

## Experimental Study of Energy Dissipation in the Stilling Basin with Movable Bed in the Upstream of Screens

RASOUL DANESHFARAZ<sup>1\*</sup>, SINA SADEGHFAM<sup>1</sup>, OMAR MINAEI<sup>1</sup>

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

(Received: March. 12, 2019- Revised: May. 19, 2019- Accepted: June. 8, 2019)

### ABSTRACT

Screens are lattice plates with certain porosity arranged vertically in the supercritical flow inducing energy dissipation and hydraulic jump stabilization. In this study, energy dissipation due to Hydraulic jump and Screens are investigated experimentally. The main variables of the study are: (i) the Froude number of supercritical flow ( $Fr_A$ ) in the 3.5-8 range; (ii) five samples of bed grains with a median diameter of 4.1-24 mm; (iii) screen with 40% and 50% porosities. The results from the study clarified change energy dissipation pit against supercritical Froude number, the participation of Screen and hydraulic jump in energy dissipation and the effect of porosity on energy dissipation. Also, to calculate the energy dissipation in the downstream of the Screen, some relationships have been presented and the results have been compared with previous studies. The results showed that the Froude number ( $Fr_A$ ) of supercritical flow have a great effect on energy depreciation. Also, the effect of dimensionless grain sizes ( $d_{50}$ ) and maximum scour depth ( $D_s$ ) is negligible on energy depreciation.

**Keywords:** Energy dissipation, Screens, Stilling basin, Super critical flow

## بررسی آزمایشگاهی استهلاک انرژی در حوضچه آرامش با بستر متحرک بالادست صفحه مشبک

رسول دانشفراز<sup>۱\*</sup>، سینا صادق فام<sup>۱</sup>، عمر مینایی<sup>۱</sup>

۱. گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه مراغه، مراغه، ایران

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۱۲/۲۱ - تاریخ بازنگری: ۱۳۹۸/۲/۲۹ - تاریخ تصویب: ۱۳۹۸/۳/۱۸)

### چکیده

صفحات مشبک سازه‌هایی با نسبت تخلخل معین هستند که به صورت عمود در مسیر جریان فوق بحرانی قرار گرفته و باعث استهلاک انرژی جریان و تثبیت پرش هیدرولیکی می‌شوند. در این بررسی، استهلاک انرژی ناشی از پرش هیدرولیکی و صفحه مشبک بصورت آزمایشگاهی مورد بررسی قرار گرفته است. متغیرهای مهم این تحقیق عبارت‌اند از: (i) عدد فرود جریان فوق بحرانی در بازه ۳/۵ تا ۸؛ (ii) پنج نمونه دانه‌های بستر با قطر متوسط ۴/۱ تا ۲۴ میلیمتر؛ (iii) صفحه مشبک با تخلخل ۴۰ و ۵۰ درصد. در این تحقیق، تغییرات استهلاک انرژی در مقابل عدد فرود جریان فوق بحرانی، میزان مشارکت صفحه مشبک و پرش هیدرولیکی در استهلاک انرژی، تاثیر تخلخل بر روی استهلاک انرژی مورد بررسی قرار گرفته است. همچنین برای محاسبه استهلاک انرژی در پایین‌دست صفحه مشبک روابطی ارائه شده و نتایج با تحقیقات گذشته مقایسه شده است. نتایج نشان داد که عدد فرود جریان فوق بحرانی تاثیر زیادی بر استهلاک انرژی دارد. همچنین تاثیر پارامترهای بدون بعد اندازه دانه‌ها و بیشینه عمق آبستستگی بر استهلاک انرژی ناچیز و قابل چشم‌پوشی است.

**واژه‌های کلیدی:** استهلاک انرژی، صفحات مشبک، حوضچه آرامش، جریان فوق بحرانی، بستر متحرک

### مقدمه

در سالهای اخیر از اسکرین با میزان تخلخل مشخص که به صورت عمود در مسیر جریان فوق بحرانی قرار گرفته، به عنوان مستهلک کننده انرژی جریان استفاده شده است. قرار دادن اسکرین در فاصله‌ای از دریچه کشویی به عنوان منبع تولید کننده جریان فوق بحرانی، علاوه بر استهلاک انرژی باعث تثبیت محل پرش هیدرولیکی نیز می‌گردد. لازم به ذکر است، عمده استهلاک انرژی ناشی از قرارگیری اسکرین در مسیر جریان فوق بحرانی، می‌تواند ناشی از پرش هیدرولیکی و برخورد جریان با بدنه اسکرین باشد. اسکرین برای اولین بار در سال ۲۰۰۰ به عنوان مستهلک کننده انرژی توسط Rajaratnam و Hurtig معرفی شد. نتایج تحقیق آنها نشان داد که استفاده از اسکرین موجب استهلاک انرژی بیشتری شده و در تثبیت محل پرش هیدرولیکی موثر است. در ادامه مطالعاتی بر روی پارامترهایی نظیر آرایش اسکرین و میزان تخلخل (Rajaratnam and Hurtig 2000; Aslankara 2007)، محل قرارگیری و ضخامت اسکرین‌ها (Cakir 2003)، اثر شیب‌دار کردن اسکرین (Bozkus et al. 2006; Bozkus et al. 2004)، نوع پرش هیدرولیکی (Sadeghfam et al. 2015)، بررسی آزمایشگاهی تاثیر محل قرارگیری صفحات مشبک و واگرایی در میزان استهلاک انرژی (Nayebzadeh et al. 2019)؛ (Daneshfaraz et al. 2016)، ترکیب اسکرین با سازه‌های بافل

(Daneshfaraz et al. 2017)، بررسی آزمایشگاهی استهلاک انرژی در شیب‌شکن‌های قائم مجهز به صفحات مشبک افقی (Daneshfaraz et al. 2019a)، بررسی و تثبیت بستر در حوضچه آرامش با اسکرین قائم (Sadeghfam et al. 2015) و در زمینه پارامترهای هیدرولیکی در شیب‌شکن‌های قائم مجهز به مستهلک کننده شبکه‌ای و شیاری با جریان زیر بحرانی (Kabiri-Samani et al. 2017) انجام شد. نتایج این تحقیقات نشان می‌دهد که میزان استهلاک انرژی در اسکرین با تخلخل ۴۰٪ بیشتر از ۵۰٪ است (Cakir 2003; Rajaratnam and Hurtig 2000). همچنین (Daneshfaraz et al. 2019b; Sadeghfam et al. 2015)، ضخامت اسکرین‌ها تاثیر چشمگیری بر میزان استهلاک نداشته و عملکرد اسکرین با آرایش دابل از آرایش منفرد بهتر ارزیابی شده است (Aslankara, 2007; Bozkus et al. 2004; Cakir, 2003). خلاصه‌ای از اهم تحقیقات انجام شده در زمینه صفحات مشبک و برخی از ملاحظات، نظیر بازه عدد فرود جریان فوق بحرانی در جدول (۱) ارائه شده است.

