توپوگرافی زمین برای انتقال آب از یک ارتفاع بالاتر به پایین تر، کاهش انرژی جنبشی ناشی از سقوط آب و اعمال سرعت بهینه در کانال ها و شبکه های آبیاری و زهکشی به کار می روند با ریزش جریان و ایجاد انرژی جنبشی بسیار زیاد در پایین دست این سازه ها، امکان ایجاد فرسایش بستر و جداره های کانال به وجود می آید. لذا با استفاده از راهکارهای مناسب بایستی انرژی جریان کاهش یافته و به تبع آن سرعت جریان نیز کاهش یابد. صفحات مشبک به عنوان یک روشی نو و با هدف

طراحی مستهلک کننده های انرژی جریان در پایین دست سازه های مولد جریان فوق بحرانی، با هدف کاهش اثرات تخریبی و فرسایشی آن بر سازه های هیدرولیکی پایین دست همواره برای مهندسين هیدرولیک حائز اهمیت می باشد. در کانال های باز جهت بهینه سازی حجم عملیات خاکی، شیب کانال با شیب طبیعی زمین متعادل می گردد. چنانچه در بعضی از موارد شیب طبیعی زمین از شیب لازم برای کف کانال تند تر باشد، برای انتقال آب از سطح بالاتر به سطح پایین تر از شیب شکن^۱ استفاده می کنند [۱]. شیب شکن ها

1 Drop

* نویسنده عهده دار مکاتبات: lotfollahi@tabrizu.ac.ir



تحمیل پرش هیدرولیکی و تثبیت محل آن، به عنوان یک مستهلک کننده انرژی موثر در رودخانه ها و پایین دست سازه های مولد جریان فوق بحرانی معرفی شده است [۲]

مطالعات زیادی بر روی خصوصیات شیب شکن ها انجام شده است که از آن مورد می توان به تحقیق های انجام شده توسط [۳-۱۰] اشاره نمود. اسن و همکاران^۱ به مطالعه تأثیر وجود پله با ابعاد مختلف در پایین دست شیب شکن های قائم پرداخته و روابطی برای عمق نسبی استخر و عمق نسبی پایین دست برای حالت با و بدون پایه ارائه نمودند [۱۱] چمنی و همکاران^۲ با استفاده از تئوری لایه ی برشی و جت سطحی توسعه یافته در شیب شکن قائم، با استفاده از نتایج آزمایشگاهی محققین قبل خود روابطی برای تخمین میزان استهلاک انرژی نسبی جریان عبوری از شیب شکن قائم در رژیم جریان زیر بحرانی ارائه کردند [۱۲] هونگ و همکاران^۳ مطالعاتی در زمینه تأثیر شیب پایین دست بر روی مشخصات هیدرولیکی جریان عبوری از شیب شکن ها انجام دادند. نتایج نشان داد که طول شیب شکن (L_s) و نیروی برخورد (F_d) با افزایش میزان شیب در پایین دست شیب شکن افزایش یافته است [۱۳] لیو و همکاران^۴ به بررسی اثرات شیب بالا دست روی پارامترهای هیدرولیکی شیب شکن های قائم پرداختند. نتایج ایشان نشان داد که با افزایش عدد فرود و شیب بالادست، مقادیر عمق لبه، عمق آب استخر و زاویه برخورد جت کاهش و فاصله محل برخورد جت با کف افزایش می یابد [۱۴]. صادق فام و همکاران^۵ به بررسی آزمایشگاهی رفتار صفحات مشبک در مواجهه با جریان فوق بحرانی در بازه عدد فرود $2/5$ تا $8/5$ در پرداختند. عدد فرود جریان فوق بحرانی، آرایش مختلف صفحات و نسبت روزنه از پارامترهای اصلی معرفی شد. نتایج آنان نشان داد که صفحات مشبک، نسبت به هر دو پرش هیدرولیکی آزاد و مستغرق، افت انرژی بیشتری داشته و آرایش دوتایی صفحات عملکرد بهتری نسبت به آرایش منفرد دارند همچنین صفحات مشبک با تخلخل ۴۰ درصد بهترین عملکرد خود را در میزان استهلاک انرژی از خود نشان می دهد [۱۵] کاتورانی و کاشفی پور به بررسی تأثیر عرض های مختلف مانع و فاصله های مختلف بین

1 Esen et al.
2 Chamani et al.
3 Hong et al.
4 Liu et al.
5 Sadeghfam et al.

ردیف های مانع بر میزان استهلاک انرژی در شیب شکن های مانع دار پرداختند. نتایج آزمایش ها نشان داد که افزایش همزمان عرض و فاصله، میزان استهلاک انرژی را افزایش می دهد [۱۶]. ترابی و همکاران^۶ به بررسی تاثیر ایجاد زبری بر روی سرریز پلکانی بر میزان اتلاف انرژی پرداختند. نتایج آنان نشان داد که ایجاد زبری بر روی پله های سرریز باعث افزایش ۱۵-۲۰ درصدی راندمان انرژی می گردد [۱۷]. دانشفرز و همکاران به بررسی آزمایشگاهی تأثیر محل قرارگیری صفحات مشبک در میزان استهلاک انرژی پرداخته و نشان دادند که برای تمامی حالات استفاده از صفحات مشبک، میزان استهلاک انرژی ناشی از استفاده از این صفحات بیشتر از استهلاک انرژی نسبی ناشی از پرش آزاد می باشد. همچنین نشان دادند که افزایش عدد فرود عملکرد صفحات مشبک را افزایش و بازه این صفحات را در استهلاک انرژی کاهش می دهد [۲]. دانشفرز و همکاران^۷ به بررسی استهلاک انرژی ناشی از عوامل سیستم های مستهلک کننده پرش هیدرولیکی، بلوک و صفحه مشبک پرداختند. بررسی استهلاک انرژی برای مدل ها نشان داد، برای یک عدد فرود ثابت، مدل صفحه مشبک ۴۰٪ نسبت به مدل ۵۰٪ انرژی بیشتری را در حوضچه های آرامش مستهلک می کند. همچنین بررسی مدل ها نشان داد مدل هایی که در آن ها از بلوک های مانع قبل از صفحات مشبک استفاده شده است استهلاک انرژی بیشتری نسبت به مدل های متناظر بدون بلوک ایجاد می کنند [۱۸]. کبیری سامانی و همکاران^۸ به مطالعه ی پارامترهای هیدرولیکی جریان در مستهلک کننده ی شبکه ای و شیاری افقی پرداختند. نتایج نشان داد که با افزایش نسبت عمق بحرانی به ارتفاع شیب شکن، نسبت استهلاک انرژی به انرژی اولیه کاهش و عمق آب پشت دریچه افزایش می یابد [۱۹]. قادری و همکاران به بررسی تأثیر تنگ شدگی های قائم ورودی بر روی مشخصات هیدرولیکی شیب شکن قائم پرداختند. نتایج آنان نشان داد که وجود تنگ شدگی قائم ورودی، باعث افزایش سرعت در لبه شیب شکن می شود و به همین دلیل با افزایش تلاطم جریان در اثر سقوط جت های تقسیم شده جریان و ایجاد ناحیه ی بیشتری از اختلاط آب و هوا، باعث کاهش انرژی جنبشی پایین دست می گردد [۱]. دانشفرز و همکاران به بررسی آزمایشگاهی

6 Torabi et al.
7 Daneshfaraz et al.
8 Kabiri-Samani et al.

می باشد. با در نظر گرفتن ρ و g به عنوان متغیرهای تکراری رابطه بی بعد (۲) به صورت زیر بدست می آید:

$$\frac{\Delta E}{E_0} = f_2(\text{Re}_0, Fr_0, \frac{P}{y_0}, \frac{t}{y_0}, \frac{d}{y_0}, \frac{y_c}{y_0}, \frac{y_d}{y_0}, \frac{y_p}{y_0}, N, B) \quad (2)$$

که در آن Re و Fr به ترتیب نشان دهنده عدد فرود و عدد رینولدز می باشد. برای معنی دار کردن پارامترهای بدون بعد موثر، با ساده سازی و تقسیم برخی از پارامترهای بی بعد موجود در رابطه (۲) بر هم، رابطه (۳) به صورت زیر حاصل می شود:

$$\frac{\Delta E}{E_0} = f_3(\text{Re}_0, Fr_0, \frac{t}{P}, \frac{d}{P}, \frac{y_c}{P}, \frac{y_d}{P}, \frac{y_p}{P}, N, B) \quad (3)$$

