

Experimental Investigation of the Scouring due to Hydraulic Jump in Screens

RASOUL DANESHFARAZ^{1*}, JAFAR CHABOKPOUR², HADI NEZAFAT³

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

2. Assistant Professor, Department of Civil Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, University of Maragheh, Maragheh, Iran.

2. MSc Student, Department of Civil Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, University of Maragheh, Maragheh, Iran.

(Received: Jan. 31, 2018- Revised: Aug. 27, 2018- Accepted: Sep. 8, 2018)

ABSTRACT

In this research, the applicability of the screen sheet, as an energy dissipater at downstream of hydraulic structures, has been studied to reduce the amount of scouring. For operation of the experiments, a rectangular flume with 0.3m in width, 0.45m in height and 5m in length, including a sluice gate for the flow control was used. For reducing energy of outflow from sluice gate, the screen sheets as energy dissipaters with 40% and 50% porosity were placed at distance of 1.5m from the gate. After the screen sheet, the movable beds consist of three different grain sizes of 1.8, 2.6 and 5.2 mm, with the dimensions of 1.3m in length, 0.3m in width and 11.4cm in depth were used to investigate the effect of screen on maximum dimensions of the scouring hole. The results of this study showed that the thickness and porosity of the screen and its distance from the gate are effective parameters on the length and depth of scouring hole. The maximum and minimum depth and length of scouring hole were occurred in the screens with 40% porosity and double 50% porosity, respectively. So that, by increasing the screen's porosity and thickness, the scouring whole dimension decreases. Also, by increasing the particle dimensions, the scouring hole dimension decreases.

Key words: Screen; Scouring; Bed grain sizes; Hydraulic jump.

بررسی آزمایشگاهی آبشستگی ناشی از پرش هیدرولیکی در صفحه مشبک

رسول دانشفراز^{۱*}، جعفر چاپک پور^۲، هادی نظافت^۳

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

۲. استادیار، گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه مراغه، مراغه، ایران

۳. دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه مراغه، ایران

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۶/۱۱/۱۱ - تاریخ بازنگری: ۱۳۹۷/۶/۵ - تاریخ تصویب: ۱۳۹۷/۶/۱۷)

چکیده

در این مطالعه کاربرد صفحه مشبک به عنوان مستهلک کننده انرژی جریان آب در پایین دست سازه های هیدرولیکی برای کاهش میزان آبشستگی است. برای انجام آزمایش ها از یک کانال مستطیلی و برای کنترل جریان از یک دریچه کشویی با بازشدگی ثابت استفاده شده است. به منظور کاهش انرژی جریان خروجی از دریچه کشویی، صفحات مشبک به عنوان مستهلک کننده های انرژی با منافذ (نسبت روزنه ای) ۴۰٪ و ۵۰٪، به فاصله ۱/۵ متری از دریچه قرار گرفته اند. بعد از صفحه مشبک، بستر متحرک متشکل از ذرات با سه اندازه ۱/۸ و ۲/۶ و ۵/۲ میلی متر، به طول ۱/۳ متر، عرض ۰/۳ متر و ضخامت ۰/۱۱۴ متر برای مطالعه تأثیر صفحه مشبک روی حداکثر عمق و طول حفره آبشستگی قرار داده شد. نتایج مطالعه نشان داد ضخامت و نسبت روزنه صفحه مشبک و فاصله قرارگیری آن از دریچه روی مقادیر حفره آبشستگی مؤثرند. بیشترین و کمترین عمق و طول حفره آبشستگی به ترتیب در صفحه مشبک با نسبت روزنه ۴۰٪ و ۵۰٪ دو برابر رخ داد. به طوری که با افزایش نسبت روزنه و ضخامت صفحات، مقادیر حفره آبشستگی کاهش می یابد. همین طور با افزایش اندازه ذرات میزان آبشستگی نیز روند کاهشی را نشان می دهد.

واژه های کلیدی: صفحه مشبک، آبشستگی، اندازه ذرات بستر، پرش هیدرولیکی

مقدمه

آبشستگی موضعی ناشی از پرش هیدرولیکی در پایین دست سازه های هیدرولیکی یکی از مسائل پیچیده در پایداری این سازه ها می باشد. بحث آبشستگی هر چند قدمتی طولانی در علم هیدرولیک دارد، لیکن به دلیل شرایط و پیچیدگی های خاص آن و همچنین به دلیل نبودن رابطه ای مناسب که بتواند پاسخگوی تمامی شرایط باشد، همچنان مورد توجه خاص محققین علم هیدرولیک و مهندسی رودخانه است. در بسیاری از موارد برای کاهش شدت جریان و آشفتگی زیاد در مسیر جریان و پایین دست سازه های هیدرولیکی با توجه به عدم صرفه ای اقتصادی، محدودیت در اجرا و شرایط محیطی نمی توان حوضچه ای آرامش ایجاد نمود؛ بنابراین صفحه مشبک با نسبت روزنه های مختلف برای مستهلک نمودن انرژی و در نتیجه جلوگیری از آبشستگی می تواند استفاده گردد.

جریان در صفحه مشبک و تأثیر اندازه ای روزنه ای صفحات روی جریان در سال ۱۹۵۰ مورد بررسی و ارزیابی قرار گرفت. بر این اساس، مطالعات به سه دسته ای مطالعه ای افت فشار در صفحه مشبک، توزیع سرعت ایجاد شده به وسیله صفحات و آشفتگی

ناشی از آنها تقسیم شد (Baines and Peterson, 1950).

بر اساس مطالعات انجام شده توسط (Yeh and Shrestha, 1988)، با فرض یکنواخت بودن جریان نزدیک شونده به صفحه مشبک و اصطکاک ناچیز در مرز کف، هنگام عبور جریان از صفحه مشبک به دلیل وجود روزنه در سطح و تغییر جهت جریان به سمت راستای عمود بر سطح صفحه مشبک، جریان منقبض می شود. در نهایت آشفتگی جریان در پشت صفحه مشبک افزایش می یابد و انرژی مستهلک می گردد و جریان در پایین دست صفحه مشبک و در فاصله ای معینی از آن یکنواخت می شود.

مطالعه آزمایشگاهی توسط (Rajaratnam and Hurtig, 2000) با بررسی داده ها نشان داد استهلاک انرژی نسبی صفحه مشبک با چینش منفرد و دوتایی و با نسبت روزنه ۴۰٪ و در محدوده عدد فرود ۴ تا ۱۳، خیلی بزرگ تر از مقدار متناظر بدست آمده برای پرش هیدرولیکی کلاسیک است.

بررسی تأثیر اندازه ای دانه بر میزان آبشستگی کانال در پایین دست دریچه کشویی توسط Kells et al., (2001) انجام شد. برای مطالعه ای روند آبشستگی از سه اندازه ای ماسه با دانه بندی یکنواخت و یک اندازه شامل ترکیبی از سه ماسه با دانه بندی

Bestawy (2013) شکل‌های جدیدی از موانع ستونی شکل در بستر حوضچه‌ی آرامش با ماسه یکنواخت $d_{50} = 8mm$ را مطالعه نمود و نشان داد مدل‌های با سطوح مقعر، انرژی بیشتری را نسبت به سایر سطوح مستهلک می‌کند. همین‌طور مطالعه نشان داد مقطع عمودی نیم دایره‌ای بیشترین تأثیر را در میان سایر مدل‌های آزمایش‌شده دارد.

Sadeghfam *et al.*, (2015) در مورد تأثیر صفحه مشبک در پرش هیدرولیکی مستغرق نشان داد صفحه مشبک با آرایش دوتایی در پرش هیدرولیکی تحمیلی انرژی بیشتری را مستهلک می‌کند و فاصله بین صفحه مشبک با آرایش دوتایی تأثیر ناچیزی در استهلاک انرژی دارد. همچنین Sadeghfam *et al.*, (2019) مطالعه آزمایشگاهی آبشستگی در جریان فوق بحرانی در بالادست صفحه‌های مشبک پرداخته و مدل هوش مصنوعی را ارائه نمودند. جریان عبوری از صفحات مشبک با استفاده از نرم‌افزار FLOW-3D شبیه‌سازی و میزان استهلاک انرژی ناشی از آن توسط Daneshfaraz *et al.*, (2017a) مورد بررسی قرار گرفت. به منظور مقایسه میزان استهلاک انرژی، ۴ مدل متفاوت با درصد روزه‌های ۴۰ و ۵۰ درصد، در دو حالت استفاده از بلوک‌های مانع قبل از صفحه مشبک و بدون وجود بلوک‌ها، مورد مطالعه قرار دادند. نتایج نشان داد که مدل عددی از دقت قابل قبولی برخوردار می‌باشد. بررسی استهلاک انرژی برای مدل‌ها نشان داد کارایی صفحات مشبک برای استهلاک انرژی با افزایش عدد فرود بیشتر می‌شود.

Hamidifar and Omid (2010) با استفاده از آزمایش‌های تجربی به بررسی میزان آبشستگی موضعی در پایین‌دست کف‌بند پرداختند. آزمایش‌ها با اعداد فرود جت ورودی مختلف و دامنه متغیر عمق پایاب، شامل استغراق کم تا استغراق زیاد انجام شد. نتایج آزمایش‌ها نشان داد عمق پایاب به میزان عدد فرود ذره بستگی دارد. همچنین پارامترهای مشخصه گودال آبشستگی به صورت نمودارهایی برحسب پارامترهای بدون بعد آورده شده است که می‌توان در طراحی‌ها برای حفاظت بستر در برابر آبشستگی استفاده کرد.