در مطالعه حاضر بر خلاف مطالعات موجود، بستر کف حوضچه آرامش به صورت متحرک متشکل از پنج نمونه مصالح شنی با دانه‌بندی متفاوت در نظر گرفته شده تا یک حوضچه آرامش از مصالح متحرک تشکیل شود. لذا اندازه مصالح در بازه‌ای انتخاب شد که در کوچکترین قطر آن عمق آبستستگی به کف

حوضچه‌ای با مشخصات ذکر شده در عمل تاکنون اجرا نشده است و تحقیق حاضر فعلا جنبه تحقیق اولیه دارد. وجود آبشستگی در بستر متحرک از دو دیدگاه اهمیت دارد: (الف) بررسی الگوی آبشستگی و فهم ابعاد مسئله؛ (ب) ایجاد سیستم صفحات مشبک در رودخانه‌ها و کانالها با بستر متحرک به منظور استهلاک انرژی جریان در صورتیکه احداث حوضچه‌های آرامش USBR وجود نداشته باشد. هزینه این نوع حوضچه، با توجه به در دسترس بودن مصالح سنگی و همچنین عدم هزینه نگهداری، می‌تواند نسبت به سایر حوضچه‌ها کمتر باشد.

نرسد و در بزرگترین قطر دانه‌بندی نیز اصلا آبشستگی ایجاد نگردد. با قرارگیری اسکرین در مسیر جریان، موقعیت پرش - هیدرولیکی تثبیت شده و با برخورد و عبور جریان از این صفحات انرژی جریان مستهلک می‌شود. در واقع اسکرین و پرش - هیدرولیکی یک سیستم را تشکیل داده و اثر همزمان این دو باعث تثبیت پرش هیدرولیکی در حوضچه آرامش و استهلاک انرژی جریان می‌شوند. با در نظر گرفتن این رویکرد میزان استهلاک انرژی در بالادست و پایین دست اسکرین مورد بررسی قرار گرفته و نتایج با بستر صلب مقایسه شده است. لازم به ذکر است که

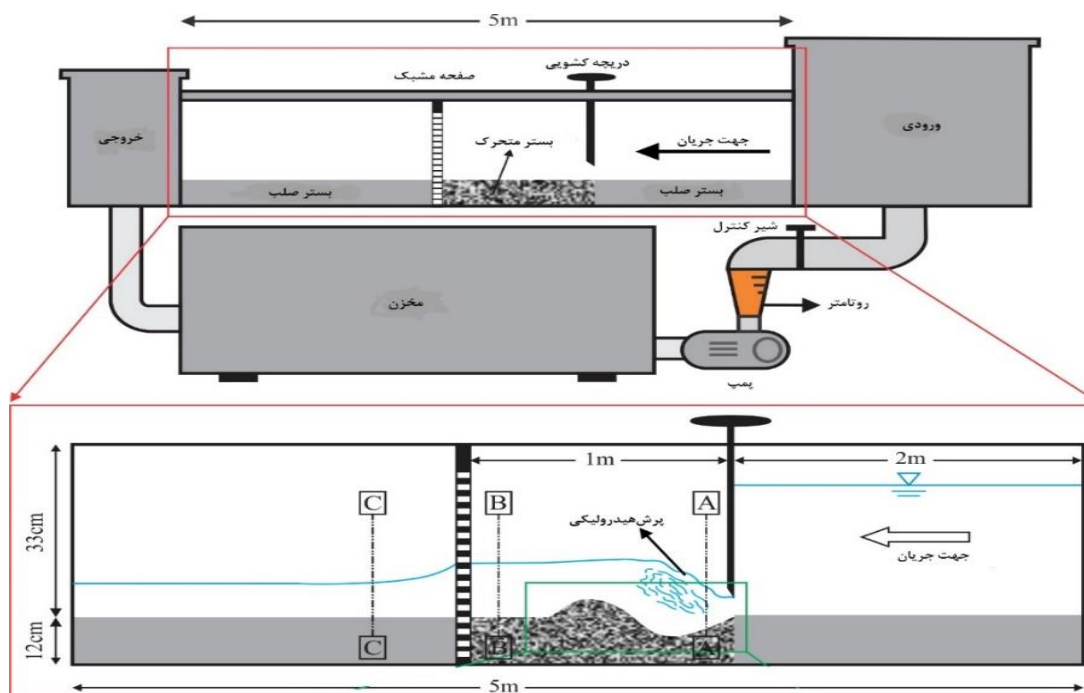
جدول ۱. خلاصه‌ای از تحقیقات مهم انجام شده در زمینه صفحات مشبک

محقق (ها)	محدوده عدد فرود	درصد تخلخل	آرایش صفحات مشبک	ملاحظات آزمایش	تثبیت انرژی	بستر متحرک	آزمایشگاهی	عددی
Rajaratnam and Hurtig (2000)	۵ - ۱۳ ۴ - ۷/۲	۵۰ و ۴۰	منفرد دوتایی مثلی	صفحات مشبک با شکل روزنه‌های مربعی	✓		✓	
Cakir (2003)	۵ - ۱۸	۶۰ تا ۲۰	منفرد دوتایی	ضخامت صفحات مشبک ۲ و ۴ سانتی‌متر	✓		✓	
Bozkus , et al. (2004) Bozkus , et al. (2007)	۵ - ۱۸	۶۰ تا ۲۰	منفرد دوتایی	موقعیت صفحه مشبک ۱۰۰ برابر عمق پایب از دریچه	✓		✓	
Bozkus , et al. (2005) Bozkus , et al. (2006)	۵ - ۲۴	۴۰	منفرد دوتایی	صفحه مشبک زاویه دار با زوایای ۴۵، ۶۰، ۷۵ و ۹۰ درجه نسبت به افق	✓		✓	
Aslankara (2007) Bozkus , and Aslankara (2008)	۵ - ۲۲/۵	۴۰	مجموعه صفحات مشبک با آرایش - های مختلف	-	✓		✓	
Sadeghfam et al. (2015)	۲/۵ - ۸/۵	۵۰ و ۴۰	منفرد دوتایی	تمرکز بر پرش تشکیل شده بین دریچه و صفحه مشبک به صورت مستغرق	✓		✓	
Daneshfaraz et al. (2017)	۲ - ۱۰	۵۰ و ۴۰	منفرد	استفاده از بلوک‌ها در حوضچه آرامش	✓			✓
Kabiri-Samani et al. (2017)	زیر بحرانی	-	منفرد	ترکیب شیب شکن قائم با صفحات شبکه‌ای افقی	✓		✓	
Daneshfaraz et al. (2019a)	۱/۵ - ۹	۵۰ و ۴۰	منفرد	ترکیب شیب شکن قائم با صفحات شبکه‌ای افقی	✓		✓	
مطالعه حاضر	۳/۸ - ۷/۵	۵۰ و ۴۰	منفرد	تثبیت پرش هیدرولیکی در حوضچه آرامش با بستر متحرک و بررسی استهلاک انرژی		✓	✓	