در تمامی آزمایش ها، $7000 \leq \text{Re}_0 \leq 35000$ می باشد، بنابراین جریان کاملاً متلاطم بوده و می توان از اثر لزوجت صرف نظر نمود [۲۲]. همچنین با اندازه گیری عمق بالادست مطابق مطالعات گرت و داوسون^۱ در $10y_b$ (عمق جریان در لبه شیب شکن) [۲۳] مشاهده شد که در تمامی آزمایشات عدد فرود در محدوده $0.68 < Fr_0 < 0.92$ می باشد، باتوجه به محدوده کوچک عدد فرود بالادست از تأثیر این پارامتر بر روی مشخصه های هیدرولیکی شیب شکن ها صرف نظر می شود [۱۹]. طبق مطالعات چاکیر^۲ و بالکیش^۳ پارامتر ضخامت صفحات مشبک به عنوان پارامتری غیر موثر بر استهلاک انرژی معرفی شده است، بنابراین از تأثیرات ضخامت صفحات مشبک در این تحقیق نیز صرف نظر می شود [۲۴-۲۵]. همچنین از تاثیر فاصله صفحات مشبک به دلیل عدم تاثیر آن بر روی استهلاک انرژی نسبی صرف نظر می گردد [۱۵]. به دلیل عدم کنترل عمق پایاب از تاثیر عمق نسبی پایین دست نیز صرف نظر شد. بنابراین با صرف نظر کردن از عدد فرود و عدد رینولدز می توان استهلاک انرژی نسبی را به صورت تابعی زیر تعریف کرد:

$$\frac{\Delta E}{E_0} = f_4(N, B, \frac{y_c}{P}) \quad (4)$$

همچنین عمق نسبی استخر و عمق نسبی پایین دست صفحه مشبک نیز بر اساس کمیت های بدون بعد بصورت زیر بیان می شود:

$$\frac{y_p}{P} = f_5(N, B, \frac{y_c}{P}) \quad (5)$$

استهلاک انرژی در شیب شکن های قائم مجهز به صفحات مشبک افقی در شرایط جریان فوق بحرانی پرداختند. نتایج آنان نشان داد که استفاده از این صفحات مشبک افقی در شیب شکن های قائم باعث افزایش عمق نسبی پایین دست، عمق نسبی استخر و استهلاک انرژی نسبی نسبت به شیب شکن قائم ساده می گردد. همچنین باعث کاهش طول حوضچه آرامش و حذف سازه حوضچه آرامش می گردد. [۲۰] صادق فام و همکاران آبخستگی مابین دریچه و اسکرین قائم را با ۵ نوع مصالح بستر بررسی و تاثیر استهلاک انرژی را بر این بسترها را ارائه نمودند [۲۱].

یکی از موضوعات مورد مطالعه توسط محققین مختلف، ارائه ی روش هایی برای افزایش راندمان استهلاک انرژی در سازه های مستهلک کننده انرژی مانند شیب شکن ها بوده است. در سال های اخیر روش های جایگزین پرش هیدرولیکی و حوضچه آرامش بررسی شده که استفاده از صفحات مشبک در مسیر جریان از جمله این ها روش هاست در مطالعه حاضر گامی نخست و دقیق تر، برای افزایش استهلاک انرژی جریان، با بررسی اثر توامان شیب شکن قائم، واگرایی تدریجی دیواره و صفحات مشبک انجام شده است.

۲- آنالیز ابعادی

پارامترهای مختلفی بر میزان استهلاک انرژی در شیب شکن های قائم مجهز به صفحات مشبک تأثیرگذار هستند که اهمیت برخی از آن ها نسبت به سایر پارامترها بیشتر است. برای رابطه انرژی مقاطع صفر و ۲ در نظر گرفته شده است. شکل ۱، پارامترهای مهم اهداف تحقیق حاضر را نشان می دهد.

با بررسی شرایط آزمایشگاهی و در نظر گرفتن جوانب مختلف، پارامترهای تأثیرگذار بر استهلاک انرژی را می توان به صورت رابطه (۱) نوشت:

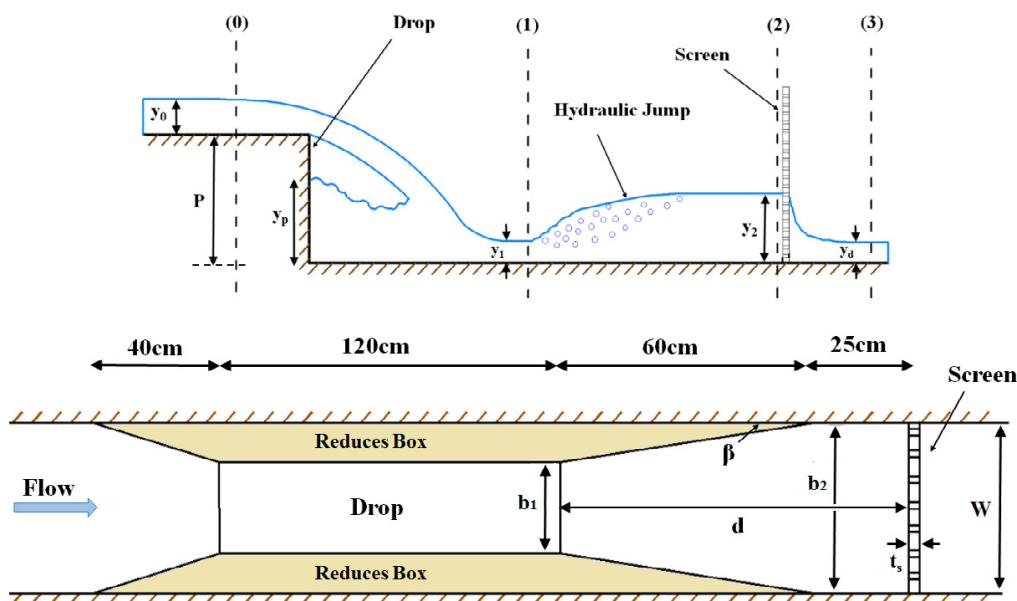
$$\Delta E = f_1(\rho, \mu, g, Q, W, P, N, t, d, y_c, y_0, B, y_d, y_p) \quad (1)$$

که در آن، ΔE استهلاک انرژی، ρ جرم مخصوص آب، μ لزوجت دینامیکی، g شتاب گرانش زمین، Q دبی جریان، W عرض کانال، P ارتفاع شیب شکن، N نسبت تخلخل صفحه مشبک، t ضخامت صفحات مشبک، d فاصله صفحه مشبک با لبه شیب شکن، y_c عمق بحرانی، y_0 عمق بالادست شیب شکن، $B = b_1/b_2$ نسبت واگرایی تدریجی، y_d عمق پایین دست صفحه مشبک و y_p عمق استخر

1 Grant and Dawson

2 Çakir

3 Balkış



شکل ۱. شیب شکن قائم مجهز به صفحات مشبک با واگرایی دیواره
 Fig. 1. Vertical drop equipped to vertical screen with gradually expanding wall

جدول ۱. مشخصات هیدرولیکی و هندسی شیب شکن قائم مجهز به صفحات مشبک و دیواره واگرایی تدریجی
 Table 1. Hydraulic and geometric characteristics of vertical drop equipped to vertical screen with expanding wall

Q(L/min)	Fr ₀	y _c (m)	y ₀ (m)	P(m)	N(%)	β(°)	B=b ₁ /b ₂
۱۵۰-۸۰۰	۰/۶۸-۰/۹۲	۰/۰۹۲-۰/۰۵۸	۰/۰۲۱-۰/۰۶۸	۰/۱۵-۰/۲	۴۰،۵۰	۲۰/۸۲، ۴/۷۶، ۷/۱۲	۰/۱۸، ۰/۶۸، ۰/۱۵ ۱

ایجاد واگرایی در پایین دست شیب شکن نیز از شیشه غیر رنگی جهت مشاهده پارامترهای موثر استفاده شد. صفحات مشبک از جنس پلی اتیلن به ضخامت یک سانتی متر و با روزنه های دایره ایی با ساختار زیگزاگی و به قطر یک سانتی متر ساخته شد. کلیه صفحات مشبک مورد استفاده به حالت عمود بر جریان بعد از شیب شکن با نسبت روزنه های ۴۰ و ۵۰ درصد و در فاصله ی ۰/۸۵ متری از لبه ی شیب شکن نصب گردید. دلیل انتخاب نسبت درصد تخلخل صفحات مشبک عملکرد بهینه این صفحات در تخلخل های ۴۰ و ۵۰ می باشد [۲]. شکل ۲، نمای کلی فلوم آزمایشگاهی و محل استقرار شیب شکن و صفحه مشبک مورد مطالعه را نشان می دهد.