Parvini *et al.*, (2016) برای کنترل آبشستگی در مجاری روباز از صفحات مدفون در دال بستر فرسایش پذیر استفاده نمودند. نتایج نشان داد که زاویه و محل قرارگیری صفحات در کنترل و کاهش عمق آبشستگی موضعی از اهمیت زیادی برخوردار است.

Daneshfaraz *et al.*, (2017b) به بررسی آزمایشگاهی تأثیر محل قرارگیری صفحات مشبک در میزان استهلاک انرژی جریان در بازه عدد فرود ۲/۵ تا ۸ پرداخته و مشاهده نمودند که

یکنواخت در عمق‌های مختلف پایاب و سرعت‌های مختلف جریان استفاده شد. نتایج مطالعه نشان داد مساحت و عمق آبشستگی به شدت به اندازه دانه‌ها بستگی دارد و هر دو با کاهش اندازه‌ی دانه افزایش می‌یابند.

مطالعات آزمایشگاهی Cakir (2003) بر روی صفحه مشبک به عنوان مستهلک‌کننده انرژی در پایین‌دست سازه‌های هیدرولیکی کوچک با در نظر گرفتن پارامترهای نسبت روزه، ضخامت و محل صفحات همراه با عدد فرود جریان بالادست به عنوان مهم‌ترین پارامترهای مورد بررسی صورت گرفت. نتایج آزمایش‌ها با محدوده عدد فرود ۵ تا ۱۸، نسبت روزه بین ۲۰٪ تا ۶۰٪ و محل قرارگیری صفحه مشبک از درجه حدود ۱۰۰ برابر عمق جریان بالادست اهمیت هر یک از پارامترها روی عملکرد استهلاک انرژی صفحه مشبک را نشان داد. همین‌طور نتایج نشان داد صفحه مشبک انرژی بیشتری را نسبت به پرش با محدوده‌ی مشخص‌شده در این مطالعه را مستهلک می‌کند.

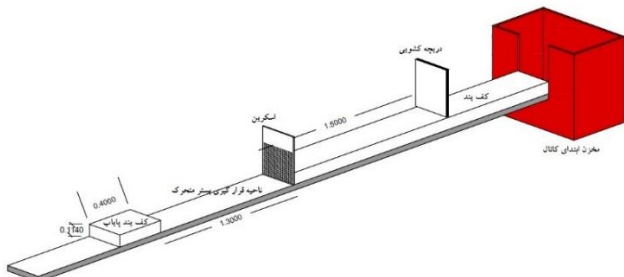
Balkis (2004) با مطالعه روی صفحه مشبک مایل نشان دادند صفحه مشبک مرتب‌شده به صورت قائم بدون زاویه انحراف انرژی بیشتری را نسبت به پرش هیدرولیکی تشکیل‌شده در پایین‌دست سازه‌های هیدرولیکی کوچک مستهلک می‌کند و زاویه‌ی انحراف صفحات مشارکت زیادی در مقایسه با صفحات قائم در استهلاک انرژی جریان آب ندارد.

Aslankara (2007) مطابق مطالعات قبلی از جریان آب زیر دریاچه‌ی کشویی به منظور شبیه‌سازی جریان پایین‌دست یک سازه‌ی هیدرولیکی برای مطالعه پایاب و تأثیر چندگانه صفحه مشبک روی استهلاک انرژی جریان آب استفاده نمود. نتایج آزمایش‌ها نشان داد با در نظر گرفتن اینکه چینش دابل چندتایی صفحه مشبک بیشتر از صفحه مشبک دابل منفرد انرژی جریان را مستهلک می‌کند، عمق پایاب مشارکت ناچیزی روی استهلاک انرژی دارد.

Mohamed Ali *et al.*, (2014) بر روی آبشستگی ناشی از پرش مستغرق با کف موج‌دار و موج‌های مثلثی دارای فاصله از هم در جریان با عدد فرود ۱/۶۸ و ۹/۲۹، عمق و طول آبشستگی موضعی در ماسه‌ی ریز را به ترتیب ۶۳/۴ و ۳۰/۲٪ و در ماسه‌ی درشت به ترتیب ۴۴/۲ و ۲۰/۶٪ در مقایسه با پرش هیدرولیکی کلاسیک کاهش می‌دهد.

در مطالعه Castro-Orgaz and Hager, (2011) برای بررسی پرش هیدرولیکی نوسانی در بستر متحرک، یک آنالیز برای مقایسه بین برش مرزی در جریان‌های نوسانی در بستر ثابت و شکل بستر انجام شده است. مشاهدات تجربی نشان داد تناسب قوی با فرضیه‌ی اصلی انگلاند و هانسن وجود دارد.

ورودی، در ابتدای مخزن یک صفحه تلاطم‌گیر با روزنه‌هایی به شکل دایره قرار داده شده است. دبی جریان نیز توسط دو شیر متصل به دو روتامتر واقع در خروجی پمپ‌ها اندازه‌گیری می‌گردد. برای مدل‌سازی جریان پایین‌دست یک سازه هیدرولیکی از یک دریچه کشویی استفاده شده است. فاصله دریچه از ورودی کانال ۱ متر، فاصله تا صفحه مشبک ۱/۵ متر و میزان بازشدگی آن به اندازه ۱ سانتیمتر که در طول آزمایش‌ها ثابت است. این میزان بازشدگی با توجه به دبی جریان از ۱۵۰ تا ۵۰۰ لیتر بر دقیقه جریان فوق بحرانی با عدد فرود با بازه ۵ تا ۱۸ را تولید می‌کند. شکل (۱) طرح شماتیک مجموعه مورد استفاده برای انجام آزمایش‌ها را نشان می‌دهد.



شکل ۱- طرح شماتیک مجموعه آزمایشگاهی مورد استفاده در آزمایشگاه هیدرولیک و رسوب دانشگاه مراغه

صفحه مشبک به‌عنوان یکی از عناصر اصلی آزمایش‌ها، از صفحاتی به ضخامت ۱ سانتیمتر و از جنس پلی‌اتیلن به دلیل سبکی، سهولت در ایجاد روزنه روی آن و مقاومت مناسب در برابر شرایط آزمایش ساخته شده‌اند. در این مطالعه، صفحه مشبک به عرض ۳۰ سانتیمتر و ارتفاع بیشتر از ارتفاع کانال با نسبت روزنه ۴۰٪ و ۵۰٪ تک و دوبل به فاصله ۲/۵ متر از ورودی جریان و فاصله ۱/۵ متری از دریچه به‌صورت عمود بر جهت جریان تولیدی از دریچه نصب شده است (شکل ۲). قطر هر روزنه روی صفحه مشبک ۱ سانتیمتر است.



شکل ۲- صفحه مشبک نصب‌شده روی فلوم

برای اینکه بستر متحرک با ضخامت مشخص در کانال ایجاد گردد، از دو عدد کف‌بند از جنس پی‌وی‌سی به دلیل زبری

در تمامی حالات مورد بررسی، استهلاک انرژی سیستم از استهلاک انرژی پرش هیدرولیکی آزاد بیشتر بوده است. نتایج به‌دست‌آمده نشان داد افزایش عدد فرود موجب افزایش عملکرد صفحات مشبک (افت انرژی نسبی) و کاهش بازده صفحات مشبک (اختلاف بین افت انرژی نسبی سیستم از افت انرژی پرش هیدرولیکی آزاد) شده است.

مطابق تحقیقات انجام‌گرفته در رابطه با کاربرد صفحه مشبک به‌عنوان مستهلک‌کننده انرژی جریان، پارامترهای بسیاری در ارتباط با جریان در بستر ثابت از جمله اندازه‌ی روزنه‌ها و تأثیر آن روی جریان، درصد روزنه‌ها، آرایش صفحات مشبک چندگانه، فواصل میان صفحات مشبک چندگانه، میزان صلبیت صفحه مشبک، زاویه قرارگیری صفحه مشبک در مسیر جریان و سایر پارامترهای مؤثر آزمایش شده و مورد مطالعه قرار گرفته است. لذا مطالعه بر روی بستر متحرک بعد از صفحات مشبک انجام نشده است. بنابراین از آنجایی که استهلاک انرژی جریان برای جلوگیری از آبستتگی بستر اطراف سازه‌های هیدرولیکی در بعضی موارد با محدودیت همراه است و یا می‌تواند باعث تحمیل هزینه فراوان شود، لازم به نظر می‌رسد تمامی پارامترهای مربوط به صفحه مشبک به‌عنوان مستهلک‌کننده نوین انرژی در بستر متحرک نیز مورد مطالعه قرار گیرد. در این مطالعه سعی شده است تعدادی از این پارامترها در بستر متحرک مورد آزمایش و بررسی قرار گیرد.

هدف از این مطالعه، بررسی آبستتگی ناشی از تشکیل پرش هیدرولیکی در پایین‌دست دریچه کشویی با استفاده از صفحه مشبک با نسبت روزنه ۴۰٪ و ۵۰٪ می‌باشد. بر این اساس محاسبات میزان آبستتگی بستر متحرک برای سه اندازه ذرات رسوبی انجام شده است.

آزمایش‌ها تأثیر مشخصات هندسی صفحه مشبک قرار داده‌شده در مجموعه آزمایشگاهی، اندازه ذرات تشکیل‌دهنده بستر متحرک، نوع پرش هیدرولیکی و میزان جریان در آبستتگی اطراف صفحه مشبک را مورد مطالعه قرار می‌دهد.

