

بررسی آزمایشگاهی تأثیر قطر صفحات مشبک قائم در استهلاک انرژی در پایین دست شیب شکن قائم

رسول دانشفراز، امیر قادری و نوید خواجه‌ای

دوره ۷، شماره ۲، تابستان ۱۴۰۰، صفحات ۳۶۵-۳۵۶

Vol. 7(2), Summer 2021, 356-365

DOI: 10.22034/jewe.2021.260857.1481

**Experimental Study of The Effect of Vertical
Screen Diameter on Energy Dissipation at
Downstream Vertical Drop**

Daneshfaraz, R., Ghaderi, A. and Khagei, N.



www.jewe.ir

OPEN ACCESS

ارجاع به این مقاله:

دانشفراز، ر.، قادری، ا. و خواجه‌ای، ن. (۱۴۰۰). بررسی آزمایشگاهی تأثیر قطر صفحات مشبک قائم در استهلاک انرژی در پایین دست شیب شکن قائم. محیط زیست و مهندسی آب، دوره ۷، شماره ۲، صفحات: ۳۶۵-۳۵۶.

Citing this paper: Daneshfaraza, R., Ghaderi, A. and Khagei, N. (2021). Experimental study of the effect of vertical screen diameter on energy dissipation at downstream vertical drop. Environ. Water Eng., 7(2), 356-365. DOI:10.22034/jewe.2021.260857.1481

مقاله پژوهشی

بررسی آزمایشگاهی تأثیر قطر صفحات مشبک قائم در استهلاک انرژی در پایین دست شیب شکن قائم

رسول دانشفراز^{۱*}، امیر قادری^۲ و نوید خواجه‌ای^۳

استاد، گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه مراغه، مراغه، ایران
^۲دانشجوی دکترا، گروه عمران، دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه زنجان، زنجان، ایران
^۳دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه مراغه، مراغه، ایران

*نویسنده مسئول: daneshfaraz@maragheh.ac.ir

مقاله کامل

تاریخ پذیرش: [۱۳۹۹/۱۲/۰۲]

تاریخ بازنگری: [۱۳۹۹/۱۱/۳۰]

تاریخ دریافت: [۱۳۹۹/۰۹/۱۶]

چکیده

صفحات مشبک از جمله سازه‌های الحاقی، در پایین دست سازه‌های هیدرولیکی است که در سال‌های اخیر جهت استهلاک انرژی و جلوگیری از فرسایش بستر کانال استفاده می‌شود. لذا در پژوهش حاضر از صفحات مشبک قائم در پایین دست شیب شکن قائم به منظور استهلاک انرژی استفاده شد و تأثیر اندازه روزه صفحات بر میزان استهلاک انرژی بررسی شد. آزمایش‌ها در قطرهای نسبی ۰/۰۶۷، ۰/۱۳۳ و ۰/۲ با تخلخل ۵۰٪ و محدوده عمق بحرانی نسبی ۰/۱۳ تا ۰/۳۹ انجام شد. نتایج نشان داد با افزایش قطر نسبی صفحات مشبک قائم، پرش هیدرولیکی تشکیل یافته در پشت صفحات مشبک مستغرق شده و سبب کاهش عملکرد این صفحات در استهلاک انرژی می‌گردد. همچنین نتایج نشان داد که افزایش قطر نسبی صفحات مشبک سبب افزایش عمق استخر شیب شکن قائم می‌شود به گونه‌ای که صفحه مشبک با قطر نسبی ۰/۲ در مقایسه با قطر نسبی ۰/۰۶۷ عمق استخر را به میزان ۲۱٪ افزایش می‌دهد. برای انرژی باقی مانده نسبی نیز با اینکه افزایش قطر صفحات مشبک سبب افزایش ناچیز انرژی باقی مانده نسبی می‌شود، اما این صفحات حداقل انرژی باقی مانده نسبی را ایجاد کرده و محدوده عدد فرود پایین دست را برای هر سه قطر نسبی صفحات در بازه ۱/۳۱ تا ۱/۸ محدود می‌کند.

واژه‌های کلیدی: انرژی نسبی باقی مانده؛ شیب شکن قائم؛ عمق استخر؛ قطر صفحه مشبک؛ مستهلک کننده انرژی.

۱- مقدمه

کنترل سرعت و انرژی جنبشی جریان در پایین دست سازه‌های هیدرولیکی به منظور پایداری سازه‌ها و جلوگیری از فرسایش بستر کانال از اهمیت بسزایی برخوردار بوده و بدین منظور از سازه‌های مستهلک کننده انرژی استفاده می‌گردد. برای اولین بار توسط (Rajaratnam and Hurtig 2000)، از صفحات مشبک به عنوان سازه الحاقی مستهلک کننده انرژی بحث شده است. صفحات مشبک علاوه بر اینکه با تداخل شدید آب و هوا سبب افزایش استهلاک انرژی می‌شوند، موجب وارد شدن اکسیژن به آب نیز شده و این امر علاوه بر خود پالایی آب برای موجودات زنده داخل آب نیز می‌تواند مفید باشد.

شیب‌شکن‌های قائم در کانال‌های آبیاری برای انتقال آب از ارتفاع بالاتر به پایین‌تر و استهلاک انرژی کاربرد دارند. (Daneshfaraz et al. 2019) به مطالعه تأثیر بستر شنی بر مشخصات پرش گسسته پرداختند. نتایج نشان داد که حوضچه‌های آرامش واگرای ناگهانی با بستر زبر در تمامی نسبت‌های باز شدگی عمق مزدوج پرش را در مقایسه با واگرای با بستر صاف به صورت متوسط ۱۲ تا ۱۶ درصد کاهش می‌دهد. (Daneshfaraz et al. 2020b) گزارش نمودند که جریان فوق بحرانی به‌عنوان جریان ورودی در بالادست شیب‌شکن‌های قائم در اثر سقوط و برخورد، می‌تواند قدرت ضربه‌ای، تخریبی و فرسایشی بسیار قابل توجهی در پایین دست شیب‌شکن‌های قائم داشته باشد. آن‌ها با بررسی وسیعی از بازه اعداد و مقایسه با پژوهش‌های پیشین، دلایل تطابق و یا عدم تطابق پژوهش‌های پیشین را مورد مطالعه قرار داده‌اند.