به منظور قرائت عمق آب در قسمت های مختلف بالادست و پایین دست و بر روی شیب شکن شامل عمق اولیه جریان در بالادست شیب شکن، عمق لبه، موقعیت محل برخورد جت با کف، عمق استخر، عمق پایین دست، از عمق سنج نقطه ای با دقت یک میلی متر

$$\frac{y_d}{P} = f_6(N, B, \frac{y_c}{P}) \quad (6)$$

۳- مواد و روش

۳-۱- تجهیزات فلوم آزمایشگاهی

برای انجام آزمایشات در این پژوهش، از فلوم آزمایشگاهی با مقطع مستطیلی به طول و عرض به ترتیب ۵ و ۰/۳ متر با ارتفاع متغیر ۰/۴۵ و ۰/۷ متر و با کف و دیواره هایی از جنس پلکسی گلس که مشاهده دقیق تر و جزئی تر رفتارهای جریان را امکان پذیر می نماید، استفاده شد. از دو عدد پمپ هر کدام با توان ۴۵۰ لیتر در دقیقه که به صورت چرخشی جریان ورودی فلوم را ایجاد می کنند، استفاده گردید، برای ایجاد سازه شیب شکن در کانال از باکس های شیشه ای هم عرض کانال با ارتفاع های ۰/۱۵ و ۰/۲۰ متر استفاده شد. به منظور هوادهی جریان، در دیواره لبه شیب شکن و زیر جت در حال سقوط، سوراخ هایی ایجاد گردید [۲۵]. همچنین به منظور

با دو ارتفاع ۱۵ و ۲۰ سانتی متری در محدوده دبی ۱۵۰ تا ۸۰۰ لیتر در دقیقه انجام شد. نتایج حاصل از این آزمایش با نتایج حاصل از مطالعات راجاراتنام و چمنی (۱۹۹۵) و اسن و همکاران (۲۰۰۴) مورد مقایسه و بررسی قرار گرفت. شکل ۳، مقایسه نتایج پارامترهای عمق نسبی استخر، عمق نسبی پایین دست و استهلاك انرژی با محققین مذکور را نشان می دهد.

همانگونه که در شکل ۳ مشاهده می گردد نتایج تطابق خوبی با مطالعات مربوط به راجاراتنام و چمنی (۱۹۹۵) و اسن و همکاران (۲۰۰۴) دارد. برای درک بهتر این موضوع با استفاده از معیار ارزیابی ضریب تعیین و خطای جذر میانگین، مقایسه داده های مطالعه حاضر و این محققین انجام و در جدول ۲ ارائه شده است. معیار ارزیابی استفاده شده در جدول ۲ بصورت زیر تعریف می شود.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (X_{Exp} - X_{Cal})^2} \quad \text{خطای جذر میانگین} \quad (7)$$

$$R^2 = \left(\frac{n \sum X_{Exp} X_{Cal} - (\sum X_{Exp})(\sum X_{Cal})}{\sqrt{[n(\sum X_{Exp}^2) - (\sum X_{Exp})^2]} \sqrt{[n(\sum X_{Cal}^2) - (\sum X_{Cal})^2]}} \right)^2 \quad \text{ضریب تعیین} \quad (8)$$

مطابق معیارهای ارزیابی جدول ۲ برای هر سه پارامتر مورد بررسی در مقایسه با هر دو مطالعه انجام شده قبلی، مشاهده می گردد که نتایج دارای دقت و نزدیکی خوبی می باشد.

۴-۱- تاثیر واگرایی دیواره بر پارامترهای شیب شکن قائم

با توجه به اینکه واگرایی مقطع در پایین دست شیب شکن در نظر گرفته شده است، واگرایی ایجاد شده بر عمق استخر، عمق پایین دست شیب شکن و همچنین استهلاك انرژی تاثیر گذار می باشد. شکل ۴ تاثیر واگرایی دیواره بر پارامترهای شیب شکن قائم را نشان می دهد. عرض جت ورودی به دلیل وجود واگرایی کمتر از عرض فلوم می باشد، این امر موجب تلاطم در استخر شده و دبی برگشتی به استخر از کناره های فلوم در دو طرف عبور کرده و ضمن افزایش عمق استخر، باعث تلاطم در کناره های جت و همچنین توزیع غیر یکنواخت عمق در پایین دست شیب شکن شده است. (عمق در کناره ها بیشتر از عمق در محور مرکزی کانال است). این امر باعث افزایش استهلاك انرژی در پایین دست شیب شکن قائم می شود. بطور متوسط با وجود واگرایی دیواره، استهلاك انرژی ۲۵ درصد افزایش می یابد. با افزایش زاویه واگرایی و افزایش دبی غیر یکنواختی

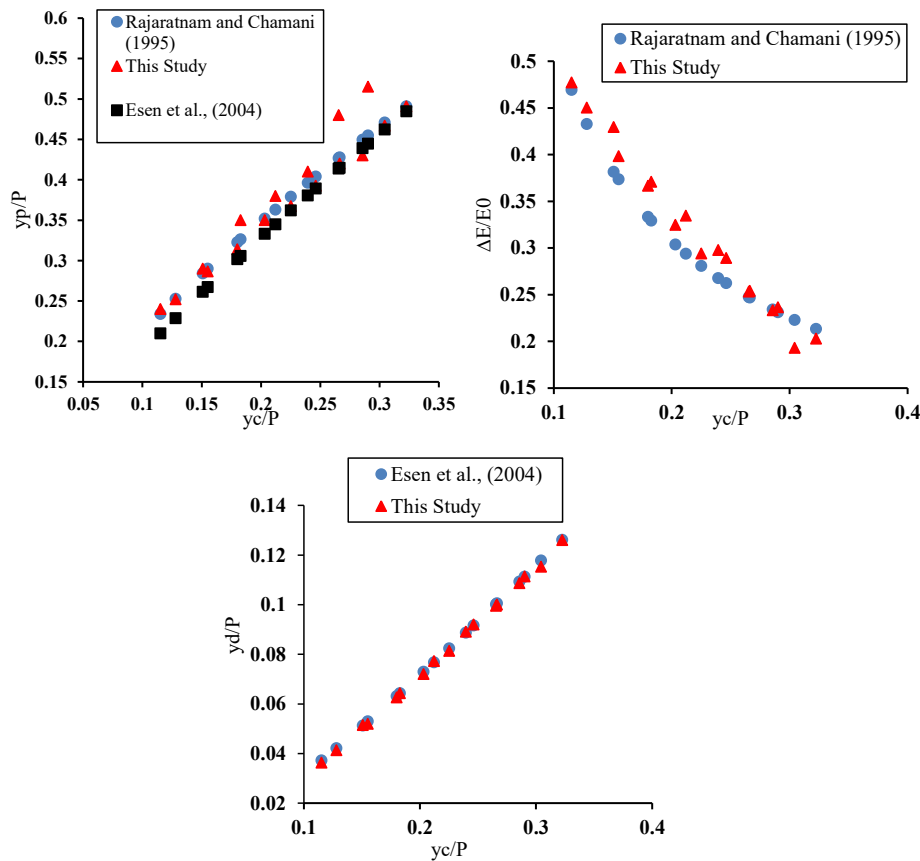


شکل ۲. نمای کلی فلوم آزمایشگاه هیدرولیک
Fig. 2. Overview of hydraulic laboratory flume

و برای اندازه گیری طول پرش از متر بنایی با دقت یک میلی متر استفاده شد. همچنین دبی جریان با استفاده از روتامتر نصب شده بر پمپ با خطای نسبی $\pm 2\%$ درصد قرائت می شود. آزمایش های مربوط به این تحقیق با توجه به ابعاد فلوم آزمایشگاهی از دو ارتفاع شیب شکن قائم ۱۵ / ۰ و ۰ / ۲ متر با چهار زاویه واگرایی صفر، ۲/۸۲، ۴/۷۶ و ۷/۱۲ درجه در پایین دست این سازه استفاده گردید. طول واگرایی ۰ / ۶ متر از لبه شیب شکن و فاصله صفحات مشبک از انتهای واگرایی با توجه به مطالعات دانشفراز و همکاران که فاصله این صفحات از محل ایجاد جریان فوق بحرانی را کم تاثیر معرفی کرده اند، ۰ / ۲۵ متر انتخاب گردید [۱۸]. جدول ۱ مشخصات هندسی شیب شکن قائم مجهز به صفحات مشبک و با دیواره واگرا و خلاصه آن شرایط هیدرولیکی جریان عبوری تحقیق حاضر را نشان می دهد.