مواد و روش‌ها

در تحقیق حاضر، برای انجام آزمایش‌ها از یک کانال با مقطع مستطیلی به طول ۵ متر، عرض ۳۰ سانتیمتر و ارتفاع ۴۵ سانتیمتر استفاده گردید. برای اینکه سطحی صاف و با کمترین زبری در اختیار باشد، کف و دیواره‌های کانال از جنس پلکسی‌گلس ساخته شده است. جریان کانال توسط دو پمپ هرکدام با حداکثر دبی ۶۵۰ لیتر بر دقیقه که به یک مخزن کوچک در ابتدای کانال متصل است تأمین شده است. برای جلوگیری از آشفته‌گی جریان

اندازه مختلف، ذرات شسته شدند تا ذرات ریز چسبنده موجود از سطح آنها جدا گردد. سپس نمونه خشک ذرات رسوبی برای تعیین اندازه متوسط در آزمایشگاه خاک دانه‌بندی شدند برای طبقه‌بندی ذرات رسوبی از ضریب‌های یکنواختی و انحنای استفاده شده است. می‌دانیم میزان آبشستگی در بستر متشکل از ذرات رسوبی خوب دانه‌بندی شده و یکنواخت، کمتر از بستری خواهد بود که از ذراتی با دانه‌بندی غیریکنواخت تشکیل شده باشد. شن را در صورتی می‌توان در دسته خوب دانه‌بندی شده قرار داد که هر دو عبارت (۱) تا (۲) برای آن برقرار باشد (Holtz and Kovacs, 1981)

$$C_u \geq 4, 1 \leq C_c \leq 3 \quad (\text{رابطه ۱})$$

همچنین برای ماسه خوب دانه‌بندی شده شرایط زیر همزمان باید صادق باشد:

$$C_u \geq 6, 1 \leq C_c \leq 3 \quad (\text{رابطه ۲})$$

مطابق روابط فوق: C_u : ضریب یکنواختی و C_c : ضریب انحنای می‌باشد. ضریب یکنواختی C_u از رابطه (۳) قابل محاسبه است:

$$C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}} \quad (\text{رابطه ۳})$$

که در آن:

D_{60} : قطر بزرگترین دانه‌ای است که می‌تواند از الکی که ۶۰ درصد دانه‌ها از آن عبور کرده‌اند رد شود و D_{10} : قطر مؤثر یا قطر بزرگترین دانه‌ای است که می‌تواند از الکی که ۱۰ درصد دانه‌ها از آن عبور کرده‌اند رد شود. همچنین ضریب انحنای C_c از رابطه (۴) بدست می‌آید:

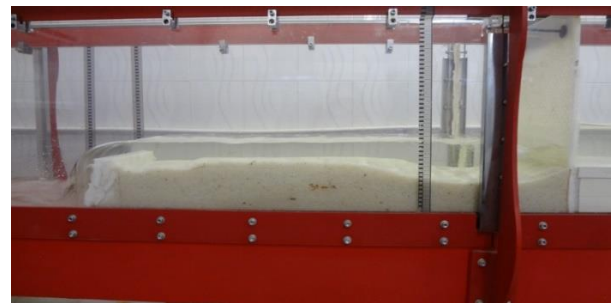
$$C_c = \frac{(D_{30})^2}{D_{10} \times D_{60}} \quad (\text{رابطه ۴})$$

که در آن: D_{30} : قطر بزرگترین دانه‌ای است که می‌تواند از الکی که ۳۰ درصد دانه‌ها از آن عبور کرده‌اند رد شود. مطابق جدول (۱)، مقادیر بدست آمده برای ضریب یکنواختی و ضریب انحنای ذرات نوع اول، دوم و سوم ارائه شده است. با توجه به نتایج بدست آمده، هیچ کدام از شرایط ذکر شده برای ضرایب یکنواختی و انحنای به صورت همزمان برقرار نیست. در نتیجه ذرات رسوبی مورد آزمایش از نظر یکنواختی دارای دانه‌بندی خوب نیستند.

جدول ۱- قطر متوسط و ضرایب یکنواختی و انحنای برای دانه‌بندی‌های مختلف مورد استفاده در تحقیق

	$D_{10} (mm)$	$D_{30} (mm)$	$D_{60} (mm)$	C_u	C_c
ذرات نوع ۱	۱/۳	۱/۷	۲/۱	۱/۶۱	۰/۶۹
ذرات نوع ۲	۲/۲	۲/۴	۲/۶	۱/۱۸	۱/۰۰۷
ذرات نوع ۳	۳/۳	۴/۱	۶	۱/۸۱	۰/۹۱

پایین و نزدیک به زبری پلکسی‌گلس با ارتفاع ۱۱/۴ سانتیمتر از کف کانال استفاده شده است. این ضخامت به صورت تجربی و با توجه به آزمایش‌های اولیه (شکل ۳) با در نظر گرفتن احتمال کف‌کنی بستر رسوبی توسط جریان فوق بحرانی بعد از صفحه مشبک در نظر گرفته شده است. طول کف‌بند اول ۲/۵ متر از ورودی کانال تا صفحه مشبک می‌باشد و طول کف‌بند دوم ۴۰ سانتیمتر است که در فاصله ۱/۳ متری بعد از صفحه نصب شده است.



شکل ۳- تصویر مربوط به آزمایش اولیه

طول و ضخامت بستر متحرک به عنوان یکی از اجزای اصلی این مطالعه با توجه به مشخصات جریان بعد از صفحه مشبک و میزان آبشستگی بدست آمده از آزمایش اولیه به صورت تجربی مشخص گردید. به این ترتیب که ذرات رسوبی اولیه با چگالی ۲۳۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب با در نظر گرفتن محاسبات و محدودیت‌های بعد از صفحه مشبک به طول ۱ متر و ضخامت ۱۰ سانتیمتر توسط دبی‌های ۱۵۰، ۳۰۰، ۳۷۵، ۴۵۰ و ۵۰۰ لیتر بر دقیقه مورد آزمایش قرار گرفت. نتایج حاصل از آزمایش اولیه نشان داد طول حفره آبشستگی تا انتهای طول ۱ متر در دبی‌های بالا افزایش می‌یابد. همین‌طور عمق حفره تا آستانه کف‌کنی پیشرفت می‌کند. بر این اساس طول بستر رسوبی ۱/۳ متر با در نظر گرفتن فاصله مناسب برای توسعه طول حفره آبشستگی و ضخامت بستر ۱۱/۴ سانتیمتر با در نظر گرفتن عمق مناسب برای کاهش احتمال کف‌کنی توسط جریان تعیین گردید.

دانه‌بندی و ضرایب یکنواختی و انحنای ذرات رسوبی

به منظور مشخص نمودن معیار اولیه برای انتخاب حداقل اندازه موردنیاز و با توجه به آزمایش اولیه انجام شده، سه ذره رسوبی با اندازه‌های مختلف انتخاب گردید. پس از تهیه ذرات رسوبی با سه

آنالیز ابعادی برای اشتقاق روابط تجربی

برای بررسی عمق و طول آبشستگی بعد از صفحه مشبک، مهم-ترین پارامترهای موثر را می‌توان به صورت تابعی از متغیرهای زیر در نظر گرفت (روابط ۵ و ۶):

$$D_s = f_1(q, d, w, d_s, y_A, y_B, y_C, L_j, x, x_g, n, t, g, \rho, \rho_s, \mu) \quad (\text{رابطه ۶})$$

که در روابط فوق: D_s : حداکثر عمق آبشستگی، q : دبی واحد عرض، d : بازشدگی دریچه، w : عرض کانال، y_A : عمق اولیه بعد از دریچه، y_B : عمق اولیه بعد از صفحه مشبک، y_C : عمق ثانویه بعد از صفحه مشبک، x : فاصله بین صفحه مشبک و دریچه، x_g : فاصله دریچه کشویی از ورودی کانال، n : نسبت روزنه صفحه مشبک، t : ضخامت صفحه مشبک، ρ_s : چگالی ذرات رسوبی، ρ : چگالی آب، d_s : اندازه ذره رسوبی، L_j : طول پرش هیدرولیکی، L_s : طول حفره آبشستگی، g : شتاب گرانش، μ : ویسکوزیته دینامیکی می‌باشد.

با استفاده از روش پی باکینگهام و با در نظر گرفتن متغیرهای تکراری d_s ، g ، ρ ، پارامترهای بدون بعد به صورت رابطه (۷) محاسبه شدند:

$$\frac{d_s}{D_s} = f_1(Fr_B, \frac{d}{d_s}, \frac{w}{d_s}, \frac{y_A}{d_s}, \frac{y_B}{d_s}, \frac{y_C}{d_s}, \frac{L_j}{d_s}, \frac{x}{d_s}, \frac{x_g}{d_s}, \frac{t}{d_s}, n, \frac{\rho_s}{\rho}, Re_*) \quad (\text{رابطه ۷})$$

که در پارامتر Fr_B ، y_B : عمق جریان در مقطع B و V_B : سرعت جریان در مقطع B و در پارامتر Re_* ، U : ویسکوزیته سینماتیکی، d_s : اندازه ذره و u_* : سرعت برشی ذره است

در رابطه بالا مقادیر d و w و x و x_g و ρ_s ثابت و تأثیر پارامترهای y_A و y_C روی حداکثر عمق آبشستگی ناچیز می‌باشد، لذا رابطه فوق به صورت رابطه (۸) خواهد بود:

$$\frac{d_s}{D_s} = f_1(Fr_B, \frac{y_B}{d_s}, \frac{L_j}{d_s}, \frac{t}{d_s}, n, Re_*) \quad (\text{رابطه ۸})$$

پارامتر y_A مربوط به قبل از پرش هیدرولیکی در بالادست صفحه مشبک بوده و چون در بالادست صفحه مشبک و پس از تشکیل پرش آزاد، بار آبی ثابت تشکیل می‌گردد عملاً این پارامتر تأثیری بر میزان آبشستگی نخواهد داشت. در خصوص پارامتر y_C نیز چون پرش انجام شده بر روی بستر فرسایش پذیر به صورت آزاد تنظیم خواهد گردید و آزمایش‌ها نیز بر این اساس انجام خواهد شد لذا می‌توان گفت که عملاً جریان تابع پائین دست خود

نخواهد بود به همین دلیل پارامترهای مورد اشاره از رابطه حذف گردیدند.