(Moghadam et al. 2020) به بررسی آزمایشگاهی کاهش فشار دینامیکی در کف استخر پایین دست جام پرتابی برای افزایش زوایای سطح پرداختند. تجزیه و تحلیل‌های نتایج آزمایشگاهی این پژوهش‌گران نشان داد که افزایش عمق آب روی دیواره متحرک شیب‌دار در پایین دست منجر به کاهش فشار متوسط و نوسانات فشار شده و همچنین دریافتند که ضریب فشار نوسان تابعی از عمق آب روی دیواره متحرک شیب‌دار بود.

(Esen et al. 2004) با بررسی آزمایشگاهی، افزایش استهلاک انرژی شیب‌شکن قائم ناشی از به‌کارگیری پله چسبیده به دیواره آن را گزارش نمودند. (Hong et al. 2010) با در نظر گرفتن شیب مثبت در پایین دست

شیب‌شکن قائم، نشان دادند که افزایش شیب سبب افزایش طول ریزش جت و نیروی برخورد حاصل از آن به کف می‌شود. (Liu et al. 2014) شیب مثبت بالادست شیب‌شکن را مورد بررسی قرار داده و نشان دادند که با افزایش شیب، زاویه برخورد جت ریزشی کاهش می‌یابد. (Kabiri-Samani et al. 2017) نیز با به‌کارگیری مستهلک کننده‌های شبکه‌ای و شیاری در لبه شیب‌شکن قائم، تغییر مسیر ریزش جت سقوطی، افزایش عمق استخر و افزایش استهلاک انرژی شیب‌شکن را گزارش کردند.

(Daneshfaraz et al. 2020b) نشان دادند که در نظر گرفتن شیب مثبت برای صفحات مشبک افقی در لبه شیب‌شکن قائم، در مقایسه با حالت بدون شیب تأثیری بر استهلاک انرژی جریان ندارد ولی با این حال طول خیس شده صفحات را افزایش می‌دهد. همچنین (Daneshfaraz et al. 2020a) استفاده از صفحات مشبک به صورت افقی و دوبل در لبه شیب‌شکن قائم نشان دادند که در مقایسه با صفحه مشبک تکی، صفحات مشبک دوبل تأثیری بر استهلاک انرژی ندارد. امروزه صفحات مشبک قائم به‌عنوان یک روش جایگزین حوضچه‌های آرامش جهت استهلاک انرژی جریان در پایین دست سازه‌های هیدرولیکی مورد بررسی قرار گرفته است. تأثیر صفحات مشبک قائم در استهلاک انرژی جریان، برای اولین بار توسط (Rajaratnam and Hurtig 2000) انجام شد. آن‌ها نشان دادند که صفحات مشبک قائم، در مقایسه با پرش هیدرولیکی کلاسیک استهلاک انرژی بیش‌تری دارند. (Çakir 2003) عدم تأثیر ضخامت صفحات مشبک در استهلاک انرژی را گزارش کرد. (Balkis 2004) نیز نشان داد که زاویه قرارگیری صفحات مشبک قائم بر استهلاک انرژی جریان تأثیری ندارد. (Mahmoud et al. 2013) نشان دادند که کارایی صفحات مشبک قائم با روزه‌های مربعی در مقایسه با روزه‌های دایره‌ای در استهلاک انرژی جریان بیش‌تر است. (Sadeghfam et al. 2015) نیز نشان دادند که صفحات مشبک دوتایی در مقایسه با صفحه مشبک منفرد استهلاک انرژی بیش‌تری دارد.

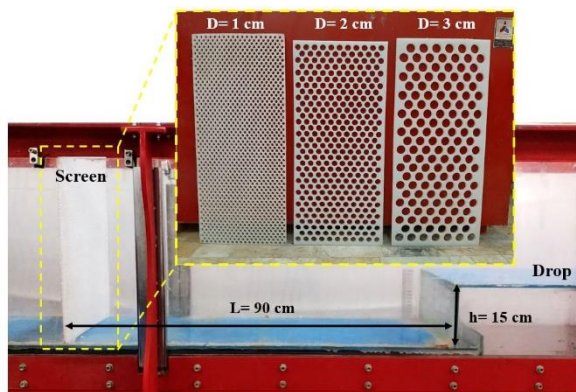
(Daneshfaraz et al. 2017) با بررسی عددی نشان دادند که استفاده از بلوک به‌همراه صفحات مشبک باعث افزایش استهلاک انرژی جریان می‌شود. (Hasanniya 2019) استهلاک انرژی شیب‌شکن قائم با صفحات مشبک قائم در



۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- امکانات آزمایشگاهی

از فلومی به طول، عرض و ارتفاع به ترتیب ۵، ۰/۳ و ۰/۴۵ m با دیواره و کف از جنس پلکسی گلس شفاف واقع در آزمایشگاه هیدرولیک دانشگاه مراغه جهت انجام آزمایش‌های مطالعه حاضر استفاده شد. فلوم مجهز به دو عدد پمپ هر کدام با توان ۱۵۰ تا ۹۰۰ l/min بوده که با استفاده از روتامترهای نصب‌شده بر روی آن، دبی جریان با دقت $\pm 2\%$ قابل اندازه‌گیری می‌شد. شیب‌شکن قائمی از جنس شیشه و هم‌عرض کانال به طول و ارتفاع به ترتیب ۱۲۰ و ۱۵ cm ساخته شد. همچنین از صفحات مشبک به جنس پلی‌اتیلن، با روزنه‌های زیگزاگی، ضخامت ۱ cm و به اندازه قطرهای ۱، ۲ و ۳ cm با تخلخل ثابت ۵۰٪ جهت انجام آزمایش‌ها استفاده گردید. پس از ساخت شیب‌شکن قائم، صفحات مشبک به فاصله ۹۰ cm از لبه شیب‌شکن (6H) نصب شد (Ghaderi et al. 2019; Hasanniya 2019). شکل (۱) مدل آزمایشگاهی مطالعه حاضر را نشان می‌دهد.