۴-نتایج و بحث

در مطالعه حاضر ابتدا آزمایشاتی بر روی شیب شکن قائم ساده



شکل ۳. مقایسه نتایج حاصل از شیب شکن قائم ساده با محققین پیشین
 Fig. 3. Comparison of results of vertical drop with previous researchers

جدول ۲. مقایسه نتایج حاصل از شیب شکن قائم ساده با محققین پیشین بادر نظر گرفتن معیار ارزیابی
 Table 2. Comparison of results of vertical drop with previous researchers considering the evaluation criteria

معیار ارزیابی		پارامتر	مقایسه نتایج
RMSE(m)	R ²		
۰/۰۲۲	۰/۹۳۳	عمق استخر	مطالعه حاضر و راجاراتنام و چمنی (۱۹۹۵)
۰/۰۲۵	۰/۹۵۸	استهلاک انرژی	
۰/۰۳۱	۰/۹۳۲	عمق استخر	مطالعه حاضر و اسن و همکاران (۲۰۰۴)
۰/۰۰۸	۰/۹۹	عمق پایین دست	

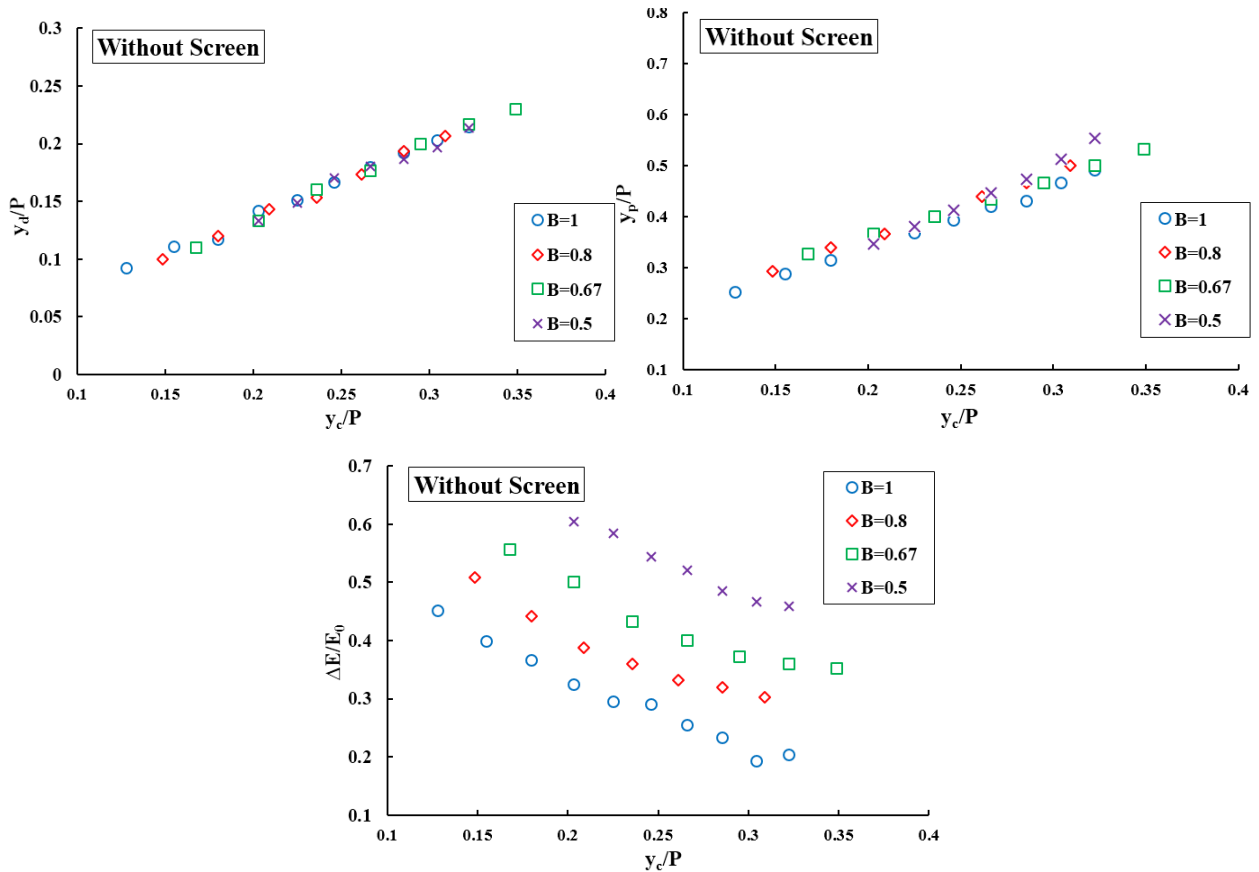
متفاوت را نشان می دهد. مشاهده می گردد که عمق استخر در ارتفاع شیب شکن ۲۰ سانتی متر کمتر از ارتفاع ۱۵ سانتی متر می باشد.

۲-۴- تاثیر وجود صفحات مشبک بر استهلاک انرژی پایین دست شیب شکن قائم

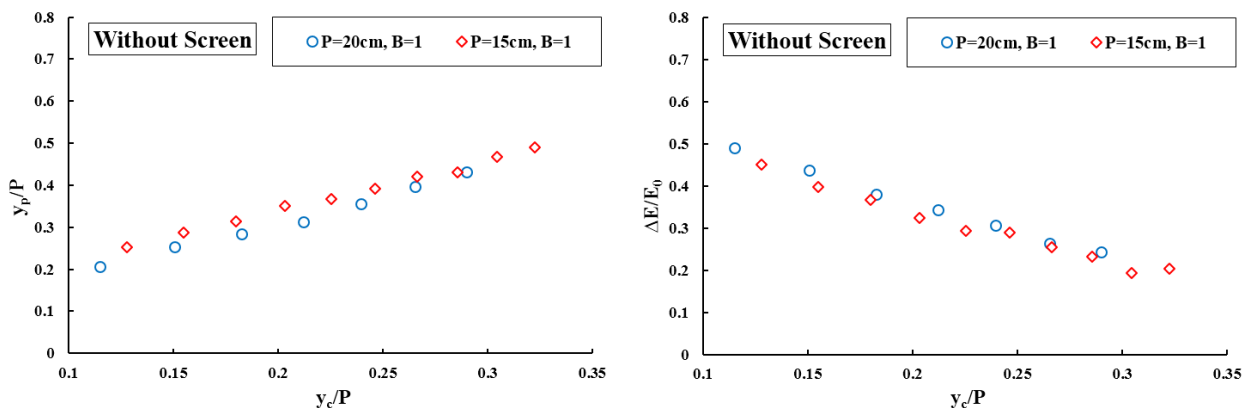
وجود صفحات مشبک به عنوان سازه ی مستهلک کننده ی انرژی با ایجاد پرش در بالا دست خود باعث کاهش انرژی جریان عبوری از خود می گردند. شکل ۷ تاثیر وجود صفحات مشبک بر روی عمق استخر، عمق پایین دست و میزان استهلاک انرژی را در دو

عمق پایین دست افزایش می یابد. همچنین با افزایش دبی (افزایش y_e/P) میزان استهلاک انرژی به علت استعراق جریان در پایین دست شیب شکن کاهش می یابد. شکل ۵ تاثیر ارتفاع شیب شکن قائم را بر روی میزان استهلاک انرژی و عمق استخر را نشان می دهد.