با روشی مشابه نیز می‌توان برای طول حفره آبشستگی رابطه (۹) را نوشت:

$$\frac{d_s}{L_s} = f_2(Fr_B, \frac{y_B}{d_s}, \frac{L_j}{d_s}, \frac{t}{d_s}, n, Re_*) \quad (\text{رابطه ۹})$$

برای ارائه رابطه بین پارامترهای ذکر شده در طول آزمایش‌ها، پارامترهای قابل اندازه‌گیری مورد سنجش قرار گرفته و در نهایت ضرایب ثابت و توان‌های هر یک از پارامترها و خطای نسبی میان مقادیر مشاهداتی و محاسباتی حداکثر عمق و طول حفره آبشستگی توسط نرم افزار اکسل محاسبه شده است. رابطه میان حداکثر عمق و طول حفره آبشستگی با پارامترهای بدون بعد مطابق روابط (۱۰ و ۱۱) محاسبه خواهد شد.

(رابطه ۱۰)

$$\frac{d_s}{D_s} = \left(\alpha_1 Fr_B^{\beta_1} \times \alpha_2 \left(\frac{y_B}{d_s}\right)^{\beta_2} \times \alpha_3 \left(\frac{L_j}{d_s}\right)^{\beta_3} \times \alpha_4 n^{\beta_4} \times \alpha_5 t^{\beta_5} \times \alpha_6 Re_*^{\beta_6} \right) \quad (\text{رابطه ۱۱})$$

در روابط فوق: α و β : توان هر یک از پارامترها می‌باشد که با توجه به نتایج آزمایشگاهی قابل محاسبه است.

معیارهای بررسی نمودار رگرسیونی

برای بررسی کیفیت نمودارهای برازش شده، معیارهای برازشی مجموع مربعات خطا^۳، ضریب تعیین^۴، ضریب تعیین اصلاح شده^۴ و خطای استاندارد^۵ به صورت مختصر تعریف و نحوه محاسبه در ادامه آمده است.

معیار SSE یا مجموع مربعات خطا معیاری برای تعیین میزان انحراف داده‌های مشاهداتی یا آزمایشگاهی با خط برازش شده است به طوری که هر چه این مقدار نزدیک صفر باشد، نشان دهنده پیش‌بینی قابل قبول تابع برازش داده شده است. برای محاسبه این معیار از رابطه (۱۲) استفاده می‌شود.

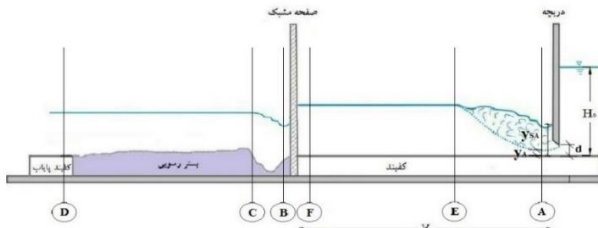
$$SSE = \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y}_i)^2 \quad (\text{رابطه ۱۲})$$

که در این رابطه: y_i : مقدار مشاهداتی برای داده i ام، \bar{y}_i : مقدار بدست آمده از تابع برازشی برای همان داده، n : تعداد داده‌های آزمایشگاهی است.

معیار R-Square یا ضریب تعیین بیانگر میزان احتمال همبستگی میان دودسته داده در آینده است. در واقع ضریب تعیین

3. Adjusted R square
4. Root Mean Squared Error

1. Sum of the Squares due to Error
2. R Square



شکل ۵- پرش هیدرولیکی مستغرق و جریان بعد از صفحه مشبک

مطابق شکل‌های (۴) و (۵) انرژی جریان تولیدشده از دریچه کشویی در هنگام عبور از صفحه مشبک مستهلک می‌شود. جریان پس از صفحه مشبک فوق بحرانی بوده و به دلیل پایین بودن عدد فرود جریان، پرش هیدرولیکی مستغرق تشکیل می‌شود؛ بنابراین با آشفته‌گی جریان ناشی از پرش، ذرات رسوبی تشکیل‌دهنده بستر از آن جدا شده و به نواحی پایین دست بستر منتقل می‌شوند. با پیشرفت آبشستگی الگوی جریان تغییر کرده و در جریان‌های شدیدتر، آشفته‌گی‌های بیشتر و جریان‌های برگشتی نیرومندتری تولید می‌شود که باعث پیشرفت سریع‌تر پروسه آبشستگی و تغییرات ناگهانی در مقادیر حفره آبشستگی می‌گردد. برای محاسبه عدد فرود در مقطع B از رابطه (۱۵) استفاده شده است.

$$Fr_B = \frac{V_B}{\sqrt{gy_B}} \quad (\text{رابطه ۱۶})$$

عدد رینولدز برشی ذره به‌عنوان یکی از پارامترهای مؤثر در مقدار حداکثر عمق آبشستگی از رابطه (۱۷) بدست می‌آید.

$$Re_{*B} = \frac{u_* d_s}{\nu} \quad (\text{رابطه ۱۷})$$

این پارامتر (u_{*B}) از رابطه ارائه‌شده توسط Julien به‌صورت (۱۸) محاسبه می‌گردد.

$$u_{*B} = \frac{V_B}{5.75 \log\left(\frac{2y_B}{d_s}\right)} \quad (\text{رابطه ۱۸})$$

مطابق محاسبات و آنالیز ابعادی که انجام شد، رابطه میان حداکثر عمق آبشستگی و طول حفره آبشستگی با پارامترهای مؤثر به‌صورت (۱۹) و (۲۰) محاسبه گردید:

(رابطه ۱۹)

$$\frac{d_s}{L_s} = 0.003211 \times Fr_B^{-0.3949} \times \left(\frac{y_B}{d_s}\right)^{0.5345} \times \left(\frac{L_j}{d_s}\right)^{0.9599} \times n^{-7.2927} \times t^{-0.9208} \times Re_*^{-0.5956}$$

(رابطه ۲۰)

$$\frac{d_s}{L_s} = 5.97 \left(Fr_B^{-7.5874} \times \left(\frac{y_B}{d_s}\right)^{-2.3267} \times \left(\frac{L_j}{d_s}\right)^{-0.4679} \times n^{-0.00009} \times t^{1.4802} \right)$$

با توجه به رابطه (۱۹)، عدد Fr_B کمترین تأثیر را با در نظر گرفتن ضریب ثابت و توان آن نسبت به میزان حداکثر عمق

میزان اشتراک تغییرات است. این معیار می‌تواند مقداری بین ۰ و ۱ باشد. در صورتی که مقدار آن به ۱ نزدیک باشد نشان‌دهنده پیش‌بینی قابل قبول تابع برازشی است. رابطه (۱۳) نحوه محاسبه معیار ضریب تعیین را نشان می‌دهد.

$$R - Square = \frac{\sum_{i=1}^n (\bar{y}_i - y_m)}{\sum_{i=1}^n (y_i - y_m)} \quad (\text{رابطه ۱۳})$$

که در آن: y_m : میانگین داده‌های مورد مطالعه است.

به دلیل اینکه معیار ضریب تعیین با افزایش مشاهدات و همین‌طور با افزایش تعداد متغیرهای مستقل افزایش می‌یابد، معیار مناسبی جهت بیان میزان تأثیر متغیرهای مستقل بر متغیرهای وابسته نیست؛ بنابراین از معیار دیگری با عنوان ضریب تعیین اصلاح‌شده یا Adjusted (R-Square) استفاده شده است. رابطه (۱۴) نحوه محاسبه این معیار را نشان می‌دهد. (رابطه ۱۴)

$$(R - Square)_{Adjusted} = 1 - \frac{(1 - R^2)(n - 1)}{n - p - 1}$$

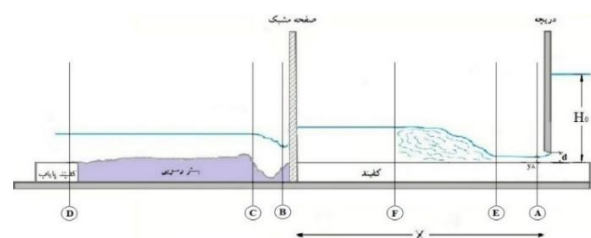
در این رابطه: p : نشان‌دهنده تعداد متغیرهای مستقل بدون در نظر گرفتن ثوابت در تابع برازش شده است. معیار RMSE یا خطای استاندارد، بیانگر انحراف استاندارد یک عضو دلخواه از داده‌های مورد مطالعه می‌باشد. مقدار نزدیک به صفر آن نشان‌دهنده پیش‌بینی قابل قبول تابع برازش شده خواهد بود. نحوه محاسبه این معیار مطابق رابطه (۱۵) می‌باشد.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y}_i)^2}{n}} \quad (\text{رابطه ۱۵})$$

نتایج و بحث

مشاهدات آزمایشگاهی

در این مطالعه، با توجه به فاصله ثابت قرارگیری صفحه مشبک از دریچه کشویی و نسبت روزنه و ضخامت صفحات، دو نوع رفتاری قبل از صفحه مشبک مشاهده می‌گردد که عبارتند از پرش هیدرولیکی آزاد و پرش هیدرولیکی مستغرق. در شکل (۴ و ۵) رفتار جریان بعد از دریچه و صفحات مشبک با توجه به بستر متحرک ارائه شده است.