شکل ۱- نمایی از مدل آزمایشگاهی پژوهش حاضر

Fig. 1 A view of the laboratory model of the present study

در پژوهش حاضر برای انجام آزمایش‌ها، ابتدا پمپ روشن‌شده و با پایداری شرایط جریان بر روی مدل آزمایشگاهی، پارامترهای عمق بالادست شیب‌شکن (Y_0)، عمق استخر (Y_p) و عمق پایین‌دست صفحه مشبک قائم (Y_{ds}) اندازه‌گیری شد. جهت اندازه‌گیری عمق استخر از یک اشل نواری با دقت mm ۱ و برای اندازه‌گیری عمق بالادست و پایین‌دست نیز از یک عمق سنج نقطه‌ای با دقت یک میلی‌متر استفاده شد. به منظور افزایش دقت اندازه‌گیری و کاهش خطای انسانی و خطای دستگاه، در ۵ نقطه از مقطع عرضی عمق مربوطه اندازه‌گیری می‌شد و این فن توسط پژوهش‌گرانی همچون Daneshfaraz

پایین‌دست آن را در محدوده عمق بحرانی نسبی ۰/۱۳ تا ۰/۳۹ با دو تخلخل ۴۰ و ۵۰٪ صفحات مشبک بررسی نمود. نتایج مطالعه ایشان حاکی از آن است که تخلخل ۵۰٪ صفحات مشبک، بیش‌ترین استهلاک انرژی جریان پایین‌دست شیب‌شکن قائم را به خود اختصاص داده و با افزایش فاصله صفحه مشبک قائم از لبه شیب‌شکن میزان استهلاک انرژی افزایش می‌یابد.

Daneshfaraz et al. (2020b) نیز به بررسی استهلاک انرژی صفحات مشبک قائم دوگانه بر روی بستر رسوبی پرداخته و نشان دادند صفحات مشبک قائم دوتایی با تخلخل ۴۰٪ دارای بیش‌ترین استهلاک انرژی و صفحه مشبک قائم تکی با تخلخل ۵۰٪، دارای حداقل عمق آبستنگی است. Nayebzadeh et al. (2019) نیز با بررسی استهلاک انرژی شیب‌شکن قائم با واگرایی تدریجی و صفحه مشبک قائم پایین‌دست آن نشان دادند که در مقایسه با حالت بدون واگرایی و با افزایش زاویه واگرایی، استهلاک انرژی افزایش می‌یابد.

Daneshfaraz et al. (2020c) استهلاک انرژی پایین‌دست شیب‌شکن مایل را با استفاده از صفحات مشبک قائم به صورت آزمایشگاهی مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها در مطالعات خود سه زاویه و دو ارتفاع برای شیب‌شکن مایل در نظر گرفته و دو تخلخل ۴۰ و ۵۰٪ را برای صفحات مشبک انتخاب کردند. نتایج مطالعات آن‌ها نشان داد که تخلخل ۵۰٪ صفحات مشبک به دلیل وقوع پرش کاذب استهلاک انرژی بیشتری داشته و زاویه شیب‌شکن مایل تأثیری بر میزان استهلاک انرژی صفحات مشبک ندارد.

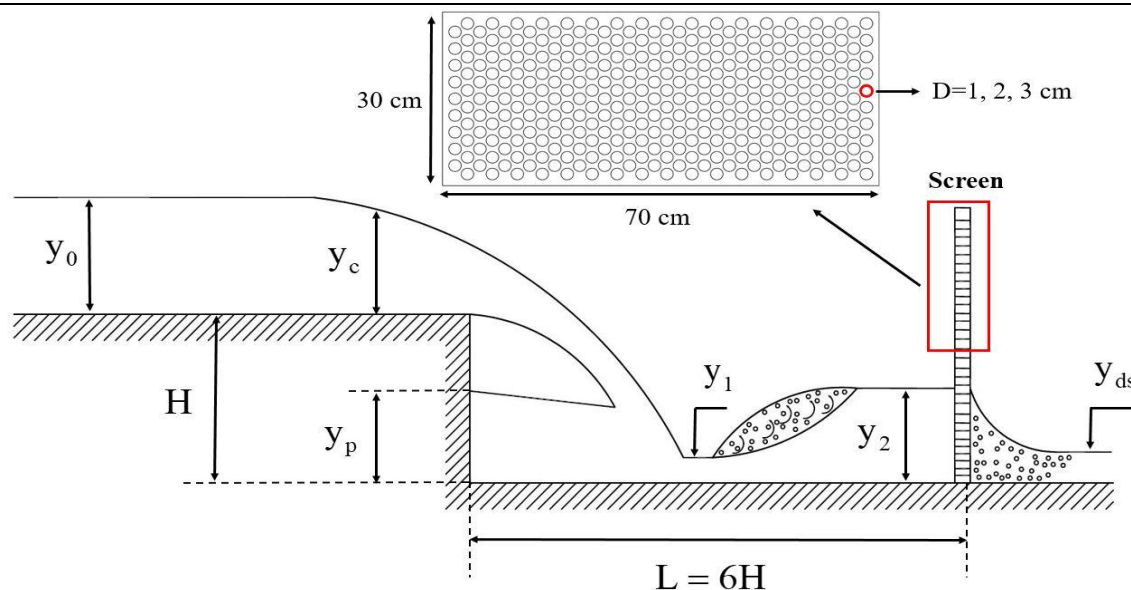
با توجه به سوابق مطالعاتی صفحات مشبک قائم، چنین استنباط می‌شود که اندازه قطر صفحه مشبک می‌تواند در طراحی و عملکرد بهینه آن در استهلاک انرژی جریان مؤثر بوده و نیاز به بررسی و ارزیابی دارد. از آنجایی که مطالعاتی در خصوص تأثیر قطر صفحات مشبک در دسترس نمی‌باشد و استهلاک انرژی در پایین‌دست شیب‌شکن قائم امری اجتناب‌ناپذیر می‌باشد، لذا مطالعه حاضر به صورت آزمایشگاهی برای اولین بار، با هدف بررسی تأثیر قطر این صفحات بر استهلاک انرژی جریان پایین‌دست شیب‌شکن قائم با جریان زیربحرانی در بالادست انجام شد.

et al. (2020d). نیز مورد استفاده قرار گرفته است و از مقادیر به دست آمده میانگین گرفته می شود. محدوده متغیرهای اندازه گیری شده در جدول (۱) ارائه شده است.