مشاهده می شود که با افزایش ارتفاع شیب شکن، میزان استهلاک انرژی جریان، در اثر شدت برخورد بیشتر جت جریان عبوری از روی شیب شکن با کف پایین دست آن افزایش می یابد. همچنین با افزایش ارتفاع شیب شکن، عمق استخر کاهش می یابد. شکل ۶ جریان عبوری از روی شیب شکن ها را در شرایط دو ارتفاع



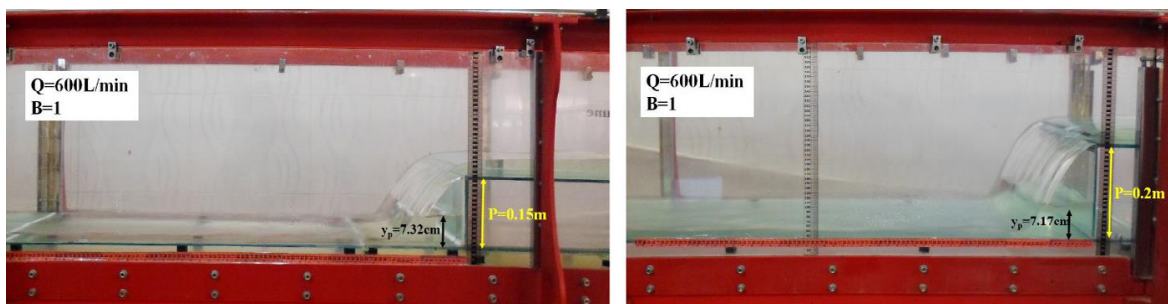
شکل ۴. تاثیر واگرایی دیواره بر مشخصات هیدرولیکی شیب شکن قائم
 Fig. 4. The effect of expanding wall on the hydraulic characteristics of the vertical drop



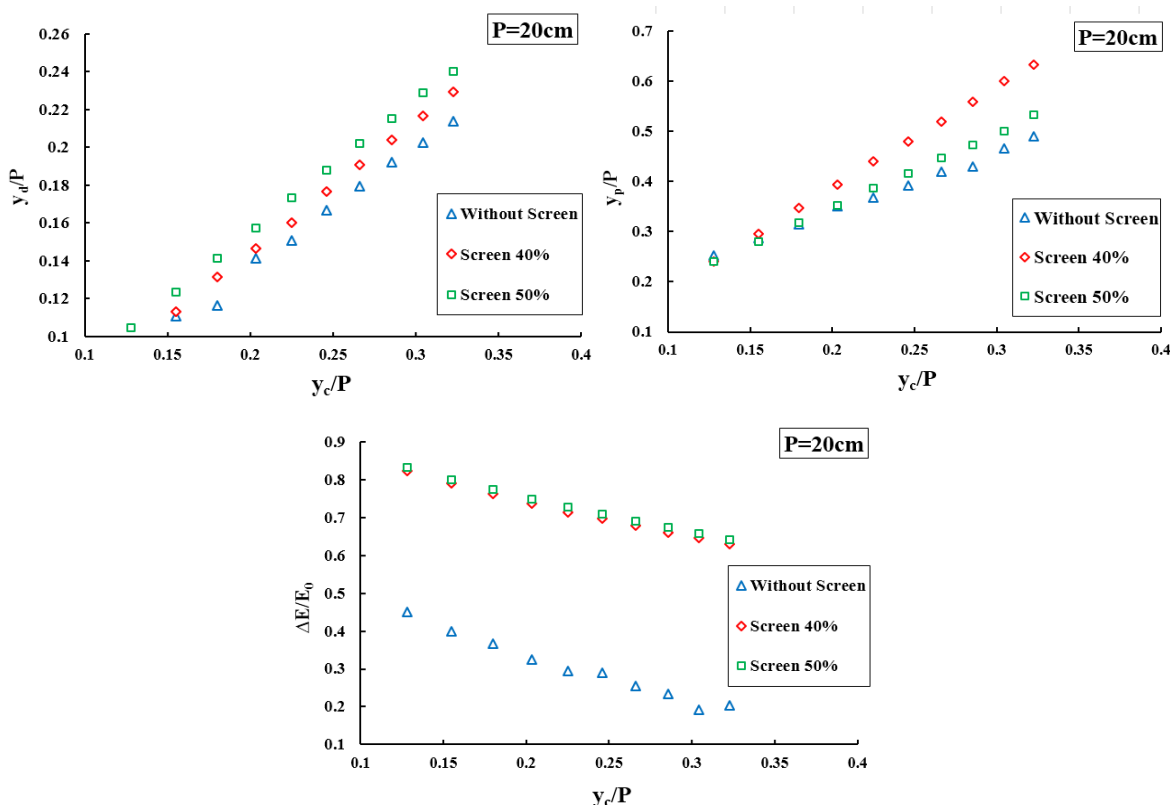
شکل ۵. تاثیر ارتفاع شیب شکن بر میزان استهلاک انرژی و عمق استخر
 Fig. 5. The effect of drop height on energy dissipation and pool depth

تلاطم همراه است. بطوریکه بکارگیری صفحات مشبک باعث افزایش ۴۴ درصدی راندمان استهلاک انرژی جریان در پایین دست شیب شکن قائم می گردد. نکته قابل توجه اینکه، در صفحات مشبک با تخلخل ۴۰ درصد، عمق استخر، بیشتر از تخلخل ۵۰ درصد بوده که دلیل آن مستغرق شدن جت و افزایش عمق استخر می باشد. شکل ۸ تاثیر ارتفاع شیب شکن در

نسبت تخلخل ۴۰ و ۵۰ درصد را نشان می دهد. مشاهده می گردد که وجود صفحات مشبک در پایین دست شیب شکن قائم باعث افزایش عمق استخر، عمق پایین دست و میزان استهلاک انرژی جریان می گردد. افزایش استهلاک انرژی با حضور صفحات مشبک در پایین دست شیب شکن، با تحمیل پرفشار هیدرولیکی و ایجاد



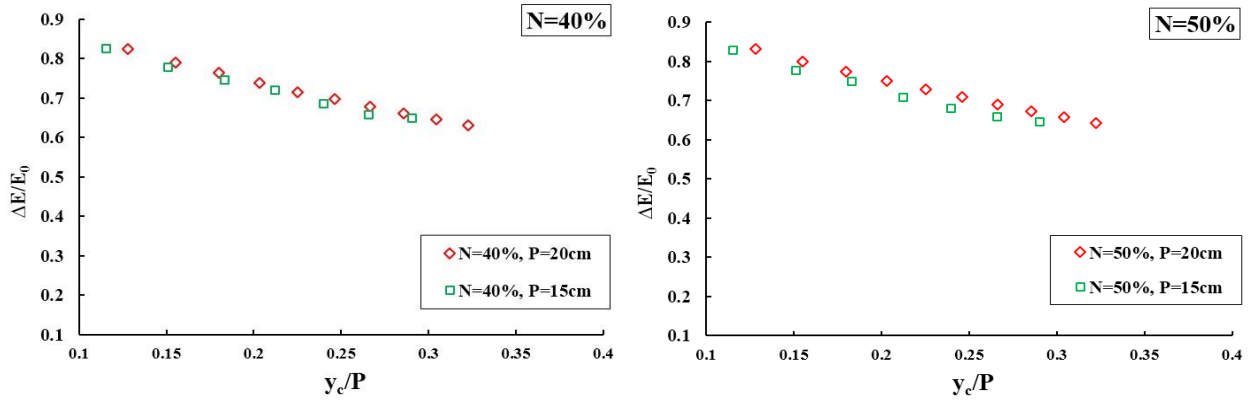
شکل ۶. جریان عبوری از شیب شکنهای قائم در دو ارتفاع ۱۵ و ۲۰ سانتیمتر
 Fig. 6. The flow through the vertical drop at two heights of 15 and 20 cm