شکل ۴- پرش هیدرولیکی آزاد و جریان بعد از صفحه مشبک

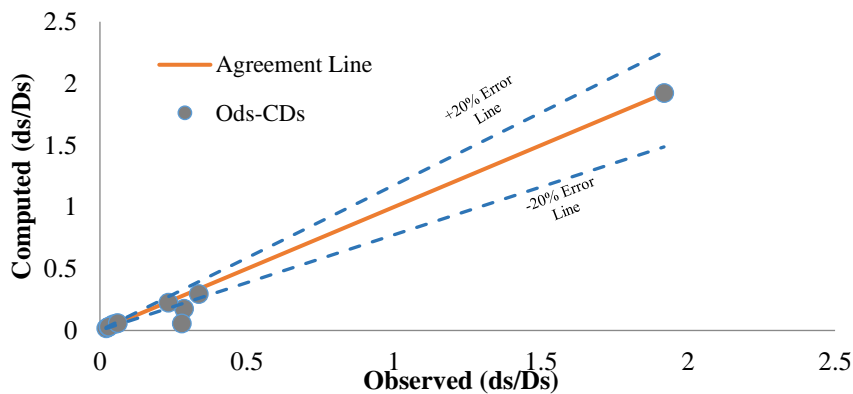
(۶) و (۷) ارائه شده است. نمودارها برای ۳۰ درصد داده‌های آزمایشگاهی به صورت خطی برازش شده‌اند. برای نشان دادن عملکرد مدل استفاده شده، یک خط ۴۵ درجه و دو خط با خطای ۲۰٪+ و ۲۰٪- در نمودارها برای نشان دادن پراکندگی داده‌ها و فاصله آنها از خط ۴۵ درجه رسم شده است. هرچه نقاط به خط ۴۵ درجه نزدیک‌تر باشد نشان‌دهنده عملکرد خوب مدل‌سازی می‌باشد.

برای بررسی کفایت نمودارهای برازش شده، از ۴ معیار ضریب تعیین، ضریب تعیین اصلاح شده، مجموع مربعات خطا و خطای استاندارد استفاده شده است که نحوه محاسبه در بخش قبل ذکر گردید. مقادیر معیارهای برازشی برای پارامترهای $\frac{d_s}{L_s}$ و $\frac{d_s}{D_s}$ در جدول (۲) ارائه شده است.

آبشستگی دارد. همین‌طور در رابطه (۲۰)، نسبت روزنه صفحه مشبک n با توان نزدیک به صفر کمترین تأثیر را نسبت به طول حفره آبشستگی داشته است. خطای نسبی برای حداکثر عمق آبشستگی و طول حفره آبشستگی به ترتیب ۲۷/۷۹٪ و ۲۳/۷۹٪ محاسبه شده است. قابل ذکر است که پس از انجام محاسبات، نتیجه‌گیری گردید که پارامتر رینولدز برشی ذره Re_* در رابطه (۲۰) دارای توان بسیار کوچکی می‌باشد که در قیاس با بقیه پارامترها قابل صرف‌نظر کردن است لذا از رابطه نهائی حذف گردید.

بررسی تطابق داده‌های آزمایشگاهی و محاسباتی

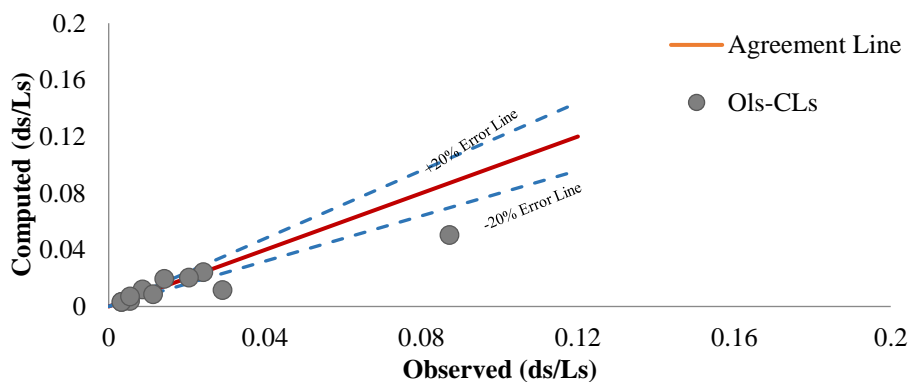
برای بررسی میزان ارتباط داده‌های مشاهداتی و محاسباتی برای هر دو نسبت $\frac{d_s}{L_s}$ و $\frac{d_s}{D_s}$ نمودارهای برازش شده به ترتیب در شکل‌های



شکل ۰۶- نمودار برازش شده برای ۳۰٪ داده‌های مشاهداتی و محاسباتی حداکثر عمق آبشستگی

مطابق شکل (۶)، ۶۳/۳ درصد از داده‌ها در محدوده خطای ۲۰ درصد قرار گرفته‌اند و ضریب تعیین بدست آمده از پیش‌بینی داده‌های مورد انتظار با توجه به مقادیر داده‌های مشاهداتی نشان‌دهنده ارتباط نسبتاً خطی میان داده‌های مشاهداتی و داده‌های محاسباتی است. با توجه به مقیاس کوچک اعداد در این شکل، ضریب تعیین بدست آمده منطقی می‌باشد.

با در نظر گرفتن نمودار نشان داده شده در این شکل، ۸۱ درصد از داده‌ها در محدوده خطای ۲۰ درصد قرار دارند. همین‌طور با توجه به ضریب تعیین بدست آمده از پیش‌بینی داده‌های مورد انتظار مقدار ۰/۹۸۳ نشان دهنده ارتباط خطی داده‌های مشاهداتی و مورد انتظار می‌باشد. با توجه به پراکنده بودن داده‌ها در نمودار، ضریب تعیین بدست آمده به دلیل کوچک بودن مقیاس محورهای افقی و قائم منطقی به نظر می‌رسد.



شکل ۰۷- نمودار برازش شده برای ۳۰٪ داده‌های مشاهداتی و محاسباتی طول حفره آبشستگی

جدول ۲- معیارهای کیفیت برازش برای پارامترهای $\frac{d_s}{L_s}$ و $\frac{d_s}{D_s}$

معیارهای کیفیت توابع برازشی					
پارامتر	درصد خطای نسبی	R-square	Adjusted R-square	RMSE(%)	SSE
حداکثر عمق آبشستگی	۲۷/۷۹	۰/۹۸۳	۰/۹۸۲	۷/۴	۰/۰۵۰۱
طول حفره آبشستگی	۲۳/۷۹	۰/۸۷۳	۰/۸۵۹	۰/۵	۰/۰۰۰۲

توجه به اختلاف بسیار کم مقادیر حداکثر عمق حفره آبشستگی در مواردی روند کاهشی مشاهده می‌گردد (دبی ۴۵۰ لیتر بر دقیقه برای ذره ۲/۶ میلی‌متر در شکل الف و دبی ۳۰۰ لیتر بر دقیقه برای ذره ۱/۸ میلی‌متر در شکل ب). با افزایش نسبت روزنه به دلیل افزایش استهلاک انرژی جریان ناشی از افزایش آشفتگی و کاهش ارتفاع آب در پشت صفحه مشبک و در نتیجه کاهش سرعت جریان، حداکثر عمق آبشستگی کمتر شده است. با توجه به عدم حرکت ذرات با اندازه ۵/۲ میلی‌متر در دبی‌های ۱۵۰، ۳۰۰ و ۳۷۵ لیتر بر دقیقه، میزان آبشستگی در این دبی‌ها صفر گزارش شده است؛ بنابراین ستون‌های مربوط به ذره ۵/۲ میلی‌متر برای دبی‌های مذکور در هر دو نمودار صفر می‌باشد. در ترسیم نمودارهای (۸ تا ۱۱) مقادیر عمق آبشستگی با استفاده از حداکثر مقدار مشاهده‌شده در آزمایش‌ها و مقادیر طول آبشستگی با استفاده از حداکثر طول مشاهده‌شده در آزمایش‌ها بی بعد گردیدند.

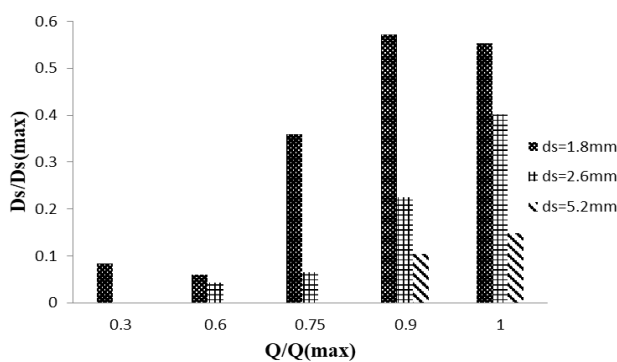
مقایسه نمودارهای طول حفره آبشستگی اسکرین‌های ۴۰٪ و ۵۰٪ (تاثیر نسبت روزنه صفحه مشبک روی آبشستگی) مطابق شکل (۹)، طول حفره آبشستگی ذرات ۱/۸، ۲/۶ و ۵/۲ میلی‌متر نسبت به دبی برای دو صفحه مشبک با نسبت روزنه ۴۰٪ و ۵۰٪ نشان داده شده است.