## مواد و روش‌ها

آزمایش‌ها در فلومی مستطیلی شکل به طول ۵ متر، عرض ۰/۳ متر و ارتفاع ۰/۴۵ متر با دیواره‌ها و کف از جنس پلاکسی گلس انجام شد. جهت ایجاد جریان فوق بحرانی، از یک دریچه کشویی از جنس فولاد با ضخامت ۳ میلیمتر و میزان بازشدگی ۱/۳ سانتیمتر استفاده شد. صفحات مشبک دارای ضخامت ۱ سانتیمتر بوده و شکل روزنه‌های آنها دایره‌ای با قطر ۱ سانتیمتر و با دو نوع تخلخل ۴۰ درصد (P40) و ۵۰ درصد (P50) در فاصله ۱ متری از دریچه نصب گردید. شماتیک کلی فلوم و تجهیزات آزمایشگاهی در شکل (۱) نشان داده شده است. طول حوضچه با استفاده از انجام چندین پیش آزمایش در شرایط مختلف طوری در نظر گرفته شد که در حالت دبی بیشینه، طول آن از طول پرش بیشتر باشد. به عبارت دیگر پرش صورت گرفته در آزمایشگاه به اندازه کافی از صفحه مشبک فاصله داشته تا پرش تحمیلی شکل نگیرد. بستر حوضچه آرامش (فاصله بین اسکرین و دریچه) با مصالح شنی با دانه‌بندی‌های متفاوت پر شده و برای ایجاد بستر ثابت نیز از صفحاتی از جنس پلی اتیلن به ارتفاع ۱۲ سانتیمتر و به طول ۲ متر در بالادست دریچه و ۲ متر در پایین دست اسکرین استفاده گردید. طول بستر متحرک با توجه به فاصله بین اسکرین و دریچه در مطالعات پیشین، برابر ۱ متر در نظر گرفته شده و ضخامت آن

نیز با توجه به محدودیت دبی جریان و ارتفاع کانال برابر ۱۲ سانتیمتر در نظر گرفته شد. برای انتخاب اندازه دانه‌ها (غیر چسپنده) در بستر متحرک از روش آزمون و خطا استفاده شد. حداقل اندازه دانه‌ها طوری انتخاب شد که در آن تحت شرایط دبی حداکثر، عمق آبستتگی به کف فلوم نرسد. حداکثر اندازه دانه‌ها نیز طوری انتخاب شد که تحت شرایط دبی حداکثر، آبستتگی ایجاد نگردد. انحراف معیار یکنواختی اندازه دانه‌ها رابطه  $\sigma_g = \sqrt{d_{84}/d_{16}}$  می‌باشد. با توجه به این رابطه، اگر انحراف معیار استاندارد هندسی کوچکتر از ۱/۳ باشد، مصالح بصورت یکنواخت و اگر بزرگتر از ۱/۳ باشد مصالح بصورت غیریکنواخت محسوب می‌شود (Daneshfaraz et al. 2019c,d,e و Rezaie et al., 2018). بر این اساس ۵ نمونه مصالح با چگالی ۲۴۰۰ کیلوگرم بر متر مکعب و با قطر متوسط مختلف انتخاب شد. قطر متوسط مصالح برای نمونه‌های ۱ تا ۵ به ترتیب ۴/۱۴، ۶/۷۶، ۱۰/۹۳، ۱۵ و ۲۴ میلیمتر بود. مقدار انحراف معیار دانه‌ها  $\sigma_g = \sqrt{d_{84}/d_{16}}$  (Majedi Asl et al. 2019) برای نمونه‌های ۱ تا ۵ به ترتیب برابر ۱/۵۶، ۱/۲۸، ۱/۲۲، ۱/۱۷ و ۱/۲۶ محاسبه شد  $d_{16}$  و  $d_{84}$  برابر با قطری از مصالح اند که به ترتیب ۸۴ و ۱۶ درصد مصالح از آنها کوچکترند. در شکل (۲)، نمونه‌های بستر ۱ تا ۵ و همچنین نمودار دانه‌بندی نشان داده شده است.



شکل ۱. شماتیک کلی آزمایش‌ها و مواد بکار رفته

تا ۳۰۰ LPM انجام شد. با توجه به میزان بازشدگی دریچه  $w = 1/3 \text{ cm}$  و عرض کانال مورد آزمایش (۳۰ سانیمتر)، اعداد

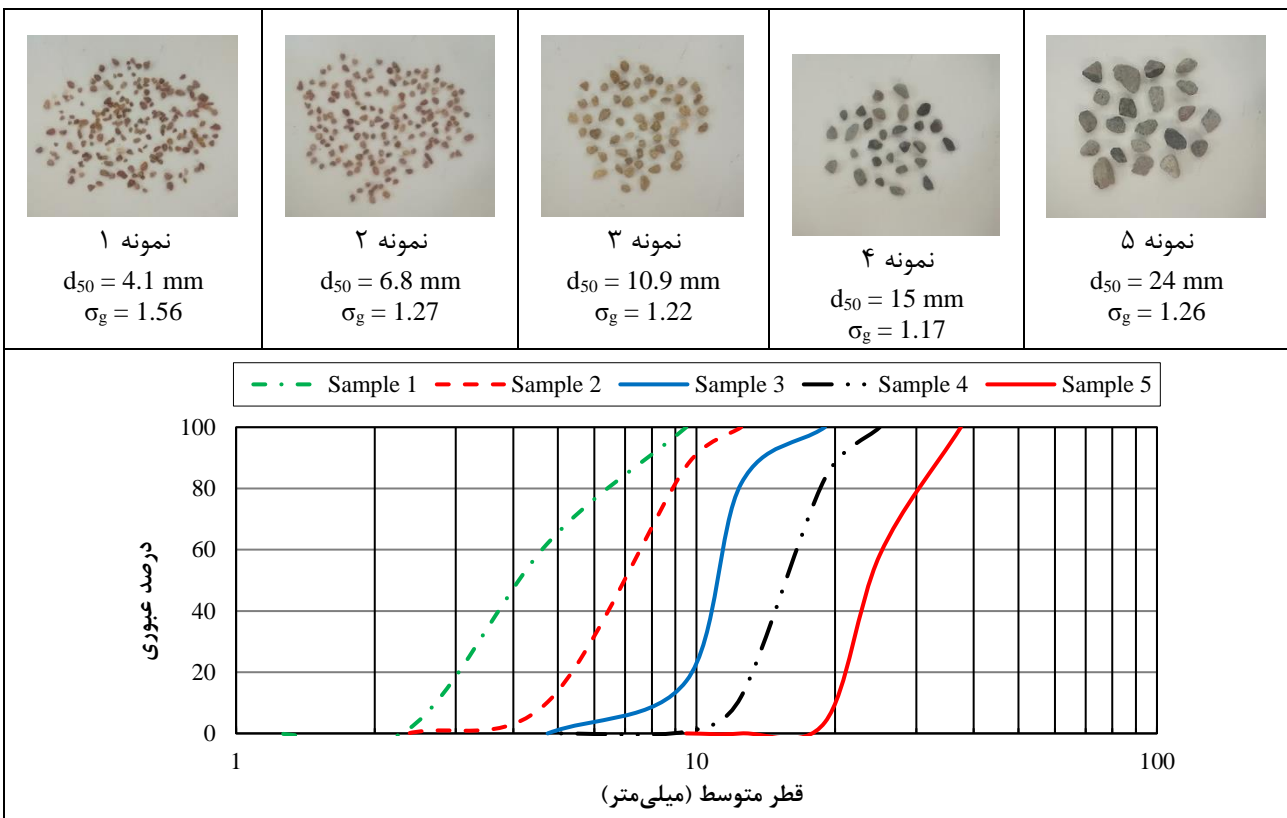
جهت تامین جریان از یک پمپ با ظرفیت ۴۵۰ لیتر بر دقیقه (LPM) استفاده شد. آزمایش‌ها در محدوده دبی بین ۱۵۰

شد. در جدول (۲) خلاصه‌ای از مشخصات تجهیزات مورد استفاده در آزمایش‌ها گزارش شده است.