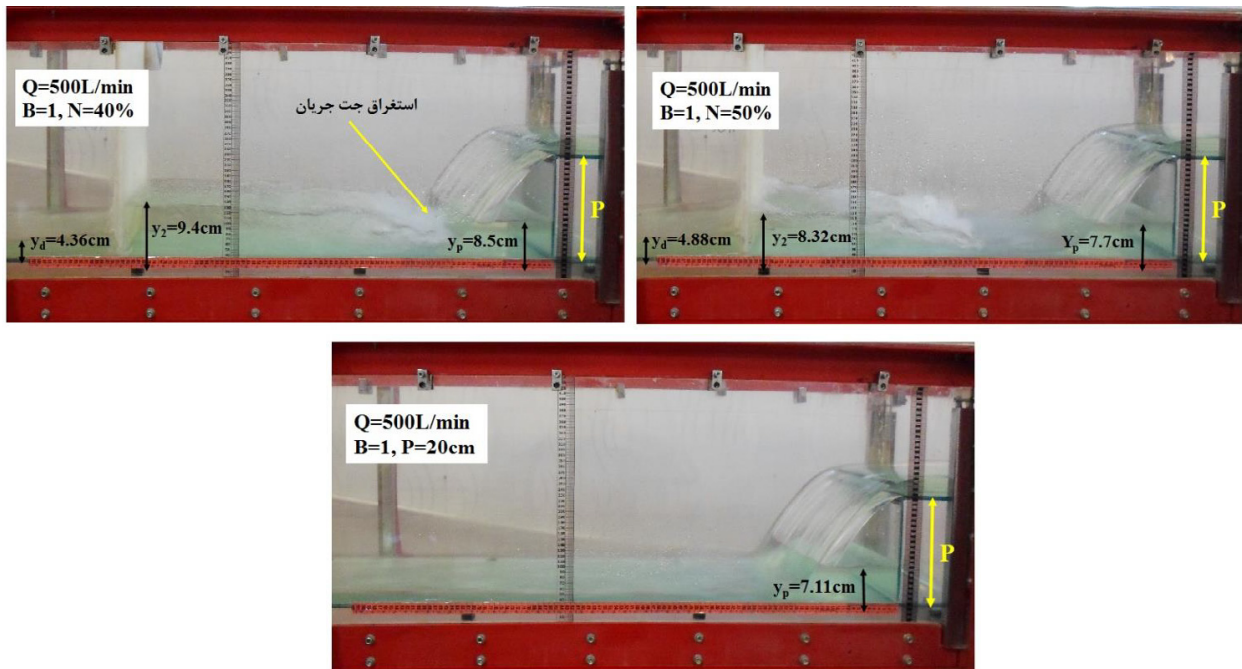
شکل ۷. مقایسه تاثیر وجود صفحات مشبک در پاییندست شیب شکن قائم بر پارامترهای هیدرولیکی آن
 Fig. 7. Comparison of the effect of the presence of screen downstream of the vertical drop on its hydraulic parameters

نسبت تخلخل در پایین دست آن را نشان می دهد. در این شکل استغراق جت جریان در بالادست صفحات مشبک با نسبت تخلخل ۴۰ درصد به وضوح دیده می شود. در این تخلخل، با افزایش دبی پنجه پرش به سمت بالادست حرکت می کند. این در حالی است که در صفحات مشبک ۵۰ درصد پرش ایجاد شده بصورت آزاد می باشد. همچنین عمق پایین دست در صفحات مشبک با نسبت تخلخل ۵۰ درصد به علت عبور دهی بیشتر جریان از خود

حالت وجود صفحات مشبک در دو نوع نسبت تخلخل را بر روی راندمان استهلاک انرژی نشان می دهد. مشاهده می گردد که با افزایش ارتفاع شیب شکن قائم در یک نسبت تخلخل صفحات مشبک، میزان استهلاک انرژی افزایش می یابد ولی این افزایش قابل توجه نبوده و بطور متوسط ۴ درصد باعث افزایش راندمان استهلاک انرژی می گردد. شکل ۹ جریان عبوری از شیب شکن قائم در حالت وجود صفحات مشبک با دو نوع



شکل ۸. مقایسه تاثیر ارتفاع شیب شکن قائم در حالت وجود صفحات مشبک بر روی میزان استهلاک انرژی جریان
Fig. 8. Comparison of the effect of vertical drop height in the presence of screen on the rate of energy dissipation



شکل ۹. جریان عبوری از شیب شکن قائم در حالت بدون وجود و وجود صفحات مشبک با دو نوع تخلخل
Fig. 9. The flow through the vertical drop in the absence and presence of screen with two types of porosity

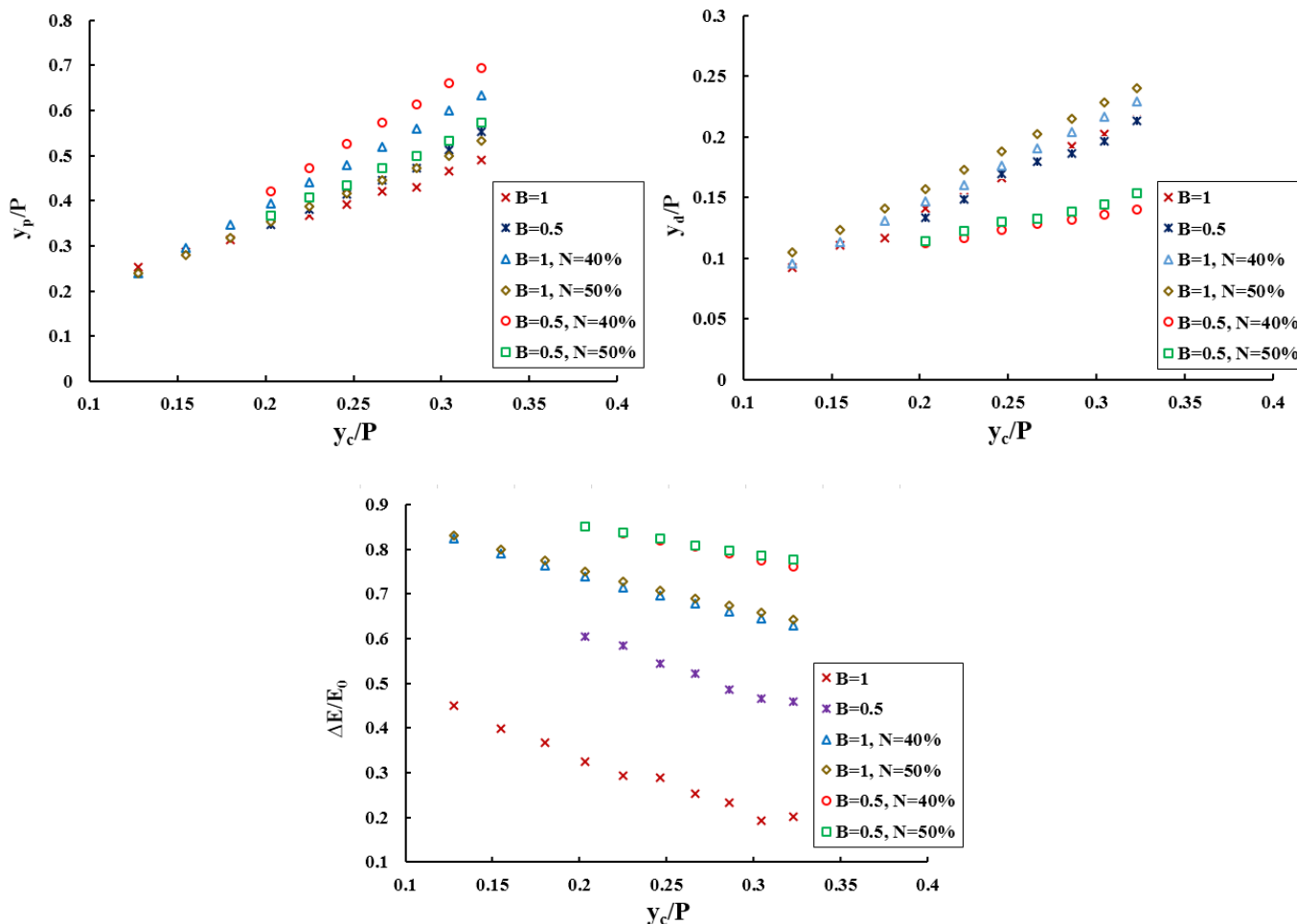
می تواند باعث کاهش هزینه احداث حوضچه های آرامش نیز گردد. شکل ۱۰ تاثیر وجود توام صفحات مشبک به همراه واگرایی دیواره را بر روی عمق استخر، عمق پایین دست و میزان استهلاک انرژی جریان عبوری از شیب شکن قائم را نشان می دهد.

مشاهده می شود که بکارگیری همزمان واگرایی دیواره و صفحات مشبک در پایین دست شیب شکن قائم باعث افزایش استهلاک انرژی و کاهش عمق استخر و عمق پایین دست می گردد. با مقایسه نسبت

نسبت به تخلخل ۴۰ درصد افزایش یافته است.