مقادیر نزدیک به یک برای ضریب تعیین اصلاح‌شده و مقادیر نزدیک به صفر مجموع مربعات خطا و خطای استاندارد، نشان‌دهنده ارتباط نزدیک و نسبتاً خطی بین داده‌های محاسباتی و مشاهداتی برای هر دو پارامتر حداکثر عمق و طول حفره آبشستگی می‌باشد. نمودارهای برازش شده برای هر صفحه مشبک و جدول معیارهای کیفیت برازش نیز آمده است.

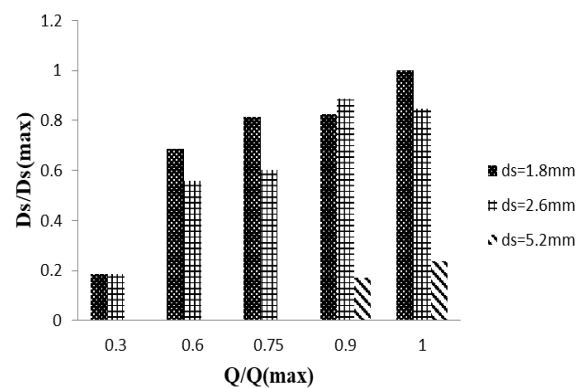
مقایسه روند آبشستگی صفحات مشبک‌ها نسبت به دبی با توجه به پراکندگی داده‌ها و همین‌طور گویا بودن نمودار ستونی در مورد این داده‌ها، برای بررسی میزان تغییرات حداکثر عمق آبشستگی و طول حفره آبشستگی نسبت به دبی از نمودار ستونی استفاده شده است.

مطابق شکل (۸)، حداکثر عمق آبشستگی ذرات ۱/۸، ۲/۶ و ۵/۲ میلی‌متر نسبت به دبی برای دو صفحه مشبک با نسبت روزنه ۴۰٪ و ۵۰٪ نشان داده شده است.

مطابق نمودارهای ارائه‌شده، با افزایش دبی میزان حداکثر عمق آبشستگی برای هر سه ذره روند افزایشی دارد. همین‌طور با افزایش اندازه ذرات تنش برشی بستر کاهش یافته و آشفتگی جریان افزایش می‌یابد. با افزایش آشفتگی، جریان‌های برگشتی تولیدشده به‌صورت نیروهای مقاوم در برابر حرکت ذره به پایین- دست بستر عمل می‌کنند. در نتیجه آبشستگی کاهش می‌یابد. با

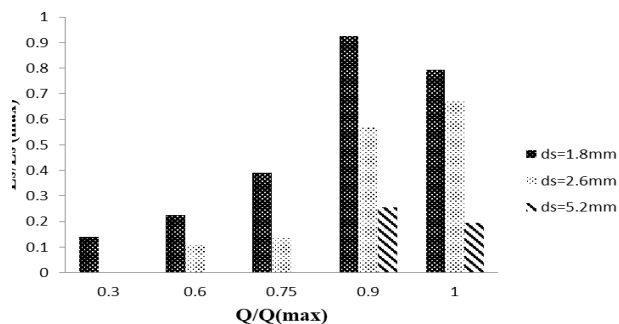


(ب)

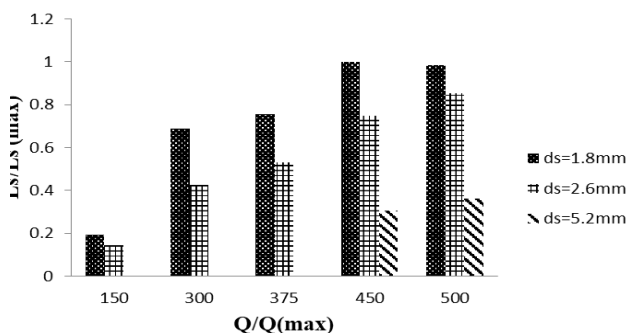


(الف)

شکل ۸- نمودار ستونی حداکثر عمق آبشستگی. الف- صفحه مشبک با نسبت روزنه ۴۰٪ ب- صفحه مشبک با نسبت روزنه ۵۰٪



(ب)

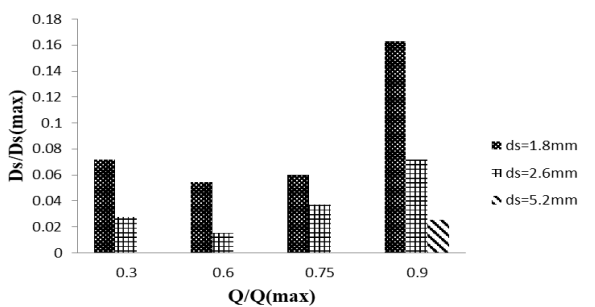


(الف)

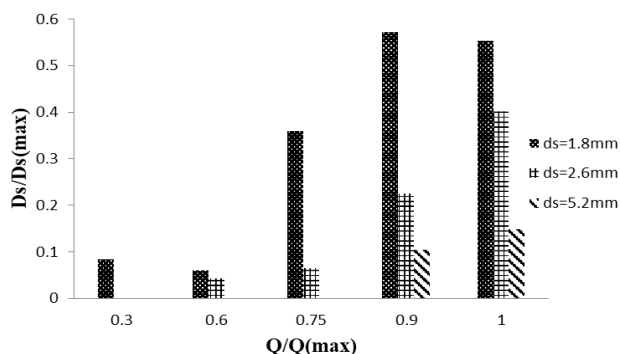
شکل ۹- الف- نمودار ستونی طول حفره آبشستگی. الف- صفحه مشبک با نسبت روزنه ۰.۴۰٪ ب- صفحه مشبک با نسبت روزنه ۰.۵۰٪

مربوط به این دبی‌ها میزان آبشستگی صفر گزارش شده است. مقایسه نمودارهای حداکثر عمق آبشستگی و طول حفره آبشستگی صفحات مشبک ۰.۵۰٪ و ۰.۵۰٪ (تأثیر ضخامت صفحه مشبک روی آبشستگی) مطابق شکل‌های (۱۰) و (۱۱)، به ترتیب نسبت حداکثر عمق آبشستگی و نسبت طول حفره آبشستگی ذرات ۱/۸، ۲/۶ و ۵/۲ میلی‌متر به نسبت دبی برای دو صفحه مشبک با نسبت روزنه ۰.۵۰٪ و ۰.۵۰٪ (تأثیر ضخامت صفحه مشبک روی آبشستگی) دو برابر نشان داده شده است.

مطابق نمودارهای ارائه شده، با افزایش نسبت دبی میزان نسبت طول حفره آبشستگی برای هر سه ذره روند افزایشی دارد. با افزایش نسبت روزنه مطابق آنچه که برای حداکثر عمق آبشستگی رخ می‌دهد، به دلیل افزایش استهلاک انرژی جریان ناشی از افزایش آشفتگی و کاهش ارتفاع آب در پشت صفحه مشبک و در نتیجه کاهش سرعت جریان، حداکثر عمق آبشستگی کمتر شده است. با توجه به عدم حرکت ذرات با اندازه ۵/۲ میلی-متر در دبی‌های ۱۵۰، ۳۰۰ و ۳۷۵ لیتر بر دقیقه، برای ستون‌های

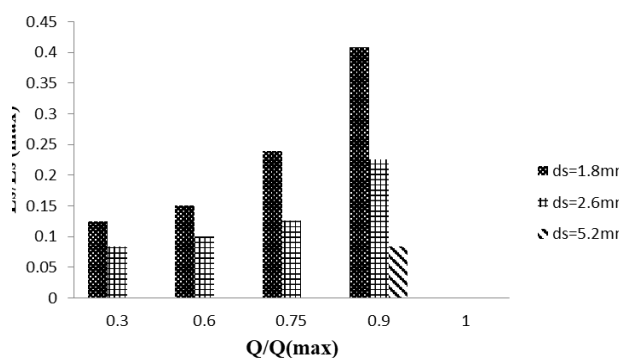


(ب)

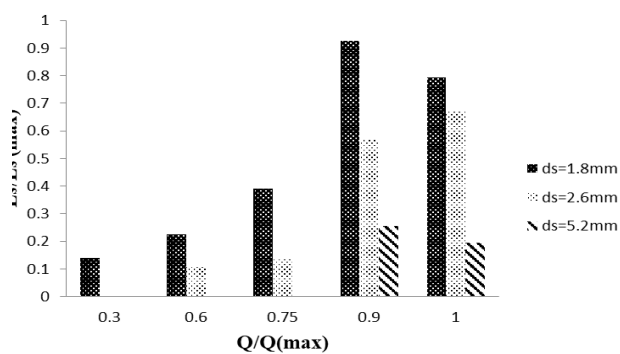


(الف)

شکل ۱۰- نمودار ستونی نسبت حداکثر عمق آبشستگی. الف- صفحه مشبک با نسبت روزنه ۰.۵۰٪ ب- صفحه مشبک با نسبت روزنه ۰.۵۰٪



(ب)



(الف)