جدول ۱- محدوده متغیرهای اندازه گیری شده شیب شکن قائم مجهز به صفحه مشبک قائم

Table 1 Investigated ranges of parameters of the vertical drop equipped with a vertical screen

D(cm)	Parameters				
	Q(L/min)	y_{ds} (cm)	y_p (cm)	y_c (cm)	y_0 (cm)
1	150-800	1.6-4.35	3.5-9.2	1.92-5.86	2.45-6.5
2	150-800	1.55-4.15	3.5-11	1.92-5.86	2.45-6.5
3	150-800	1.6-3.97	3.6-12	1.92-5.86	2.45-6.5



شکل ۲- شماتیک جریان بر روی مدل فیزیکی مطالعه حاضر

Fig. 2 Schematic of the flow on the physical model of the present study

که، y_0/H عمق بحرانی نسبی، $\frac{Q}{H^2\sqrt{gH}}$ معرف عدد فرود جریان (Fr) ، L/H فاصله نسبی صفحه مشبک از لبه شیب شکن، D/H قطر نسبی روزنه صفحه مشبک و $\mu/\rho H\sqrt{gH}$ معرف عدد رینولدز جریان (Re) می باشد. با توجه به اینکه در نزدیکی لبه سقوط شیب شکن های قائم جریان بحرانی بوده و همچنین عدد فرود پایین دست شیب شکن تابعی از عمق بحرانی نسبی است (Daneshfaraz et al. 2021a,b). بنابراین می توان از تأثیر عدد فرود بالادست صرف نظر نمود. از طرفی محدوده عدد رینولدز بین اعداد ۴۸۷۹ تا ۱۸۹۲۰ بوده که نشان دهنده جریان آشسته در آزمایش ها بوده و می توان از تأثیر لزجت نیز صرف نظر کرد (Daneshfaraz et al. 2020e). لازم به ذکر است که با توجه به تأثیر بسیار کم تخلخل در استهلاک انرژی جریان و ثابت بودن تخلخل در پژوهش حاضر از مقادیر تخلخل صفحه و فاصله آن صرف نظر شد؛ بنابراین رابطه (۲) به صورت رابطه (۳) ساده می شود.

۲-۲- تحلیل ابعادی

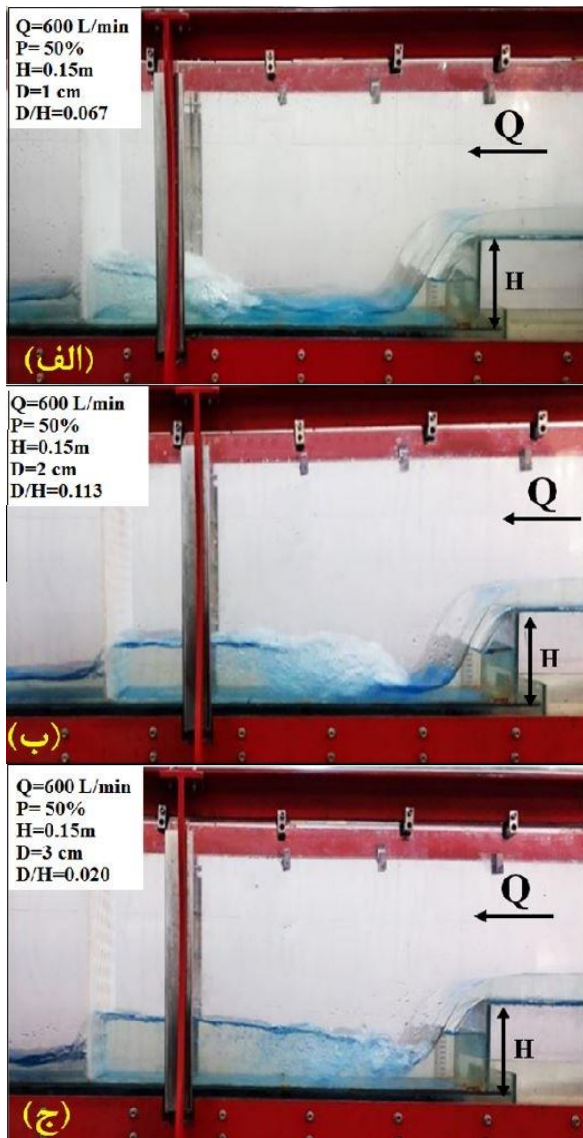
پارامترهای مؤثر بر جریان با توجه به شکل شماتیک جریان بر روی مدل فیزیکی مطالعه حاضر (شکل ۲)، به صورت رابطه (۱) شناسایی شدند (Hasanniya 2019).

$$E_{ds} = \psi_1(y_c, Q, H, L, \varepsilon, D, \rho, \mu, g) = 0 \quad (1)$$

که، E_{dc} انرژی بعد از صفحه مشبک قائم، y_c عمق بحرانی، Q دبی جریان، H ارتفاع شیب شکن، L فاصله صفحه مشبک از لبه شیب شکن، ε تخلخل صفحه مشبک، D قطر روزنه صفحه مشبک، ρ چگالی جریان، μ ویسکوزیته دینامیکی جریان و g شتاب ثقل می باشد. با در نظر گرفتن پارامترهای H ، ρ و g به عنوان پارامترهای تکرار و با استفاده از روش پی - باکینگهام، رابطه بی بعد (۲) حاصل گشت.

$$\frac{E_{dc}}{H} = \varphi_2\left(\frac{y_c}{H}, \frac{Q}{H^2\sqrt{gH}} = Fr, \frac{L}{H}, \varepsilon, \frac{D}{H}, \frac{\mu}{\rho H\sqrt{gH}} = Re\right) \quad (2)$$

پایین دست صفحه مشبک قائم با توجه به پایین بودن محدوده عدد فرود جریان به دلیل تأثیر زبری دیواره و کف فلوم، پرش هیدرولیکی موجی شکل و ضعیف تشکیل می‌یافت.