۳-۴- تاثیر وجود توام صفحات مشبک به همراه واگرایی دیواره بر استهلاک انرژی شیب شکن قائم

ایجاد یک واگرایی در مقطع جریان می تواند راه حل مناسبی برای کاهش عمق موردنیاز برای وقوع پرش هیدرولیکی باشد. از طرف دیگر بکارگیری توام واگرایی دیواره به همراه صفحات مشبک

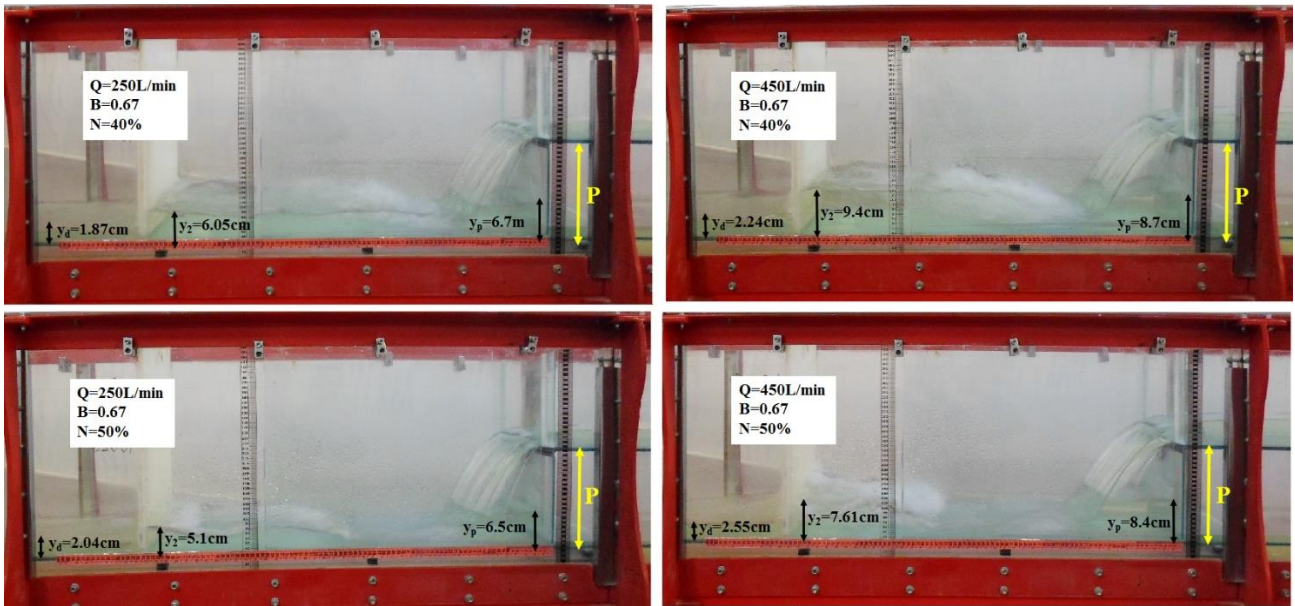


شکل ۱۰. تاثیر وجود توام صفحات مشبک به همراه واگرایی دیواره بر پارامترهای هیدرولیکی پاییندست شیب شکن قائم
 Fig. 10. The combined effect of vertical screen with gradually expanding wall on downstream hydraulic parameters

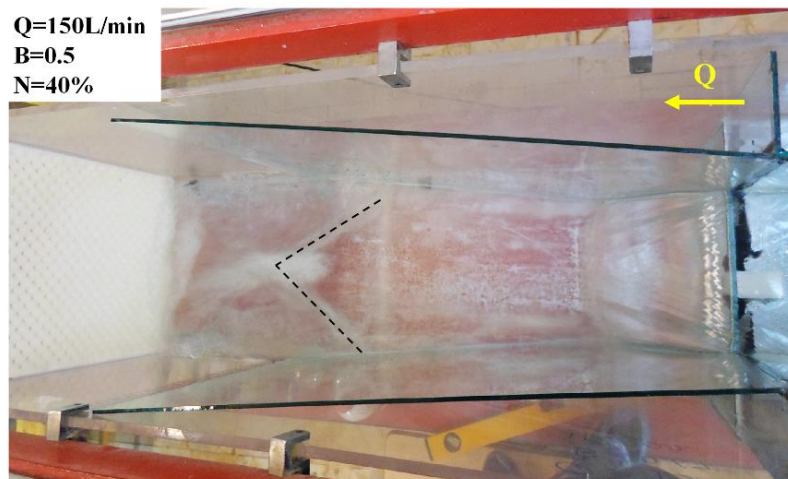
دارد، این در حالی که در صفحات مشبک با نسبت تخلخل ۵۰ درصد پرش هیدرولیکی به سمت پایین دست حرکت می کند پرش تشکیل یافته بعد از شیب شکن با وجود صفحات اسکرین به صورت V شکل می باشد. دلیل این امر توزیع غیر یکنواخت سرعت و عمق در مقطع عرضی کانال به جهت وجود واگرایی می باشد (شکل ۱۲).

براساس آنالیز ابعادی، جهت نشان دادن تاثیر پارامترهای مستقل بر پارامترهای وابسته، می توان معادلات مختلفی را استخراج نمود. لذا با در نظر گرفتن ۷۰ درصد از داده ها به عنوان داده آموزش، ۳۰ درصد آن به عنوان داده تست و استفاده از دستور Solver در اکسل، برای پیش بینی و تخمین پارامترهای عمق نسبی استخر، عمق نسبی پایین دست و استهلاک انرژی روابط زیر ارائه گردید.

تخلخل صفحات مشبک با وجود دیواره های واگرا مشاهده می گردد که افزایش نسبت تخلخل در واگرایی دیواره ثابت، تاثیری کمی نسبت به هم در استهلاک انرژی دارد، ولی باعث کاهش عمق استخر و افزایش عمق پایین دست می گردد. در نسبت تخلخل ثابت صفحات، افزایش واگرایی دیواره باعث افزایش استهلاک انرژی و عمق استخر و کاهش عمق پایین دست می گردد. بکارگیری همزمان از دیواره واگرا و صفحات مشبک بطور متوسط باعث افزایش ۴۸ درصد راندمان استهلاک انرژی جریان در پایین دست شیب شکن قائم می گردد. شکل ۱۱ جریان عبوری از شیب شکن قائم در حالت وجود همزمان صفحات مشبک و واگرایی دیواره در پایین دست آن را نشان می دهد. با افزایش دبی، در زاویه دیواره واگرایی ثابت، پرش هیدرولیکی در صفحات مشبک با نسبت تخلخل ۴۰ درصد به بالادست تمایل



شکل ۱۱. جریان عبوری از شیب شکن قائم در حالت وجود همزمان صفحات مشبک و واگرایی دیواره در پاییندست آن
 Fig. 11. The flow through the vertical drop in the presence of screen plates gradually expanding wall



شکل ۱۲. پرش تشکیل یافته بعد از شیب شکن با وجود صفحات اسکرین به صورت V شکل به دلیل واگرایی دیواره
 Fig. 12. Jump V-shaped formed after the drop with screens and gradually expanding wall

ضرایب معادله فوق برای هر سه پارامتر به همراه معیارهای ارزیابی آن ها در جدول (۳) ارائه شده است.

$$\frac{y_p}{p} = a \left(\frac{y_p}{p} \right)^b B^c N^d + e \quad (9)$$

۵- نتیجه گیری

در این تحقیق به بررسی آزمایشگاهی عملکرد شیب شکن های قائم مجهز به صفحه مشبک با واگرایی تدریجی در پایین دست آن در راندمان استهلاک انرژی پرداخته شد و نتایج زیر حاصل گردید:
 ۱- واگرایی دیواره ایجاد شده در پایین دست شیب شکن قائم باعث تلاطم در کناره های جت و همچنین توزیع غیر یکنواخت عمق

$$\frac{y_d}{p} = a \left(\frac{y_p}{p} \right)^b B^c N^d + e \quad (10)$$

$$\frac{\Delta E}{E_0} = a \left(\frac{y_p}{p} \right)^b B^c N^d + e \quad (11)$$

جدول ۳. ضرایب روابط تخمین پارامترهای عمق نسبی استخر، عمق نسبی پایین دست و استهلاک انرژی و معیار ارزیابی

Table 3. Coefficients of estimating the parameters of the parameters of the relative pool depth, the relative downstream depth, energy dissipation and evaluation criteria

معیار ارزیابی		ضرایب ثابت					پارامتر
RMSE(m)	R ²	e	d	c	b	a	
۰/۰۱۵	۰/۹۶۳	۰/۱۰۵	-۰/۲۹	۰/۱۷۷	۱/۰۹۳۶	۱/۲۴۲	عمق نسبی استخر
۰/۰۱۳	۰/۹۲	۰/۰۶۸	۰/۳۴	۰/۶۸	۱/۸۷	۱/۸۱۴	عمق نسبی پایین دست
۰/۰۱	۰/۹۷۲	۱/۰۳	-۰/۰۷۸۸	۰/۴۲۸	۰/۶۸۷	-۰/۸۰۷۷	استهلاک انرژی نسبی

این در حالی است که در صفحات مشبک ۵۰ درصد پرش ایجاد شده بصورت آزاد می باشد.