فرود در بازه ۳/۸ تا ۷/۵ محاسبه و امکان ایجاد اعداد فرود بیشتر از ۷/۵ به علت محدودیت‌های ذکر شده امکان پذیر نشد. برای تنظیم دبی از یک شیرکنترل و برای قرائت آن از روتامتر استفاده

جدول ۲. خلاصه‌ای از خصوصیات تجهیزات مورد استفاده در آزمایش‌ها

تجهیزات و مواد	خصوصیات
فلوم	ابعاد: ۵ × ۰/۳ × ۰/۴۵ (طول × عرض × ارتفاع) متر، جنس دیواره‌ها و کف: پلاستی گلاس
صفحه مشبک	جنس: پلی اتیلن، ضخامت: ۱ سانتی‌متر، شکل روزنه‌ها: دایره‌ای با قطر ۱ سانتی‌متر، میزان تخلخل: ۴۰ و ۵۰ درصد
دریچه کشویی	جنس: فولاد، ضخامت: ۳ میلی‌متر، میزان بازشدگی (w): ۱/۳ سانتی‌متر
بستر صلب	جنس: پلی اتیلن، موقعیت: دو متر بالادست دریچه و دو متر پایین دست دریچه، ارتفاع: ۱۲ سانتی متر
پمپ	ظرفیت: ۱۵۰ تا ۴۵۰ لیتر بر دقیقه، نوع دبی‌سنج: روتامتر با دقت اندازه‌گیری ۳/۵ درصد
بستر متحرک	نوع: شن، اندازه متوسط دانه‌ها: ۰/۴/۱، ۰/۶/۸، ۱/۰/۹، ۱۵ و ۲۴ میلی‌متر، ضخامت: ۱۲ سانتی‌متر، طول: ۱ متر



شکل ۲. نمودار دانه‌بندی، نمونه‌های بستر بکاررفته در آزمایش و مشخصات آنها

افت انرژی در مقطع C نسبت به مقطع A،  $\mu$  ویسکوزیته دینامیکی آب،  $D_s$  حداکثر عمق آبشستگی و  $\rho$  و  $\rho_s$  به ترتیب چگالی آب و دانه‌ها هستند. با استفاده از قضیه باکینگهام-پی و در نظر گرفتن  $E_A$ ،  $g$  و  $\rho$  به عنوان متغیرهای تکراری، پارامترهای بدون بعد مطابق با رابطه (۲) محاسبه شدند.

$$\frac{\Delta E}{E_A} = F2 \left( \frac{E_A^{3/2} g^{1/2} \rho}{\mu}, Fr_A, P, \frac{d_{50}}{E_A}, \frac{D_s}{E_A}, \frac{\rho}{\rho_s} \right) \quad (\text{رابطه ۲})$$

مقادیر چگالی آب و دانه‌ها برای همه آزمایش‌ها یکسان بوده و لذا پارامتر بدون بعد  $\rho_s / \rho$  تاثیری در محاسبه استهلاک انرژی

### تشابه ابعادی

برای بررسی اثر پارامترهای مختلف بر استهلاک انرژی، آنالیز ابعادی انجام شد. برای این منظور پارامترهای بدون بعد با استفاده از روش باکینگهام-پی محاسبه شدند. با بررسی و در نظر گرفتن شرایط مختلف آزمایش، پارامترهای تاثیر گذار بر استهلاک انرژی بصورت رابطه (۱) در نظر گرفته شد:

$$Fl = (Fr_A, E_A, \Delta E_{AC}, \rho, \rho_s, \mu, g, d_{50}, D_s, P) \quad (\text{رابطه ۱})$$

که در آن،  $E_A$ ،  $Fr_A$  به ترتیب عدد فرود انرژی مخصوص جریان در مقطع A،  $P$  میزان تخلخل صفحه مشبک،  $\Delta E_{AC}$  میزان

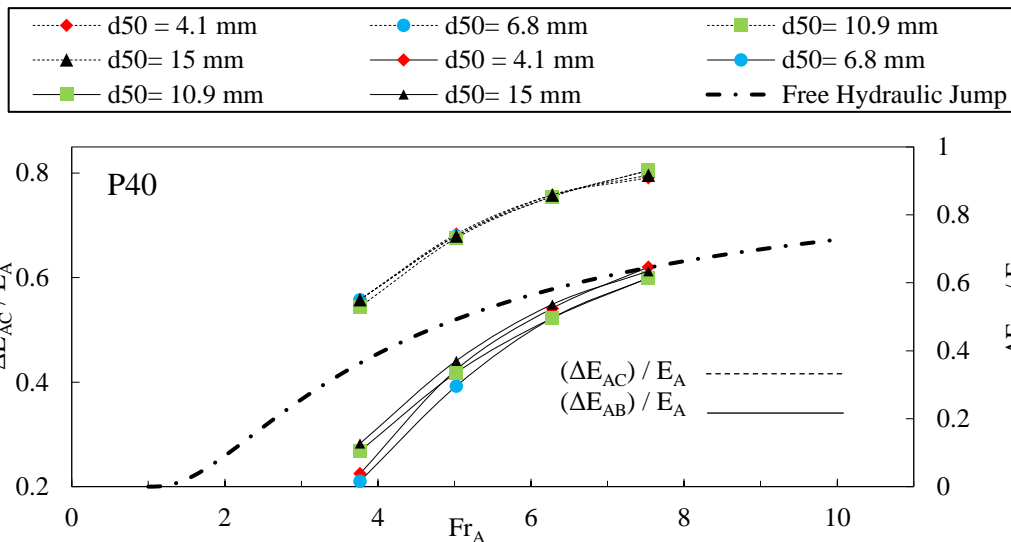
مشخصات پرش شد. زمان تعادل نیز برابر با ۴۵ دقیقه اندازه‌گیری شد. در نمونه پنجم هیچگونه آبشستگی ایجاد نشد، لذا در این تحقیق فقط آزمایش‌هایی که دارای گودال آبشستگی بودند مورد بررسی قرار گرفتند. میزان استهلاک انرژی در بالادست صفحه مشبک (مقطع B) و پایین‌دست آن (مقطع C) نسبت به انرژی در مقطع A (مقطع اولیه پرش) برای ۴ نمونه دانه بستر و صفحه مشبک P40 و P50 در شکل (۳ و ۴) نشان داده شده است. در این شکل‌ها محور افقی نشان دهنده عدد فرود فوق بحرانی (مقطع A) و محور قائم سمت راست نشان دهنده میزان انرژی مستهلک شده بالادست صفحه مشبک نسبت به انرژی جریان در ناحیه فوق بحرانی (مقطع A) بوده و همچنین محور قائم سمت چپ نیز نشان دهنده میزان انرژی مستهلک شده پایین‌دست صفحه مشبک نسبت به انرژی جریان در ناحیه فوق بحرانی (مقطع A) است.