شکل ۱۱- نمودار ستونی نسبت طول حفره آبشستگی. الف- صفحه مشبک با نسبت روزنه ۰.۵۰٪ ب- صفحه مشبک با نسبت روزنه ۰.۵۰٪

آوردن رسوبات و حمل آنها تأثیر بسزایی داشته است. به عبارت بهتر در صفحه مشبک با درصد روزنه ۰.۴٪، به دلیل کمتر شدن تعداد روزنه‌ها در صفحه و به نوعی کاهش سطح مقطع عبور جریان آب، سرعت جریان هنگام عبور از صفحه بیشتر شده و این افزایش سرعت حرکت رسوبات را بیشتر و مقادیر آبستنگی را بزرگتر کرده است. از طرفی شاید اینگونه به نظر برسد که به تبع افزایش سرعت، عدد فرود در مقطع B نیز باید روند افزایشی داشته باشد، اما با توجه به مشاهدات آزمایشگاهی و همچنین افزایش مقادیر آبستنگی، عمق جریان نیز در این مقطع افزایش یافته و با توجه به رابطه $(Fr_B = \frac{V_B}{\sqrt{gY_B}})$ عدد فرود تغییر

چندانی نداشته و در محدوده حدوداً ۲ الی ۳ باقی مانده است. حداقل مقادیر آبستنگی نیز با توجه به نمودار مربوط به صفحه مشبک درصد روزنه ۰.۵٪ دو برابر می‌باشد. برعکس آنچه در فوق ذکر شد جریان در مواجهه با این نوع از صفحه به دلیل افزایش سطح مقطع و کاهش سرعت جریان، حالت ریزشی داشته و لذا قدرت لازم برای به حرکت در آوردن رسوبات و حمل آنها را نداشته است. همین امر موجب حصول حفره آبستنگی کوچکتری در این صفحه شده است.

در رابطه با صفحه مشبک ۰.۴٪ دو برابر می‌توان گفت که به مقدار جزیی عمق آبستنگی کمتری را نسبت به صفحه مشبک ۰.۴٪ داراست. همین امر باعث کاهش در عمق جریان در مقطع B شده است که به ازای دبی ثابت افزایش جزیی در مقدار عدد فرود این نوع صفحه مشبک نسبت به صفحه مشبک ۰.۴٪ دیده شده و عدد فرود در محدوده عدد ۳ قرار گرفته است.

میزان حداکثر طول آبستنگی با افزایش نسبت روزنه و ضخامت صفحه مشبک روند کاهشی دارد. بیشترین طول‌های آبستنگی در صفحه مشبک ۰.۴٪ برای تمام اندازه ذرات اتفاق افتاده است. بیشترین طول آبستنگی در مجموع ۳۸ آزمایش انجام شده، در صفحه مشبک ۰.۴٪ برای ذره با اندازه ۱/۸ میلی‌متر با طول ۰/۷۰۷۸۱۸ متر و کمترین طول آبستنگی در صفحه مشبک ۰.۵٪ دو برابر برای ذره با اندازه ۲/۶ میلی‌متر با طول ۰/۲۰۶۱۵ متر ثبت شد.

مقایسه زمانی پیشرفت آبستنگی

در طول انجام آزمایش‌ها، اندازه‌گیری‌ها و تصویربرداری برای هر آزمایش در دوره‌های زمانی متفاوت با در نظر گرفتن تغییرات حفره آبستنگی انجام گرفته است. با توجه به اینکه تغییرات قابل توجه در مقادیر حفره آبستنگی در ۵ دقیقه ابتدایی رخ داده است، پروفیل‌های آبستنگی دقیق ۱، ۳ و ۵ ابتدایی برای تمامی

مطابق نمودارهای ارائه شده، با افزایش نسبت دبی، میزان نسبت بی‌بعد حداکثر عمق آبستنگی و همین‌طور نسبت بی‌بعد طول حفره آبستنگی برای هر سه ذره روند افزایشی دارد. به دلیل وجود خطا در آزمایش‌ها با توجه به اختلاف بسیار کم مقادیر حداکثر عمق و طول حفره آبستنگی در مواردی روند کاهشی مشاهده می‌گردد. با افزایش ضخامت صفحه مشبک، مقادیر اندازه‌گیری شده‌ی ارتفاع آب پشت صفحه مشبک نشان‌دهنده کاهش ارتفاع آب پشت صفحه مشبک با ضخامت ۲ سانتی‌متر (صفحه مشبک دو برابر) در مقایسه با صفحه مشبک با ضخامت ۱ سانتی‌متر می‌باشد. در نتیجه با کاهش سرعت جریان مقادیر حفره آبستنگی نیز روند کاهشی دارد. با توجه به عدم حرکت ذرات با اندازه ۵/۲ میلی‌متر در دبی‌های ۱۵۰، ۳۰۰ و ۳۷۵ لیتر بر دقیقه، میزان آبستنگی برای تمامی موارد صفر گزارش شده است.

بررسی روابط حداکثر عمق و طول حفره آبستنگی با پارامترهای مؤثر

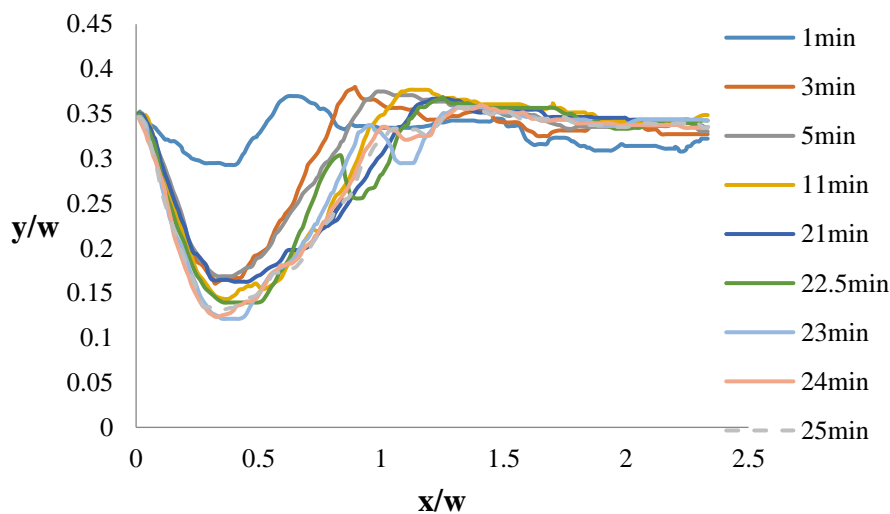
با توجه به شکل‌های فوق مشاهده می‌گردد که با افزایش در عدد فرود زیر دریچه روند افزایشی در مقادیر حفره آبستنگی بعد از صفحه مشبک دیده می‌شود. از آنجایی که با افزایش اندازه ذرات، D_s کاهش پیدا می‌کند، بنابراین با افزایش عدد فرود زیر دریچه و در نتیجه افزایش D_s ، نسبت $\frac{d_s}{D_s}$ کاهش یافته است. این شرایط برای کسر بی‌بعد $\frac{d_s}{L_s}$ نیز صادق است. به ازای عدد فرود ثابت، حداکثر مقادیر آبستنگی در صفحه مشبک با درصد روزنه ۰.۴٪ و حداقل مقدار آن در صفحه مشبک ۰.۵٪ دو برابر دیده می‌شود. می‌توان گفت که با ثابت در نظر گرفتن عدد فرود، افزایش نسبت روزنه و ضخامت صفحه مشبک با افزایش آشفتگی و کاهش سرعت جریان، افزایش استهلاک انرژی جریان و کاهش آبستنگی را در پی دارد.

مشاهده شد که در حالت کلی در صفحه مشبک با درصد روزنه ۰.۴٪ حفره آبستنگی بزرگتری نسبت به صفحه مشبک با درصد روزنه ۰.۵٪ ایجاد شده است. همچنین روند مشخصی در مقدار آبستنگی با تغییرات عدد فرود مقطع B مشاهده نمی‌شود. عدد فرود در محدوده بین ۲/۶ تا ۳/۶ قرار گرفته و با افزایش اندازه ذره رسوبی روند کاهشی در مقادیر حفره آبستنگی دیده شده است.

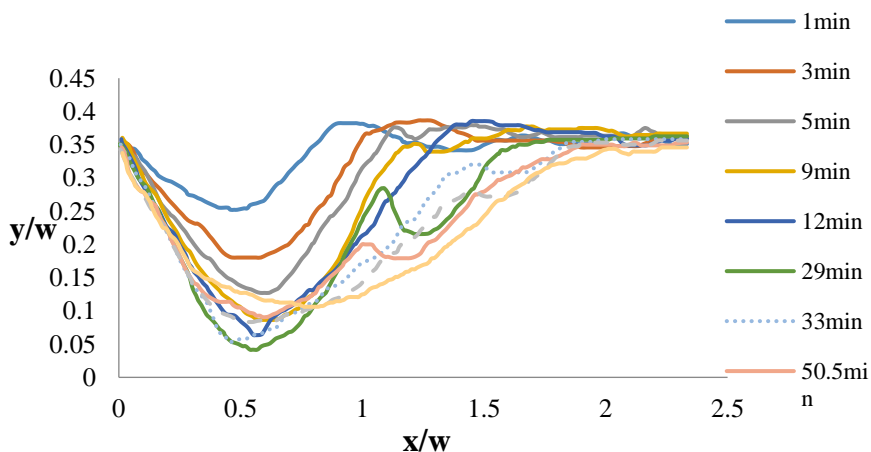
با این حال می‌توان گفت که حداکثر عمق و طول حفره آبستنگی (که با کاهش کسرهای بی‌بعد $\frac{d_s}{L_s}$ و $\frac{d_s}{D_s}$ در شکل قابل مشاهده است)، در تک صفحه مشبک با درصد روزنه ۰.۴٪ رخ داده است. دلیل این امر را به این صورت می‌توان توضیح داد که جریان در مواجهه و هنگام عبور از این صفحه مشبک حالت پرتابی داشته و جریان آشفته‌تری بوجود می‌آورد که این امر در به حرکت در

۴۵۰ لیتر بر دقیقه را نشان می‌دهد. مطابق این شکل‌ها، مشاهده می‌گردد که با افزایش دبی، تغییرات در مقادیر پروفیل حفره آبشستگی در دقایق اولیه آزمایش به دلیل افزایش سرعت جریان و افزایش تنش برشی با توجه به کم بودن فاصله ذرات رسوبی با جریان خروجی از صفحه مشبک شدت یافته و عمق و طول حفره آبشستگی افزایش می‌یابد. همین‌طور با افزایش دبی جریان، مدت زمان آزمایش با توجه به عدم مقاومت ذرات رسوبی ناحیه آبشستگی در برابر تغییرات جریان و در نتیجه تداوم حرکت ذرات، افزایش یافته است.