۷- بکارگیری همزمان واگرایی دیواره و صفحات مشبک در پایین دست شیب شکن قائم باعث افزایش استهلاک انرژی و کاهش عمق استخر و عمق پایین دست می گردد. افزایش نسبت تخلخل در واگرایی دیواره ثابت، تأثیری کمی نسبت به هم در استهلاک انرژی دارد، ولی باعث کاهش عمق استخر و افزایش عمق پایین دست می گردد. در نسبت تخلخل ثابت صفحات، افزایش واگرایی دیواره باعث افزایش استهلاک انرژی و عمق استخر و کاهش عمق پایین دست می گردد. ۸- بکارگیری همزمان از دیواره واگرا و صفحات مشبک بطور متوسط باعث افزایش ۴۸ درصد راندمان استهلاک انرژی جریان در پایین دست شیب شکن قائم می گردد.

۹- با توجه به نتایج و مشاهدات آزمایشگاهی تحقیق حاضر می توان نتیجه گرفت بکارگیری توام واگرایی دیواره به همراه صفحات مشبک می تواند باعث کاهش هزینه احداث حوضچه های آرامش نیز گردد.

منابع

- [1] A. Ghaderi, M. Dasineh, S. Abbasi, Impact of vertically constricted entrance on hydraulic characteristics of vertical drop (Numerical Investigation), Journal of Hydraulics, 13(4) (2019) 121-131 (in Persian). DOI: 10.30482/jhyd.2019.82713
- [2] R. Daneshfaraz, S. Sadeghfam, A. Rezazadeh Joudi, Experimental investigation on the effect of screen's location on the flow's energy dissipation, Irrigation and Drainage Structures Engineering Research, 17(67) (2017). 47-62 (in Persian). DOI: 10.22092/aridse.2017.109616

در پایین دست آن می گردد و ضمن افزایش عمق استخر و عمق پایین دست شیب شکن باعث افزایش ۲۵ درصدی راندمان استهلاک انرژی جریان می گردد. با افزایش دبی (افزایش y/P) میزان استهلاک انرژی به علت استغراق جریان در پایین دست شیب شکن کاهش می یابد.

۲- در شرایط هیدرولیکی یکسان، با افزایش ارتفاع شیب شکن میزان استهلاک انرژی جریان در اثر شدت برخورد بیشتر جت جریان عبوری از روی شیب شکن با کف پایین دست آن افزایش یافته و عمق استخر کاهش می یابد.

۳- وجود صفحات مشبک در پایین دست شیب شکن قائم باعث افزایش عمق استخر، عمق پایین دست و میزان استهلاک انرژی جریان می گردد. بطوریکه بکارگیری صفحات مشبک باعث افزایش ۴۴ درصدی راندمان استهلاک انرژی جریان در پایین دست شیب شکن قائم می گردد. در صفحات مشبک با تخلخل ۴۰ درصد، عمق استخر، بیشتر از تخلخل ۵۰ درصد بوده که دلیل آن مستغرق شدن جت و افزایش عمق استخر می باشد.

۴- افزایش ارتفاع شیب شکن قائم در یک نسبت تخلخل صفحات مشبک، میزان استهلاک انرژی را افزایش می دهد ولی این افزایش قابل توجه نبوده و بطور متوسط ۴ درصد باعث افزایش راندمان استهلاک انرژی می گردد.

۵- عمق پایین دست در صفحات مشبک با نسبت تخلخل ۵۰ درصد به علت عبور دهی بیشتر جریان از خود نسبت به تخلخل ۴۰ درصد افزایش می یابد.

۶- با افزایش دبی، پرش هیدرولیکی تشکیل شده در بالادست صفحات مشبک با نسبت تخلخل ۴۰ درصد از نوع مستغرق می باشد.

- dissipaters in submerged hydraulic jump, Turkish Journal of Engineering and Environmental Sciences, 38(2) (2015)126-138.
- [16] S. Katourany, S.M. Kashefipour, Effect of the geometric characteristics of baffled and bed slopes of drop on hydraulic flow conditions in baffled apron drop, Science and Irrigation Shahid Chamran Ahwaz, 37(2) (2014.) 51-59. (in Persian).
- [17] H. Torabi, A. Parsaie, H. Yonesi, E. Mozafari, Energy dissipation on rough stepped spillways, Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Civil Engineering, 42(3) (2018) 325-330.
- [18] R. Daneshfaraz, S. Sadeghfam, A. Ghahramanzadeh, Three-dimensional numerical investigation of flow through screens as energy dissipaters, Canadian Journal of Civil Engineering, 44(10) (2017) 850-859.
- [19] A.R. Kabiri-Samani, E. Bakhshian, M.R. Chamani, Flow characteristics of grid drop-type dissipaters, Flow Measurement and Instrumentation, 54 (2017) 298-306.
- [20] R. Daneshfaraz, S. Sadeghfam, V. Hasanniya, Experimental investigation of energy dissipation the vertical drops equipped with a horizontal screen with the supercritical flow, Iranian Journal of Soil and Water Research, (2019) (in Persian). DOI: 10.22059/ijswr.2019.269301.668053
- [21] S. Sadeghfam, R. Daneshfaraz, R. Khatibi, O. Minaei, 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, (2019).
- [22] W.H. Hager, Hydraulic jump in non-prismatic rectangular channels, Journal of Hydraulic Research, 23(1) (1985) 21-35.
- [23] D.M. Grant, B.D. Dawson, Open channel flow measurement handbook". 5th ed. ISCO Inc. 1998.
- [24] P. Çakir, Experimental investigation of energy dissipation through screens (Doctoral dissertation, M. Sc. thesis, Department of Civil Engineering, Middle East Technical University, Ankara, Turkey), 2003.
- [3] M.W. Bakhmeteff, Hydraulics of open channels, New York and London, McGraw-Hill book company, Inc. (1932).
- [4] W. Rand, Flow geometry at straight drop spillways, In Proceedings of the American Society of Civil Engineers, 81(9) (1955) 1-13.
- [5] H. Rouse, Discharge characteristics of the free overfall: Use of crest section as a control provides easy means of measuring discharge, Civil Engineering, 6(4) (1936) 257-260.
- [6] M. A. Gill, Hydraulics of rectangular vertical drop structures, Journal of Hydraulic Research, 17(4) (1979) 289-302.
- [7] W. L. Moore, Energy loss at the base of a free overfall, Transactions of the American Society of Civil Engineers, 108(1) (1943) 1343-1360.
- [8] N. Rajaratnam, M. R. Chamani, Energy loss at drops, Journal of Hydraulic Research, 33(3) (1995) 373-384.
- [9] S. Wu, N. Rajaratnam, Impinging jet and surface flow regimes at drops, Journal of Hydraulic Engineering, 36(1) (1997) 69-74.
- [10] M. Chamani, M. K. Beirami, Flow characteristics at drops. Journal of Hydraulic Engineering, 128(8) (2002.) 788-791.
- [11] I.I. Esen, J.M. Alhumoud, K. A. Hannan, Energy loss at a drop structure with a Step at the base, Water international, 29(4) (2004.) 523-529.
- [12] M. R. Chamani, N. Rajaratnam, M.K. Beirami, Turbulent jet energy dissipation at vertical drops, Journal of hydraulic engineering, 134(10) (2008) 1532-1535.
- [13] Y.M. Hong, H.S. Huang, S. Wan, Drop characteristics of free-falling nappe for aerated straight-drop spillway, Journal of Hydraulic Research, 48(1) (2010) 125-129.
- [14] S.I. Liu, J.Y. Chen, Y.M. Hong, H.S. Huang, R.V. Raikar. Impact characteristics of free over-fall in pool zone with upstream bed slope, Journal of Marine Science and Technology, 22(4) (2014) 476-486.
- [15] S. Sadeghfam, A.A. Akhtari, R. Daneshfaraz, G. Tayfur, Experimental investigation of screens as energy

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

[25] G. Balkiş, Experimental investigation of energy dissipation through Inclined Screens, (Doctoral dissertation, Middle East Technical Univ, Ankara, Turkey), 2004.

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

B. Nayebyzadeh, M.A. Lotfollahi-Yaghin, R. Daneshfaraz, Experimental study of Energy Dissipation at Vertical Drops Equipped to Vertical Screen with Gradually Expanding at the Downstream, Amirkabir J. Civil Eng., 52(12) (2021) 3059-3072.

DOI: [10.22060/ceej.2019.16493.6265](https://doi.org/10.22060/ceej.2019.16493.6265)