ندارد. همچنین به علت ثابت بودن شتاب جاذبه و ویسکوزیته آب در همه آزمایش‌ها، پارامتر بدون بعد  $\frac{E_A^{3/2} g^{1/2} \rho}{\mu}$  تابعی از  $E_A$  بوده و با توجه به اینکه مقدار این پارامتر ( $E_A$ ) در سایر پارامترهای بدون بعد موجود است، لذا از آن در محاسبه استهلاک انرژی صرف‌نظر شده و در نهایت پارامترهای بدون بعد بصورت رابطه (۳) نوشته می‌شوند:

$$\frac{\Delta E}{E_A} = F2 \left( Fr_A, P, \frac{D_s}{E_A}, \frac{d_{50}}{E_A} \right) \quad \text{(رابطه ۳)}$$

### نتایج و بحث

میزان انرژی مستهلک شده توسط صفحات مشبک پس از تثبیت و تعادل گودال آبشستگی، اقدام به اندازه‌گیری



شکل ۳. میزان انرژی مستهلک شده در بالادست و پایین‌دست از صفحه مشبک برای ۴ نمونه دانه بستر و صفحه مشبک P40

چند جمله‌ای درجه دو بوده و مقدار نسبی استهلاک انرژی ناشی از صفحه مشبک را بر حسب عدد فرود در مقطع A بیان می‌کنند.

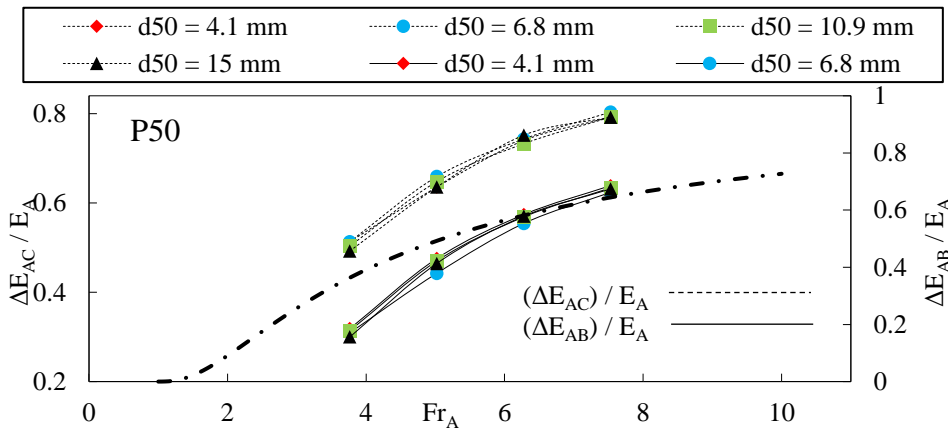
$$\frac{\Delta E_{AC}}{E_A} = -0.009196 Fr_A^2 + 0.1763 Fr_A - 0.03115 \quad \text{(رابطه ۴)}$$

$$\frac{\Delta E_{AB}}{E_A} = -0.007573 Fr_A^2 + 0.1569 Fr_A + 0.01853 \quad \text{(رابطه ۵)}$$

مقایسه خطاهای داده‌های تحقیق حاضر با تحقیق Sadeghfam *et al.*, (2014) در جدول (۳) ارائه شده است. مقایسه نتایج نشان می‌دهد که روابط مذکور در فرودهای بالاتر نتایج بهتری نسبت به اعداد فرود پایین ارائه می‌دهند. دلیل این امر وجود بستر متحرک در تحقیق حاضر بوده و در آزمایش‌ها انجام شده توسط Sadeghfam *et al.*, (2014)، بستر بین دریچه و صفحه مشبک ثابت بوده است.

مشاهده می‌شود که در هر دو صفحه مشبک P40 و P50، استهلاک انرژی چشمگیر بوده و جریان با عبور از صفحه مشبک انرژی خود را از دست داده است. با افزایش عدد فرود میزان استهلاک انرژی نسبی افزایش پیدا می‌کند. تاثیر اندازه دانه‌ها در استهلاک انرژی ناچیز بوده و قانون خاصی در استهلاک انرژی نسبت به اندازه دانه‌ها مشاهده نشد. همچنین با مقایسه نمودارهای استهلاک انرژی، در دانه‌بندی‌های مختلف مشخص می‌شود که در پایین‌دست صفحه مشبک، نمودارها تقریباً بر هم منطبق بوده و اختلاف فاحشی بین آنها وجود ندارند.

برای مقایسه میزان استهلاک انرژی در بستر متحرک نسبت به بستر ثابت، از روابطی که توسط Sadeghfam *et al.*, (2014) ارائه شده است، استفاده گردید (روابط ۴ و ۵). این روابط بصورت روابطی



شکل ۴. میزان انرژی مستهلک شده در بالادست و پایین دست از صفحه مشبک برای ۴ نمونه دانه بستر و صفحه مشبک P50

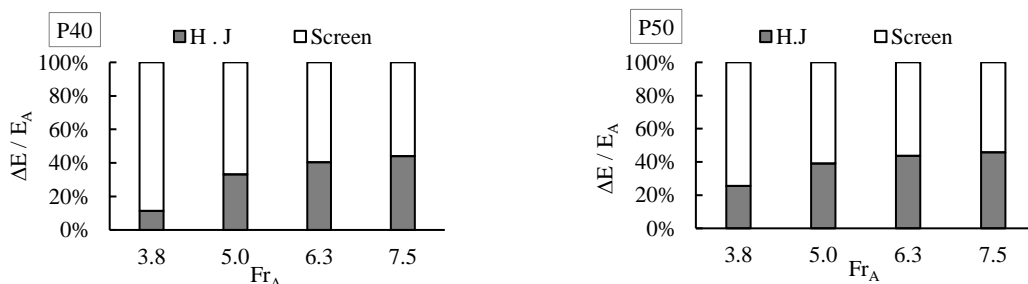
استهلاک انرژی در دو تحقیق بوده و مقدار آن قابل قبول است. آماره MAPE نشان دهنده متوسط درصد خطای نسبی است که مقدار آن برای صفحه مشبک P40 نزدیک ۸٪ و برای صفحه مشبک P50 تقریباً ۷٪/۲ است. خطای ایجاد شده به علت آبستگی در ناحیه حوضچه آرامش در مطالعه حاضر می باشد. بنابراین روابط ارائه شده توسط صادق فام و همکاران (Sadeghfam et al., 2014) را می توان در بستر متحرک نیز با نظر به اینکه میزان آبستگی تاثیر بسزایی در استهلاک انرژی ندارد، استفاده نمود.