نمودارها رسم گردید. پروفیل آبشستگی همین‌طور برای دقیقه انتهایی هر آزمایش و نیز برای زمان‌هایی که تغییرات شدید و ناگهانی در مقادیر حفره آبشستگی مشاهده گردیده، رسم شده است. لازم به ذکر است که تغییرات ناگهانی در مقادیر حفره، فقط در آزمایش‌های مربوط به صفحه مشبک ۴۰٪ مشاهده شده است. بررسی نمودارهای مقایسه زمانی توسعه آبشستگی با ثابت در نظر گرفتن نسبت روزنه و اندازه ذره شکل‌های (۱۲) و (۱۳) پروفیل آبشستگی برای صفحه مشبک با نسبت روزنه ۴۰٪ و ذره با اندازه ۱/۸ میلی‌متر در دو دبی ۳۰۰ و



شکل ۱۲- نمودار پروفیل آبشستگی برای ذره با اندازه ۱/۸ میلی‌متر و دبی ۳۰۰ لیتر بر دقیقه (صفحه مشبک ۴۰٪)



شکل ۱۳- نمودار پروفیل آبشستگی برای ذره با اندازه ۱/۸ میلی‌متر و دبی ۴۵۰ لیتر بر دقیقه (صفحه مشبک ۴۰٪)

عمق حفره دوباره الگوی جریان تغییر پیدا کرده و رسوبات به پایین دست منتقل می‌شوند. این سیکل تا زمانی که عمق و طول حفره آبشستگی تأثیری در الگوی جریان نداشته باشند ادامه می‌یابد. مطابق شکل‌های ارائه شده مشاهده می‌گردد که با افزایش دبی، تعداد تغییرات ناگهانی و فواصل زمانی بین آنها افزایش یافته است.

از آنجایی که مقادیر حفره آبشستگی با گذشت زمان تغییر می‌کند، این تغییرات روی الگوی جریان بعد از صفحه مشبک مؤثر بوده است بطوری‌که در زمان‌های با فواصل متغیر باعث تغییرات ناگهانی در پروفیل حفره آبشستگی شده و توسط جریان‌های برگشتی رسوبات پایین دست را به قسمت بالادست انتقال می‌دهد. با افزایش

بررسی مقدار عدد فرود زیر دریچه نشان می‌دهد با افزایش در عدد فرود زیر دریچه روند افزایشی در مقادیر حفره آبستنگی بعد از صفحه مشبک دیده می‌شود.

با افزایش عمق جریان در مقطع B در تمامی صفحات مشبک روند کاهشی در نسبت‌های بی‌بعد $\frac{d_s}{L_s}$ و $\frac{d_s}{D_s}$ و در نتیجه رابطه مستقیم با تغییرات حداکثر عمق و طول حفره آبستنگی مشاهده شده است.

با افزایش طول پرش قبل از صفحه مشبک، روند کاهشی در کسرهای بی‌بعد $\frac{d_s}{L_s}$ و $\frac{d_s}{D_s}$ و در نتیجه روند افزایشی در مقدار عمق طول حفره آبستنگی رخ داده است. همچنین به ازای یک مقدار ثابت از طول پرش، مقدار حداکثر عمق و طول حفره آبستنگی در صفحه مشبک ۴۰٪ و حداقل مقدار آن در صفحه مشبک ۵۰٪ اتفاق افتاده است.

روابط تئوری به دست آمده با توجه به ضرایب و توان‌های هر یک از پارامترها، عدد رینولدز برشی ذره Re^* برای نسبت بدون بعد $\frac{d_s}{D_s}$ و نسبت روزنه n برای نسبت بدون بعد $\frac{d_s}{L_s}$ کمترین تاثیر را نشان داده است.

REFERENCES

- Aslankara, V. (2007). Experimental investigation of tail Water Effect On The Energy Dissipation Through screens, *MSc Thesis Department of Civil Engineering, Middle East Technical University, Ankara, Turkey*.
- Baines, W. D. and Peterson, E. G. (1950). An investigation of flow through screens, *American Society of Mechanical Engineers*.
- Balkis, G. (2004). Experimental investigation of energy dissipation through inclined screens, *MSc Thesis Department of Civil engineering, Middle East Technical University, Ankara, Turkey*.
- Bestawy, A. (2013). New shapes of baffle piers used in stilling basins as energy dissipators. *Asian Transactions on Engineering (ATE)*, 3 (1), 1-7.
- Cakir, P. (2003). Experimental investigation of energy dissipation through screens, *MSc Thesis Department of Civil engineering, Middle East Technical University, Ankara, Turkey*.
- Castro-Orgaz O. H. Hager, W. (2011). Observations on undular hydraulic jump in movable bed. *Journal of Hydraulic Research*, 49(5), 689-692.
- Daneshfaraz, R., Sadeghfam, S., and Ghahramanzadeh, A. (2017a). Three-dimensional numerical investigation of flow through screens as energy dissipators, *Canadian Journal of Civil Engineering*, 44(10), 850-859.
- Daneshfaraz, R., Sadeghfam, S. and Rezazadeh Joudi, A. (2017b). Experimental investigation on the effect of screen's location on the flow's energy dissipation, *Irrigation and Drainage Structures Engineering Research*, 17 (67), 47-62. (In Farsi)
- Hamidifar, H. and Omid M. H. (2010). Noncohesive sediment scour downstream of an apron, *Journal of Agricultural Engineering Research*, 11 (2), 17-28.

خلاصه، نتیجه‌گیری و ارائه پیشنهادها

با مقایسه نمودارهای رسم شده برای پارامترهای مؤثر در آبستنگی ناشی از انرژی مستهلک‌شده توسط صفحه مشبک با نسبت روزنه‌های مختلف، نمودارهای پیشرفت زمانی حفره آبستنگی و همین‌طور توابع آماری برازش شده نتایج زیر بدست آمده است:

بیشترین عمق و طول آبستنگی در صفحه مشبک ۴۰٪ رخ داده است. این مقادیر با افزایش ضخامت و نسبت روزنه کاهش می‌یابد. بطوری‌که کمترین عمق و طول آبستنگی در صفحه مشبک ۵۰٪ دوپل اتفاق افتاده است.

ضخامت و نسبت روزنه صفحه مشبک در مدت زمان توسعه حفره آبستنگی مؤثر است. بطوری‌که با افزایش مقادیر پارامترهای مذکور، کاهش مدت زمان و کاهش در میزان و فواصل زمانی تغییرات ناگهانی در مقادیر حفره آبستنگی مشاهده شده است.

با افزایش اندازه ذرات رسوبی عمق و طول حفره آبستنگی نیز کاهش می‌یابد.

Holtz, R. and Kovacs, W. (1981). An introduction to geotechnical engineering, Prentice-Hall, Inc. ISBN 0-13-484394-0.

Kells, J. A. Balachandar, R. and Hager, K. P. (2001). Effect of grain size on local channel scour below a sluice gate, *Department of Civil Engineering, University of Saskatchewan, 57 Campus Drive, Saskatoon, SK S7N 5A9, Canada*.

Mohamed Ali, H. Mohamed El, G. M. Mohamed Hassan, M. A. Mohamed Ali, A. and Abdelhaleem, F. S. F. (2014). Minimizing downstream scour due to submerged hydraulic jump using corrugated aprons. *Ain Shams Engineering Journal*, 5(4), 1059-1069.

Parvini, S., Abbaspour, A. and Hoseinzade dalir, A. (2016). Experimental investigation on the effect of buried plates to control downstream scour of hydraulic jump in Horizontal beds, *Water and Soil Science*, 25 (4), 231-241. (in Farsi)

Rajaratnam, N. and Hurtig, K. I. (2000). Screen-Type energy dissipater for hydraulic structures, *Journal of Hydraulic Engineering*, 126(4), 310-312.

Sadegfam, S., Akhtari, A. K., Daneshfaraz, R. and Gokmen, T. (2015). Experimental investigation of screens as energy dissipaters in submerged hydraulic jump, *Turkish Journal of Engineering and Environmental Sciences*, 38(2), 126 – 138.

Sadegfam, 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*, doi/10.2166/hydro.2019.076.

Yeh, H. H. and Shrestha, M. (1989). Free surface flow through screen, *Journal of Hydraulic Engineering*, 115(10), 1371-1385.