شکل ۳- جریان بر روی شیب‌شکن قائم مجهز به صفحه مشبک

قائم در دبی ۶۰۰ l/min (الف: $D/H = 0.067$ ، ب)

$D/H = 0.113$ ، و ج) $D/H = 0.2$

Fig. 3 Flow over on the vertical drop equipped with a vertical screen at $Q = 600$ l/min: a) $D/H = 0.067$, b) $D/H = 0.113$, and c) $D/H = 0.2$

۳-۲- عمق نسبی استخر

با سقوط جت از لبه شیب‌شکن قائم و پس از برخورد آن با بستر پایین دست، بخشی از جریان به سمت دیواره شیب‌شکن برگشته و تشکیل یک استخر می‌دهد. مقادیر مربوط به عمق استخر در مقابل عمق بحرانی نسبی برای پژوهش حاضر در

$$\frac{E_{dc}}{E_0} = \varphi_2 \left(\frac{y_c}{H}, \frac{D}{H} \right) \quad (3)$$

که، انرژی باقی‌مانده نسبی و E_0 انرژی کل در بالادست شیب‌شکن که به صورت $E_0 = H + 1.5y_c$ تعریف می‌شود. انرژی نسبی باقی‌مانده در سازه شیب‌شکن قائم به صورت رابطه (۴) قابل بیان می‌باشد (Daneshfaraz et al. 2020b).

$$\frac{E_1}{E_0} = \frac{y_1 + \frac{q^2}{2gy_1^2}}{H + 1.5y_c} \quad (4)$$

رابطه (۴) در صورتی حداقل مقدار خود را خواهد داشت که صورت کسر کوچک شود. به عبارتی انرژی مخصوص در پایین دست شیب‌شکن حداقل گردد ($E_1 = E_{min}$)؛ بنابراین، اگر کانال مستطیلی فرض شود ($E_{min} = 1.5y_c$)، حداقل انرژی باقی‌مانده نسبی در شیب‌شکن قائم را می‌توان براساس رابطه بختمت (رابطه ۵) تعریف نمود.

$$\left(\frac{E_1}{E_0} \right)_{min} = \frac{1.5y_1}{H + 1.5y_c} \quad (5)$$

۳- یافته‌ها و بحث

۳-۱- مشاهده‌های آزمایشگاهی

در مطالعه حاضر در مجموع تعداد ۴۲ آزمایش بر روی شیب‌شکن قائم مجهز به صفحه مشبک قائم با هدف بررسی تأثیر قطر این صفحات بر پارامترهای هیدرولیکی شیب‌شکن قائم و استهلاك انرژی جریان انجام گردید. مطابق مطالعه (Sadeghfam et al. 2015) در پشت صفحات مشبک قائم سه رفتار از پرش هیدرولیکی آزاد، مستغرق و کاذب مشهود است. در مطالعه حاضر این نیز سه رفتار مشاهده گردید. برای صفحات مشبک با قطر نسبی روزنه ۰/۰۶۷ پرش هیدرولیکی در پشت صفحه مشبک به صورت آزاد و کاذب تشکیل یافت (شکل ۳-الف). در قطر نسبی روزنه ۰/۱۳۳ تا دبی ۵۵۰ l/min پرش آزاد تشکیل یافته و پس از آن با افزایش دبی پرش هیدرولیکی تشکیل یافته سبب استغراق جت ریزشی شیب‌شکن شد. در صفحه مشبک قائم با قطر نسبی ۰/۲ نیز پرش به صورت آزاد و مستغرق تشکیل یافته و برای دبی‌های بیش از ۲۵۰ l/min پرش تشکیل یافته پشت صفحه مشبک سبب مستغرق شدن جت ریزشی گردید. لازم به ذکر است که در یک عمق بحرانی نسبی ثابت، میزان استغراق ایجادشده در قطر نسبی روزنه ۰/۲ در مقایسه با ۰/۱۳۳ به مراتب بیشتر بود (شکل ۳-ب و ج). در برخی از آزمایش‌های مربوطه، در

برای بیان عمق نسبی استخر شیب‌شکن قائم مجهز به صفحه مشبک افقی در سه قطر نسبی روابط برآزش شده به صورت رابطه (۶) در نظر گرفته شد.

$$\frac{y_p}{H} = ae^{b\left(\frac{y_c}{H}\right)} \quad (۶)$$

که، a و b ضرایب ثابتی هستند که مقادیر آن‌ها در جدول (۲) ارائه شده است.

جدول ۲- ضرایب ثابت رابطه عمق نسبی استخر

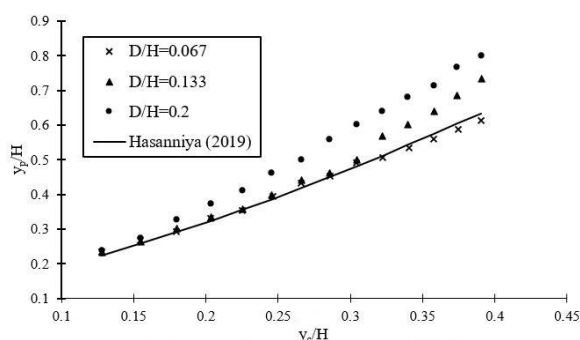
Table 2 Constant coefficients of relative pool depth equations

R ²	Coefficient		D (cm)
	b	A	
0.986	3.65	0.154	0.067
0.998	4.35	0.135	0.133
0.987	4.6	0.142	0.200

۳-۳- انرژی باقی‌مانده نسبی

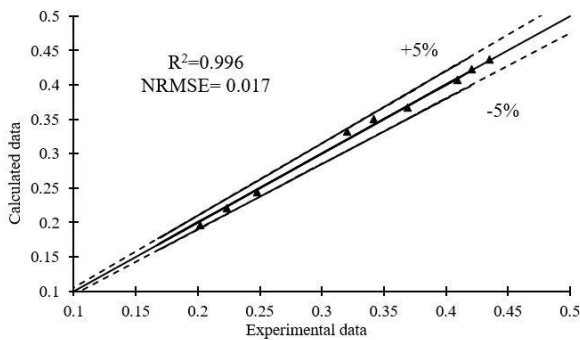
شکل (۵) تغییرات مربوط به انرژی باقی‌مانده نسبی در مقابل عمق بحرانی نسبی به ازای سه قطر نسبی صفحه مشبک در پژوهش حاضر و نتایج مطالعه Hasanniya (2019) را نشان می‌دهد. ملاحظه می‌شود که انرژی نسبی باقی‌مانده پژوهش حاضر در مقایسه با نتایج Hasanniya (2019) متناسب بوده و استفاده از صفحات مشبک قائم در هر سه قطر نسبی صفحات، حداقل انرژی باقی‌مانده نسبی ممکن را می‌تواند ایجاد کند. همچنین با دقت در شکل (۵) چنین استنباط می‌شود که برای عمق بحرانی نسبی کم، در هر سه قطر نسبی صفحات مشبک، انرژی نسبی باقی‌مانده دارای مقادیر یکسانی بوده و با افزایش عمق بحرانی و افزایش قطر نسبی صفحات، افزایش می‌یابد. این امر وابسته به نوع پرش تشکیل یافته در پشت صفحات مشبک می‌باشد. هر چه پرش هیدرولیکی به صورت کاذب یا آزاد باشد، نیروی اینرسی و نوسانات جریان موجود در پشت صفحات مشبک بیشتر بوده و باعث افزایش تلاطم و تداخل آب و هوا در پایین‌دست صفحه مشبک می‌شود. در مقابل برای پرش هیدرولیکی مستغرق با توجه به کاهش نیروی اینرسی نسبت به پرش آزاد و کاذب، آشفتگی در پایین‌دست صفحه مشبک را کاهش می‌دهد؛ بنابراین با توجه به اینکه تمامی پرش‌های تشکیل یافته در پشت صفحه مشبک قائم با قطر نسبی ۰/۰۶۷ آزاد و کاذب می‌باشد، لذا دارای کمترین مقادیر انرژی باقی‌مانده نسبی است. برای صفحه مشبک با قطر نسبی ۰/۲ نیز با توجه به اینکه اکثر پرش‌های