استهلاک انرژی در حضور صفحه مشبک شامل دو فرایند مهم است؛ ابتدا در فاصله بین صفحه مشبک و دریچه پرش هیدرولیکی اتفاق می افتد و مقداری از انرژی جریان در این مرحله مستهلک می شود. سپس جریان که دارای رژیم زیر بحرانی است به سازه صفحه مشبک برخورد کرده و در این مرحله هم مقداری از انرژی خود را از دست می دهد. میزان استهلاک انرژی صورت گرفته توسط هر کدام از این دو فرایند مهم بوده و دانستن سهم صفحه مشبک در استهلاک انرژی حائز اهمیت است. در شکل (۵) میزان مشارکت هر کدام از فرایندهای استهلاک انرژی ناشی از پرش هیدرولیکی و صفحه مشبک در صفحه مشبک P40 و P50 نشان داده شده است.

جدول ۳. مقایسه استهلاک نسبی انرژی بین مطالعه حاضر و روابط ارائه شده توسط (Sadeghfam et al., 2014)

$\Delta E_{AC} / E_A$		
صفحه مشبک P50	صفحه مشبک P40	
٪ ۲/۱	٪ ۵/۱	RMSE (%)
۰/۹۹۹	۰/۹۹۴	R <sup>2</sup>
٪ ۲/۷۳	٪ ۷/۹	MAPE
٪ ۱/۹	٪ ۴/۹	MAE (%)

آنالیز خطاها نشان دهنده دقت روابط ارایه شده توسط محققان مذکور و صحت نتایج پژوهش حاضر است. با توجه به جدول (۳) مشاهده می شود که از دیدگاه استهلاک انرژی عملکرد صفحه مشبک P50 نسبت به P40 بهتر بوده و خطای موجود می تواند ناشی از آبستگی در ناحیه حوضچه آرامش باشد. دو آماره RMSE و MAE در اینجا نشان دهنده میزان خطای استهلاک نسبی انرژی در مطالعه حاضر نسبت به روابط ارائه شده است. با توجه به کم بودن خطا بین بستر متحرک و بستر ثابت، می توان اظهار داشت که تاثیر آبستگی بر استهلاک انرژی ناچیز بوده و استهلاک انرژی قبل از صفحه مشبک، بیشتر ناشی از پرش هیدرولیکی است. R<sup>2</sup> نشان دهنده منطبق بودن روند تغییرات

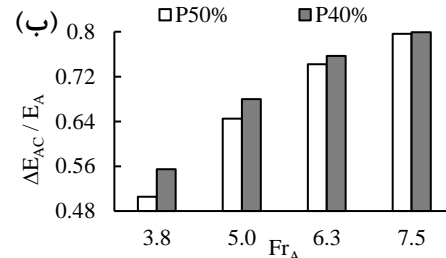
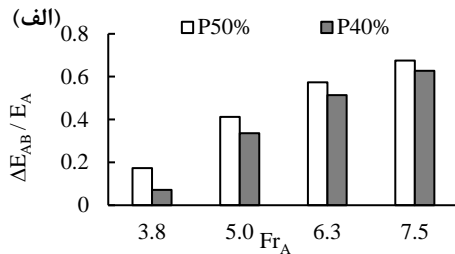


شکل ۵. میزان مشارکت پرش هیدرولیکی و صفحه مشبک از استهلاک انرژی در صفحه مشبک های P40 و P50



باشند. در تحقیق حاضر از دو نوع صفحه مشبک با درصد تخلخل ۴۰ و ۵۰ درصد استفاده شده است. تاثیر تخلخل بر استهلاک انرژی در شکل (۶) نشان داده شده است.

شکل سوراخ‌ها، اندازه آنها، منظم یا نامنظم بودن و درصد تخلخل از مواردی هستند که انتظار می‌رود بر نحوه عبور جریان از صفحه مشبک و در نتیجه آن استهلاک انرژی، تاثیر داشته



شکل ۶. مقایسه انرژی مستهلاک شده در دو صفحه مشبک P40 و P50 (الف) قبل از صفحه مشبک؛ (ب) بعد از صفحه مشبک

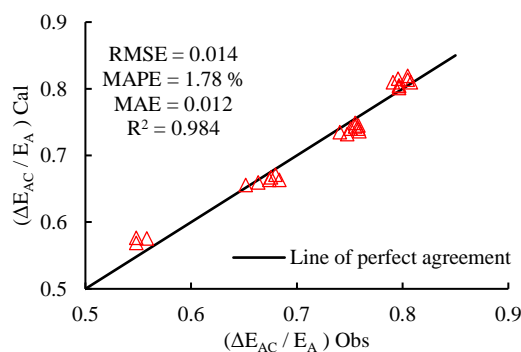
از ۲۰ درصد باقیمانده از نتایج نیز به منظور صحت سنجی روابط استفاده شده است. در شکل (۷) به مقایسه مقادیر مشاهداتی و محاسباتی پارامترهای بدون بعد آبشستگی برای کل داده‌ها و همچنین نتایج حاصل از مقایسه پارامترهای بدون بعد آبشستگی مربوط به داده‌های صحت سنجی پرداخته شده است. نتایج ارزیابی نکویی برازش ارائه شده در این شکل نشان می‌دهد که روابط ارائه شده در محدوده آزمایش‌ها، با دقت قابل قبولی می‌تواند مورد استفاده قرار بگیرد.

صفحات مشبک با قرارگیری در مقابل جریان با دو مولفه تشکیل پرش هیدرولیکی و تلاطم ناشی از عبور جریان از روزنه‌های این صفحات باعث استهلاک انرژی جریان می‌گردند. با توجه به شکل (۶) استهلاک انرژی در بالادست صفحه مشبک برای مدل P50 بیشتر از مدل P40 بوده و علت آن نوع پرش در اسکرین ۴۰ درصد بوده که از نوع پرش هیدرولیکی آزاد است. در صورتیکه در اسکرین ۵۰ درصد پرش به علت تخلخل زیاد اسکرین، به اسکرین نزدیک می‌شود و پرش هیدرولیکی احتمالی شکل می‌گیرد. در چنین حالتی تلاطم جریان و در نتیجه استهلاک انرژی به طور قابل ملاحظه‌ای افزایش می‌یابد. در پایین‌دست صفحه مشبک مقدار استهلاک انرژی برای صفحه مشبک P40 بیشتر از صفحه مشبک P50 است. علت این پدیده نیز مربوط به افزایش عمق آب در اثر درصد تخلخل و سطح خیس شده بیشتر و در نهایت خروج آب از مدل P40 با تلاطم بیشتر نسبت به مدل P50 می‌باشد.

$$\frac{\Delta E_{AC}}{E_A} = 0.286(Fr_A)^{0.499}(P)^{-0.052}\left(\frac{D_s}{E_A}\right)^{-0.0014}\left(\frac{d_{50}}{E_A}\right)^{0.0041} \quad (\text{رابطه ۷})$$

#### رابطه تجربی برای محاسبه استهلاک انرژی

بر اساس آنالیز ابعادی انجام شده و رابطه حاصل از آن (رابطه ۳)، استهلاک انرژی در پایین‌دست صفحه مشبک، با چهار پارامتر  $Fr_A$ ,  $\frac{d_{50}}{E_A}$ ,  $\frac{D_s}{E_A}$ ,  $P$  در ارتباط است. جهت استخراج رابطه تجربی برای محاسبه استهلاک انرژی، از رابطه کلی زیر استفاده می‌شود:



شکل ۷. نمودار پراکنش مقادیر مشاهداتی و محاسباتی پارامتر بدون بعد استهلاک انرژی برای کل داده‌ها

$$\frac{\Delta E}{E_A} = \alpha_1 (Fr_A)^{\beta_1} \times \alpha_2 (P)^{\beta_2} \times \alpha_3 \left(\frac{D_s}{E_A}\right)^{\beta_3} \times \alpha_4 \left(\frac{d_{50}}{E_A}\right)^{\beta_4} \quad (\text{رابطه ۶})$$

جهت تعیین تاثیر گذارترین پارامتر در محاسبه استهلاک انرژی آنالیز حساسیت انجام شد. بدین منظور با در نظر گرفتن پارامترهای بدون بعد  $(Fr_A, \frac{D_s}{E_A}, \frac{d_{50}}{E_A})$  و  $P$  و رابطه (۷)، یکی از متغیرها به اندازه مشخصی (افزایش یا کاهش) تغییر داده شد و با ثابت در نظر گرفتن سایر متغیرها، تاثیر آن بر متغیر وابسته (استهلاک انرژی) بررسی شد. نتایج آنالیز حساسیت در جدول (۴) ارائه شده است.

که در آن  $\alpha$  و  $\beta$  ضرایب ثابتی بوده و با توجه به داده‌های آزمایشگاهی محاسبه می‌گردند. برای محاسبه مقادیر ضرایب  $\alpha$  و  $\beta$ ، ۸۰ درصد از کل نتایج بدست آمده بصورت تصادفی انتخاب شده و با استفاده از روش Generalized Reduced Gradient (GRG) Nonlinear مقادیر ضرایب مربوطه قابل محاسبه است.



بدون بعد اندازه متوسط دانه‌ها، حداکثر عمق آبشستگی، عدد فرود و نسبت تخلخل به ترتیب باعث تغییر  $0.06$ ،  $0.21$ ،  $0.22$  و  $57/0$  درصدی در استهلاک انرژی می‌شود. با توجه به اثر بسیار ناچیز پارامترهای  $\frac{d_{50}}{E_A}$ ،  $\frac{D_s}{E_A}$  بر استهلاک انرژی می‌توان از آنها صرف نظر کرده و رابطه (۷) را بصورت زیر بازنویسی کرد:

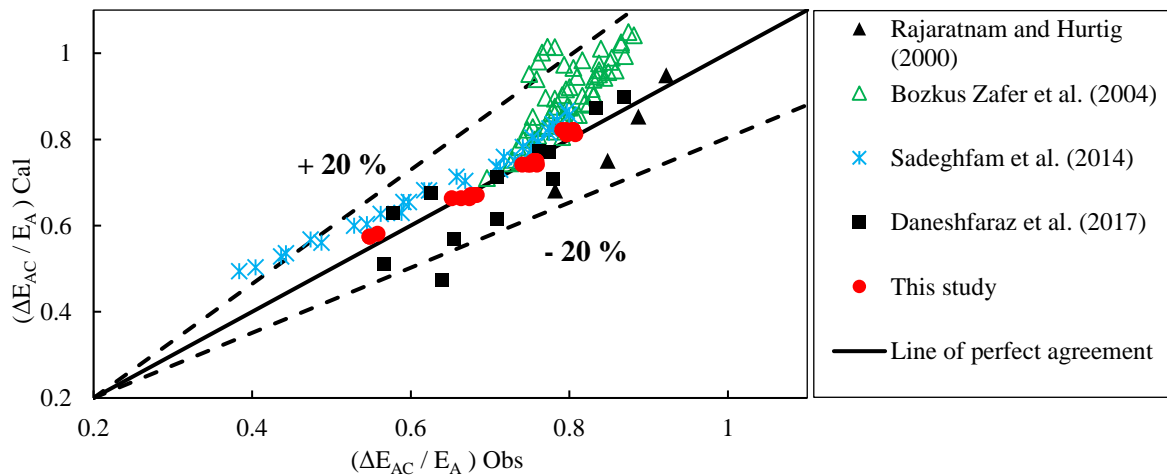
$$\frac{\Delta E_{AC}}{E_A} = 0.286(Fr_A)^{0.499} (P)^{-0.052} \quad (\text{رابطه ۸})$$

برای بررسی عملکرد رابطه (۸) با استفاده از داده‌های مربوط به آزمایش‌های محققان قبلی، میزان استهلاک انرژی محاسبه و سپس با داده‌های آزمایشگاهی تحقیق حاضر مقایسه شد (شکل ۸).

جدول ۴. آنالیز حساسیت پارامترهای موثر بر استهلاک انرژی در رابطه (۷)

P	Fr <sub>A</sub>	میزان تغییرات (I)		میزان تغییرات
		$\frac{D_s}{E_A}$	$\frac{d_{50}}{E_A}$	
۰/۲۵	۲/۴۶	۰/۰۰۶	۰/۰۲	+۵
۰/۵۷	۷/۲۲	۰/۰۲۱	۰/۰۶	+۱۰
۰/۵۹	۱۳/۳۷	۰/۰۴	۰/۱۲	-۲۵
۰/۶۰	۱۹/۳۴	۰/۰۶۱	۰/۱۸	-۳۵

نتایج آنالیز حساسیت نشان می‌دهد که عدد فرود جریان در مقطع A دارای بیشترین تاثیر و همچنین حداکثر عمق آبشستگی، کمترین تاثیر را بر روی استهلاک انرژی دارند. با توجه به داده‌های جدول (۴)، افزایش ۱۰ درصدی هر یک از پارامترهای



شکل ۸. نمودار پراکنش مقادیر مشاهداتی و محاسباتی (رابطه ۸) پارامتر بدون بعد استهلاک انرژی برای مطالعات گذشته و تحقیق حاضر

نتایج نشان داد که صفحه مشبک تاثیر چشمگیری در تثبیت موقعیت پرش هیدرولیکی و همچنین استهلاک انرژی در پایین دست آن دارد. پرش هیدرولیکی و صفحه مشبک به صورت یک سیستم عمل می‌کنند که در نهایت باعث استهلاک انرژی بیشتری می‌شوند. با محاسبه میزان استهلاک انرژی در بالادست و پایین دست صفحه مشبک، میزان مشارکت پرش هیدرولیکی و صفحه مشبک تعیین شد. بر این اساس در دی‌های پایین، درصد مشارکت صفحه مشبک در استهلاک انرژی بالاست و سپس با افزایش عدد فرود از میزان آن کاسته شده و به درصد مشارکت پرش هیدرولیکی افزوده می‌شود.

بر اساس داده‌های آزمایشگاهی و تشابه ابعادی یک رابطه تجربی برای محاسبه استهلاک انرژی در پایین دست صفحه مشبک ارائه شده است. بر اساس این رابطه، استهلاک انرژی با چهار پارامتر بدون بعد عدد فرود فوق بحرانی ( $Fr_A$ )، میزان تخلخل صفحه مشبک ( $P$ )، اندازه بدون بعد دانه‌ها ( $d_{50} / E_A$ ) و

شکل (۸) نشان می‌دهد که رابطه (۸) در محاسبه استهلاک انرژی در پایین دست صفحه مشبک دارای دقت مناسب و قابل قبول بوده و با قبول ۲۰ درصد خطا می‌توان در شرایط مختلف هیدرولیکی، استهلاک انرژی را با استفاده از این رابطه پیش‌بینی کرد.