سه قطر نسبی صفحات و مطالعه Hasanniya (2019) در شکل (۴) نشان داده شده است. همان‌گونه که در شکل (۴) ملاحظه می‌شود، با افزایش عمق بحرانی نسبی روند تغییرات عمق استخر به صورت افزایشی بوده که این امر به دلیل افزایش جریان برگشتی به استخر با افزایش دبی یا عمق بحرانی نسبی می‌باشد. مشاهده می‌شود که برای تمامی مقادیر عمق بحرانی نسبی، مقادیر عمق استخر پژوهش حاضر در قطر نسبی صفحه ۰/۰۶۷ با نتایج حاصل از مطالعه Hasanniya (2019) که ایشان نیز قطر نسبی صفحه ۰/۰۶۷ اختیار نمودند، تطابق مناسبی دارد. از طرفی در قطر نسبی صفحه مشبک ۰/۱۳۳ و ۰/۲ عمق نسبی استخر برای عمق بحرانی نسبی بیش از ۰/۳ و ۰/۱۸ در مقایسه با قطر نسبی صفحه ۰/۰۶۷ بیش تر بوده و بیش‌ترین مقادیر مربوط به عمق استخر برای صفحات مشبک قائم با قطر نسبی ۰/۲ می‌باشد. با افزایش قطر صفحات مشبک محیط خیس شده کل روزه‌ای صفحه مشبک در یک تخلخل ثابت کاهش می‌یابد و مشابه سرریزهای غیرخطی، با کاهش طول مؤثر یا به عبارتی محیط کل روزه صفحه مشبک، دبی عبوری از صفحه مشبک کاهش می‌یابد؛ بنابراین پرش‌های هیدرولیکی تشکیل یافته سبب مستغرق شدن جت ریزشی شیب‌شکن شده و دبی برگشتی به داخل استخر را افزایش می‌دهد که این امر منجر به افزایش عمق استخر با افزایش قطر نسبی صفحات مشبک قائم می‌گردد. برای عمق بحرانی نسبی بیش از ۰/۳، صفحات مشبک با قطر نسبی ۰/۱۳۳ در مقایسه با قطر نسبی صفحه ۰/۰۶۷ به میزان ۱۱٪ سبب افزایش عمق استخر می‌شوند. از طرفی برای عمق بحرانی نسبی بیش از ۰/۱۸ صفحه مشبک با قطر نسبی ۰/۲ در مقایسه با قطر نسبی ۰/۰۶۷ عمق استخر را ۲۱٪ افزایش می‌دهد.



شکل ۴- تغییرات عمق نسبی استخر در مقابل عمق بحرانی نسبی
Fig. 4 Relative pool depth changes versus relative critical

رابطه (۷) دارای ضریب تعیین و خطای جذر میانگین مربعات به ترتیب ۰/۹۹۶ و ۰/۰۱۷ می‌باشد. این مقادیر نشان‌دهنده آن هستند که رابطه ارائه‌شده از صحت و دقت مناسبی جهت تخمین انرژی باقی‌مانده نسبی پژوهش حاضر برخوردار می‌باشد. رابطه (۷) نشان می‌دهد با این که افزایش قطر نسبی صفحات مشبک سبب افزایش انرژی باقی‌مانده نسبی می‌شوند، اما با این حال می‌توان تأثیر آن را ناچیز و قابل صرف‌نظر کردن دانست. شکل (۶) مقایسه مقادیر آزمایشگاهی و محاسباتی رابطه (۷) را نشان می‌دهد.



شکل ۶- مقایسه مقادیر آزمایشگاهی و محاسباتی رابطه انرژی باقی‌مانده نسبی

Fig. 6 Comparison of the measured and calculated values for relative residual energy equation

۴- نتیجه‌گیری

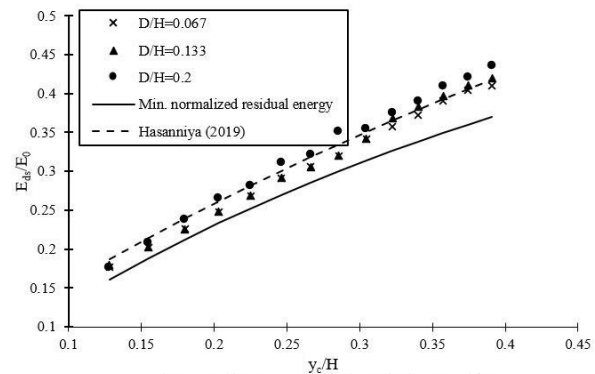
در این پژوهش تأثیر قطر صفحات مشبک قائم در استهلاک انرژی شیب‌شکن قائم به‌صورت آزمایشگاهی مورد بررسی قرار گرفت. در مجموع ۴۲ آزمایش متفاوت در محدوده عمق بحرانی نسبی ۰/۱۳ تا ۰/۳۹ در تخلخل ۵۰٪ صفحه مشبک و سه قطر نسبی ۰/۰۶۷، ۰/۱۳۳ و ۰/۲ انجام شد. نتایج نشان داد:

۱- افزایش قطر صفحات مشبک عمق پایاب بیش‌تری جهت تشکیل پرش ایجاد می‌کند و همین مسئله سبب تشکیل پرش هیدرولیکی مستغرق در پشت صفحات مشبک می‌شود. پرش هیدرولیکی مستغرق برای قطر نسبی صفحات ۰/۱۳۳ و ۰/۲ با افزایش عمق بحرانی نسبی ایجاد شده و میزان استغراق صفحه مشبک با قطر نسبی ۰/۲ بیش‌تر از ۰/۱۳۳ می‌باشد.

۲- برای تمامی مقادیر عمق بحرانی نسبی، مقادیر عمق استخر و انرژی باقی‌مانده نسبی پژوهش حاضر در قطر نسبی صفحه ۰/۰۶۷ با نتایج حاصل از مطالعه پژوهشگران قبلی تطابق مناسبی دارد.

هیدرولیکی تشکیل یافته در پشت آن‌ها مستغرق می‌باشد، بنابراین، بیش‌ترین مقادیر انرژی باقی‌مانده نسبی را شامل شده است.

با توجه به اینکه حداقل انرژی که جریان آب در کانال‌های باز می‌تواند داشته باشد انرژی در عمق بحرانی بوده و این انرژی در مقطعی خاص از کانال و با توجه به شرایط و هندسه می‌تواند شکل بگیرد، لذا در کانال‌های باز همواره انرژی جریان بیش‌تر از حداقل انرژی می‌باشد؛ بنابراین، با توجه به شکل (۵) می‌توان گفت که استفاده از صفحات مشبک قائم در هر سه قطر نسبی، حداقل انرژی باقی‌مانده نسبی را سبب می‌شوند. همچنین شایان‌ذکر است که عدد فرود پایین‌دست صفحات مشبک برای تمامی مقادیر عمق بحرانی نسبی در هر سه قطر نسبی تقریباً محدوده‌ای مابین ۱/۳۱ تا ۱/۸ دارد. با توجه به این که افزایش قطر صفحات سبب افزایش انرژی باقی‌مانده نسبی می‌گردد لذا می‌توان گفت که افزایش قطر صفحات سبب کاهش عملکرد صفحه مشبک می‌گردد.



شکل ۵- تغییرات انرژی باقی‌مانده نسبی در مقابل عمق بحرانی نسبی

Fig. 5 Normalized residual energy changes versus relative critical depth

با در نظر گرفتن داده‌های پژوهش حاضر و استفاده از دستور Solver در محیط اکسل، به کمک سعی و خطا رابطه‌ای به‌صورت زیر جهت تخمین انرژی باقی‌مانده نسبی ارائه شد. از ۸۰ داده‌ها برای ارائه رابطه او از ۲۰٪ باقی‌مانده نیز به‌منظور آزمون رابطه ارائه‌شده (رابطه ۷) استفاده شد. همچنین از ضریب تعیین و خطای جذر میانگین مربعات نرمال‌سازی شده به‌منظور ارزیابی رابطه ارائه‌شده استفاده گردید و این مقادیر برای داده‌های آزمون محاسبه شدند.

$$\frac{E_{ds}}{E_0} = 1.015 \left(\frac{y_c}{H} \right)^{0.817} \left(\frac{D}{H} \right)^{0.0463} \quad (7)$$

مقابل جریان آواری از صفحات مشبک با قطر بزرگتر استفاده گردد.

۵- همچنین جهت ادامه پژوهش حاضر پیشنهاد می‌شود مدل‌های پژوهش حاضر با قرار دادن یک پله در ارتفاع‌های مختلف و در نسبت‌هایی از ارتفاع شیب‌شکن در دیواره شیب‌شکن قائم مورد بررسی قرار گرفته و نتایج آن با نتایج پژوهش حاضر بررسی شود.

سپاسگزاری

از حمایت‌های معنوی همکاران محترم در انجام این مقاله تشکر می‌شود.

نحوه دسترسی به داده‌ها

داده‌های استفاده شده در این پژوهش، در متن مقاله ارائه شده است.

۳- افزایش قطر صفحات سبب افزایش عمق استخر می‌شود، به طوری که برای عمق بحرانی نسبی بیش از $0/3$ ، صفحه مشبک با قطر نسبی $0/133$ و $0/2$ در مقایسه با قطر نسبی صفحه $0/067$ ، عمق استخر را به ترتیب و به صورت متوسط 11 و 21% افزایش می‌دهد.

۴- افزایش قطر صفحات مشبک تداخل آب و هوای و آشفستگی ایجاد شده را کاهش داده و منجر به افزایش انرژی باقی‌مانده نسبی می‌شوند. با این که صفحه مشبک قائم با قطر نسبی $0/067$ از نظر استهلاک انرژی عملکرد بهتری دارد، با این وجود با توجه به کوچک بودن روزه‌های آن بیش‌تر در معرض انسداد و گرفتگی روزه‌های آن در مقابل جریان‌های آواری می‌باشد؛ بنابراین، با توجه به تأثیر ناچیزی که افزایش قطر صفحات مشبک در افزایش انرژی باقی‌مانده نسبی دارد، لذا توصیه می‌شود جهت کاهش انسداد روزه‌های این صفحات در