### نتیجه‌گیری

هدف از انجام تحقیق حاضر بررسی آزمایشگاهی استهلاک انرژی جریان فوق بحرانی در مواجهه با صفحه مشبک است. جریان فوق بحرانی به وسیله دریچه کشویی تولید شده و در فاصله ۱ متری از آن، صفحات مشبک با دو نوع نسبت تخلخل ۴۰ و ۵۰ درصد نصب شدند. فاصله بین دریچه و صفحه مشبک که حوضچه آرامش نامیده می‌شود با مصالح شنی پر شده و این امر امکان وقوع آبشستگی و تشکیل پرش بر روی بستر متحرک را فراهم می‌سازد.

$\sigma_g$	انحراف معیار هندسی دانه‌ها [-]
$d_{50}$	اندازه متوسط دانه‌ها [L]
$Fr_A$	عدد فرود جریان فوق بحرانی [-]
$w$	میزان بازشدگی دریاچه [L]
$\rho$	جرم مخصوص آب [ $ML^{-3}$ ]
$\rho_s$	جرم مخصوص دانه‌ها [ $ML^{-3}$ ]
$E$	انرژی مخصوص [L]
$D_s$	ماکسیمم عمق آبشستگی [L]
$g$	شتاب جاذبه [ $LT^{-2}$ ]
$\mu$	ویسکوزیته دینامیکی آب [ $ML^{-1} T^{-1}$ ]

حداکثر عمق آبشستگی ( $D_s / E_A$ ) در ارتباط است. با استفاده از آنالیز حساسیت مشخص شد که تاثیر دو پارامتر حداکثر عمق آبشستگی و اندازه متوسط دانه‌ها در استهلاک انرژی قابل صرف نظر کردن بوده و از رابطه (۷) حذف شدند (رابطه ۸).  
مطالعات حاضر در این زمینه در سطح تحقیق پایه قرار دارد و تاکنون در اجرا پیاده‌سازی نشده است. لذا برای ایجاد حوضچه‌های آرامش با بستر متحرک و اسکرین نیاز به مطالعات بیشتر و گسترده‌تری است.

#### نمادها:

P تخلخل [-]

#### REFERENCES

- Aslankara, V. (2007). "Experimental investigation of tailwater effect on the energy dissipation through screens" *M.S. thesis, Middle East Technical Univ., Ankara, Turkey*.
- Bozkus, Z. and Aslankara, V. (2008). "Tailwater effect on the energy dissipation through screens" Proceedings of the 8th International Congress on Advances in Civil Engineering, Eastern Mediterranean University, Famagusta, North Cyprus.
- Bozkus, Z., Cakir, P. and Ger, M. (2007). "Energy dissipation by vertically placed screens" *Canadian Journal of Civil Engineering*, 34(4), pp. 557–564.
- Bozkus, Z., Cakir, P., Ger, M. and Ozeren, Y. (2004). "Energy dissipation through screens" Proceedings of the 2004 World Water and Environmental Resources Congress. Salt Lake City, Utah, USA, ASCE, 1–8.
- Bozkus, Z., Güngör, E. and Ger, M. (2006). "Energy dissipation by triangular screens" Proceedings of the Seventh International Congress on Advances in Civil Engineering, Yıldız Technical University, Istanbul, Turkey.
- Cakir, P. (2003). "Experimental investigation of energy dissipation through screens" 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 Journal of Civil Engineering*, 44(10), pp. 850–859. <https://doi.org/10.1139/cjce-2017-0273>.
- Daneshfaraz, R., Sadeghfam, S., & Rezazadeh-Joudi, A. (2016). Laboratory Investigation on the Effect of Screen's Location on the Flow Energy Dissipation. *Irrigation and drainage structures engineering research*, 17(68), 47-62. <https://doi.org/10.22092 /ARIDSE.2017.109616> (in Farsi).
- Daneshfaraz, R., Sadeghfam, S., & Hasanniya, V. (2019a). Experimental investigation of energy dissipation the vertical drops equipped with a horizontal screen with the supercritical flow. *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 50(6) pp. 1421–1436 (in Farsi).
- Daneshfaraz, R., Sadeghfam, S. and Tahni, A., (2019b). "Experimental investigation of screen as energy dissipators in the movable-bed channel". *Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Civil Engineering*, pp.1-10.
- Daneshfaraz, R., Majedi Asl, M. and Mirzaee, R., (2019c). "Experimental study of expanding effect and sand-roughened bed on hydraulic jump characteristics". *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 50(4), pp.885-896(in Farsi).
- Daneshfaraz, R., Chabokpour, J. and Nezafat, H., (2019d). "Experimental investigation of the scouring due to hydraulic jump in screens". *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 50(5), pp.1039-1051(in Farsi).
- Daneshfaraz, R., Chabokpour, J., Dasineh, M. and Ghaderi, A., (2019e). "The experimental study of the effects of river mining holes on the bridge piers". *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 50(7), pp.1619-1633(in Farsi).
- Kabiri-Samani, A. R., Bakhshian, E., & Chamani, M. R. (2017). Flow characteristics of grid drop-type dissipators. *Flow Measurement and Instrumentation*, 54, 298-306. <https://doi.org/10.1016/j.flowmeasinst.2016.11.002>.
- Majedi-Asl, M., Daneshfaraz, R. and Valizadeh, S. (2019). "Experimental investigation of the river materials mining effect on the scouring around armed pier groups". *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 50(6), pp.1363-1380(in Farsi).
- Nayebzadeh, B., Lotfollahi-yaghin, M.A. and Daneshfaraz, R., (2019). "Experimental study of energy dissipation at a vertical drop equipped with vertical screen with gradually expanding at the downstream". *AUT Journal of Civil Engineering*. <https://doi.org/10.22060/CEEJ.2019.16493.6265>
- Rajaratnam, N. and Hurtig, K. I. (2000). "Screen-type energy dissipator for hydraulic structures" *Journal of Hydraulic Engineering*, 126(4), pp. 310–312. [http://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/\(ASCE\)0733-9429\(2000\)126:4\(310](http://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/(ASCE)0733-9429(2000)126:4(310)

Rezaie, M., Daneshfaraz, R., and Dasineh, M. (2018). "Experimental investigation of the effect of clay and polyacrylamide cationic addition on scouring reduction of pier bridges and pits created by bed material removal". *Hydraulic Press*, 13 (3): 59-70.

Sadeghfam, S., Akhtari, A. A. and Daneshfaraz, R., Tayfur, G. (2015). "Experimental investigation of screens as energy dissipaters in submerged hydraulic jump". *Turkish Journal of Engineering*

*and Environmental Sciences*, 38(2), 126–138. <https://doi.org/10.3906/muh-1401-15>.

Sadeghfam, S., Daneshfaraz, R., Khatibi, R. and Minaei, O., 2019. Experimental studies on scour of supercritical flow jets in upstream of screens and modelling scouring dimensions using artificial intelligence to combine multiple models (AIMM). *Journal of Hydroinformatics*, 21(5), pp.893-907.