References

- Balkis, G. (2004). Experimental Investigation of Energy Dissipation through Inclined Screens. Doctoral dissertation, Middle East Technical Univ, Ankara, Turkey.
- Çakir, P. (2003). Experimental investigation of energy dissipation through screens, Doctoral dissertation, M. Sc. thesis, Department of Civil Engineering, Middle East Technical University, Ankara, Turkey.
- Daneshfaraz, R., Sadeghfam, S. and Ghahramanzadeh, A. (2017). Three-dimensional numerical investigation of flow through screens as energy dissipators. *Canadian J. Civil Eng.*, 44(10), 850-859.
- Daneshfaraz, R., Majedi Asl, M. and Mirzaeereza, R. (2019). Experimental study of expanding effect and sand-roughened bed on hydraulic jump characteristics. *Iran. J. Soil Water Res.*, 50(4), 885-896. doi: 10.22059/ijswr.2018.261923.667968
- Daneshfaraz, R., Sadeghfam, S. and Hasannia, V. (2020b). Experimental investigating effect of Froude number on hydraulic parameters of vertical drop with supercritical flow upstream. *Amirkabir J. Civil Eng.*, 52(7), 1-3 (In Press) [In Persian]. doi: 10.22060/ceej
- Daneshfaraz, R., Majedi Asl M., Razmi S., Norouzi R. and Abraham J. (2020a). Experimental investigation of the effect of dual horizontal screens on the hydraulic performance of a vertical drop. *Int. J. Environ. Sci. Technol.*, 17, 2927-2936, <https://doi.org/10.1007/s13762-019-02622-x>.
- Daneshfaraz, R., Majedi Asl, M., Bazayar, A., Abraham, J. and Norouzi, R. (2020b). The laboratory study of energy dissipation in inclined drops equipped with a screen. *J. Appl. Water Eng. Res.*, <https://doi.org/10.1080/23249676.2020.1799877>, 1-10.
- Daneshfaraz, R., Hasanniya, V., Mirzaee, R. and Bazayar, A. (2020c). Experimental investigation of the effect of positive slope of the horizontal screen on hydraulic characteristics of vertical drop. *Iran. J. Soil Water Res.*, 50(10), 2499-2509 [In Persian].
- Daneshfaraz, R., Majedi Asl, M. and Bagherzadeh, M. (2020d). Experimental investigation of the energy dissipation and the downstream relative depth of pool in the sloped gabion drop and the sloped simple drop. *Amirkabir J. Civil Eng.*, 53(9), 4-4. doi: 10.22060/ceej.2020.18059.6751
- Daneshfaraz, R., Aminvash, E., Esmaeli, R., Sadeghfam, S. and Abraham, J. (2020e).



- Experimental and numerical investigation for energy dissipation of supercritical flow in sudden contractions. *J. Groundwater Sci. Eng.*, 8(4), 396-406.
- Daneshfaraz, R., Sadeghfam, S., Hasannia, V., Abraham, J. and Norouzi, R. (2021a). Experimental investigation on hydraulic efficiency of vertical drop equipped with vertical screens. *Teknik Dergi*, 33(5). (In Press).
- Daneshfaraz, R., Ghaderi, A., Di Francesco, S. and Khajei, N. (2021b). Experimental study of the effect of horizontal screen diameter on hydraulic parameters of vertical drop. *Water Suppl.*, <https://doi.org/10.2166/ws.2021.077>.
- Esen, I. I., Alhumoud, J. M., and Hannan, K. A. (2004). Energy loss at a drop structure with a step at the base. *Water Int.*, 29(4), 523-529.
- Ghaderi, A. Dasineh, M. and Abbasi, S. (2019). Research note, numerical study of impact of vertically constricted entrance on hydraulic characteristics of vertical drop. *J. Hydraul.*, 13(134), 121-131 [In Persian].
- Hasanniya, V. (2019) Experimental investigation of flow energy dissipation through the application of the screen in drops. MSc thesis, Civil Engineering Department, Faculty of Engineering, University of Maragheh, Maragheh, Iran [In Persian].
- Hong, Y. M., Huang, H. S. and Wan, S. (2010). Drop characteristics of free-falling nappe for aerated straight-drop spillway. *J. Hydraul. Res.*, 48(1), 125-129.
- Kabiri-Samani, A. R., Bakhshian, E. and Chamani, M. R. (2017). Flow characteristics of grid drop-type dissipators. *Flow Measur. Instrument.*, 54, 298-306.
- 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. *J. Marine Sci. Technol.*, 22(4), 476-486.
- Mahmoud, M. I., Ahmed, S. S. And Al-Fahal, A. S. A. (2013). Effect of different shapes of holes on energy dissipation through perpendicular screen. *J. Environ. Stud.*, 12, 29-37.
- Moghadam, M. K., Amini, A. and Hosseini, H. (2020). Experimental evidence dynamic pressures reduction on plunge pool floors downstream flip bucket for increasing downstream face slopes. *Water Suppl.*, 20(5), 1834-1846.
- Nayebzadeh, B. Lotfollahi-yaghin, M. A. and Daneshfaraz, R. (2019). Experimental study of energy dissipation at a vertical drop equipped with vertical screen with gradually expanding at the downstream, *Amirkabir J. Civil Eng.*, 52(12). (In Press). Doi: [10.22060/CEEJ.2019.16493.6265](https://doi.org/10.22060/CEEJ.2019.16493.6265) [In Persian].
- Rajaratnam, N. and Hurtig, K. I. (2000). Screen-type energy dissipator for hydraulic structures. *J. Hydraul. Eng.*, 126(4), 310-312.
- Sadeghfam, S., Akhtari, A. A., Daneshfaraz, R. and Tayfur, G. (2015). Experimental investigation of screens as energy dissipators in submerged hydraulic jump. *Turk. J. Eng. Environ. Sci.*, 38(2), 126-138.



Research Paper

Experimental Study of the Effect of Vertical Screen Diameter on Energy Dissipation at Downstream Vertical Drop

Rasoul Daneshfaraza^{1*}, Amir Ghaderi² and Navid Khajei³

¹Professor, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, University of Maragheh, Maragheh, East Azerbaijan, Iran

²Ph.D Scholar, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, University of Zanjan, Zanjan, Iran

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

*Corresponding author: daneshfaraz@maragheh.ac.ir

Received: December 06, 2020

Revised: February 18, 2021

Accepted: February 20, 2021

Abstract

Screens are one of the applications at the downstream of hydraulic structures in recent years to dissipate energy and prevent erosion of the channel bed. Therefore, in the present study, vertical screens at downstream of vertical drop were used for energy dissipation and the effect of screens pore size on energy dissipation was investigated. Experiments were performed in relative diameters of 0.067, 0.133, and 0.2 with 50% porosity and relative critical depth range of 0.13 ~ 0.39. The results showed that by increasing the relative diameter of the vertical screens, the hydraulic jump formed behind the screens is submerged and reduces the performance of these screens in energy dissipation. The results also showed that increasing the relative diameter of the screens increases the depth of the vertical drop pool so that the screens with a relative diameter of 0.2 compared with the relative diameter of 0.067 increases the depth of the pool by 21%. For the relative residual energy, although increasing the diameter of the screens causes a low increase in the relative residual energy, these screens create the minimum relative residual energy and reduce the downstream Froude number range for all three relative diameters of the plates in the range 1.31 to 1.8 restricts.

Keywords: Energy Dissipater; Pool Depth; Relative Residual Energy; Screen Diameter; Vertical Drop.