

**EXTENDED ABSTRACT**

**Investigating the causes of scouring downstream of stilling basin of Shohada diversion dam and proposing suitable solutions to control it**

M. Vahidi Alvar<sup>1</sup>, S.A. Asghari Pari<sup>2\*</sup>, M. Shafai Bajestan<sup>3</sup> and N. Arman

- 1- M. Sc. Student of Water and Hydraulic Structures, Behbahan Khatam Alanbia University of Technology.
- 2\* - Corresponding Author, Associate Professor, Faculty of Engineering, Behbahan Khatam Alanbia University of Technology. (*asghari\_amin@bkatu.ac.ir*).
- 3 - Professor, Faculty of Water Sciences Engineering, Shahid Chamran University of Ahvaz.
- 4- Assistant Professor, Faculty of Natural Resources, Behbahan Khatam Alanbia University of Technology.

Received: 17 May 2017

Revised: 4 October 2017

Accepted: 8 October 2017

**Keywords:** Physical model, the threshold of motion, jump length, The Maroun River.

**DOI:** 10.22055/jise.2017.22138.1587.

**Introduction**

Shohada diversion dam was constructed on the border of agricultural lands of Behbahan plain (Khuzestan province, Iran) to divert the water of the Maroun River. This dam has a concrete-soil composite. The concrete part consists of an ogee spillway, a stilling basin, and two intake channels and sediments on the right and left sides. The height of the dam is 12.2 meters and its spillway length is 150 meters. The dam has a sloping basin and its capacity is 22 m<sup>3</sup>/sec. The longitudinal slope of this basin is 1 to 5 (vertical: horizon). The studies have shown that parts of downstream of the stilling basin are being eroded and scoured. Unless controlled properly, this will continue and might lead to the destruction of the basin or the main structure of the dam. Most of the stilling or apron basins used in the previous studies are horizontal and smooth, and no research has been conducted on scouring downstream of sloping basins so far. Therefore, the purpose of this research is to explore the causes of scouring downstream of the Shohada dam's stilling basin and its controlling factors to finally provide an appropriate strategy to prevent its spread.

**Methodology**

Considering the Froude similarity principle, the modeling scale was considered equivalent to  $L_r = 40$ . Maximum design discharge for the model is 16.6 liters per second and the overall height is 25.29 centimeters. In this study, 16 experiments were performed in two groups. The purpose of the first group of experiments was to find out the causes of scouring and the factors affecting it. The second group of experiments examined the ways to reduce scouring and ultimately provide the best solution. In the first group, 3 experiments were carried out with a discharge equal to the maximum design flow rate, two thirds of the design discharge and one third of the design discharge, respectively. Also, four tests for maximum discharge of the design were performed in which the normal depth for this discharge decreased by 10% and 20%, respectively, and then the same values were increased. In the second group, the effect of Rip-rap and slope correction of downstream has been analyzed: 3 different diameters of Rip-rap with 3 different thicknesses were investigated. The experiments were conducted in a 10-meters long flume, 0.3 m wide and 0.75 m high at 2.5 m after inlet and 0.45 m until outlet of flume. The bottom of the stilling basin contained sedimentary

materials of uniform sand with a diameter of 0.4 mm and a length of three meters as a bedding material. The height of the material is 10 cm in the first 25 cm of inlet and it reaches a height of 25 cm, with a gradient of one to five, reaching to 15 cm. In the remaining 2.5 meters, the material keeps a height of 15 cm. Then, to the end of the flume, a constant bed was formed at a height of 15 cm that was used for coating on a mixture of glue and sedimentary materials. Running time of all tests was considered to be 6 hours. Sediment bed topography was measured in a  $5 \times 5$  cm grid by laser meter with a precision of one millimeter. During the test, hydraulic jump characteristics such as jump length, roller length and conjugate depths were recorded. The length of the hydraulic jump and the roller lengths were measured by meter with an accuracy of 1 mm through observing the air bubbles and conjugate depths of 0.1 mm precision.

### Conclusion

In this research, the scouring downstream of stilling basin of Shohada diversion dam was studied using a physical model. The previous studies (Dez Ab, 2003) also reported scouring downstream of stilling basin of this diversion dam. The results of the experimental model showed that due to the slope of the sedimentary bed, after a flow of currents into this part of the bed, a vortex flow was created, which caused the sedimentation to occur at the end of the sedimentation basin, and immediately after the basin, the scouring hole was formed and the depth of the cavity reached its maximum at a short distance from the bottom of the basin. With the distance from the bottom of the basin, the depth of the scour hole is reduced. Based on laboratory results, the reason for scouring in the bottom of the sediment pool is the short length of the stilling basin and higher local flow velocity in the downstream jump of the bed velocity threshold. As in all experiments in this research, the length of the hydraulic jump has been longer than the stilling basin and is part of the jump outside the basin. Similar to the results of Shafai- Bajeatan and Omid (2016), by increasing the discharge rate and increasing the length of the hydraulic jump for a constant discharge, the scour hole dimensions have increased. Also, increasing the depth of 20% reduces the maximum depth of the scour hole to 41% and the longitudinal extension to 70%. Slope modification of the materials at the bottom of the stilling basin decreases the power of vortex currents caused by this slope, thus reducing the power of the cutter in this area and the average scour to 46%. It was recognized that application of Rip-rap as a protective layer for bed is a functional solution to reduce scouring with an average of 83 percent. In other words, Rip-rap coatings have improved performance in reducing scour. Ultimately, the use of Rip-rap with an average diameter of 20 cm (equivalent to 5 mm in the laboratory) is proposed to control the scouring downstream of the stilling basin of Shohada diversion dam.

### Acknowledgment

This work has been supported by the office of applied research at Khuzestan Water and Power Authority.

### References

- 1- Dezab Consulting Engineering Company Report No 2004286, 2003. Calibration of Irrigation gates of Shohada and Jayzan diversion dams. (In Persian).
- 2- Shafai-Bajestan, M., Omid, S. 2016. Investigation of Scour Depth Downstream of Stilling Basin for the Case of B-Jump. *Irrigation Sciences and Engineering*, 38(4), 125-136. (In Persian).



© 2020 by the authors. Licensee SCU, Ahvaz, Iran. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0 license) (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).



## بررسی علل بروز آب‌شستگی در پایین دست حوضچه آرامش سد انحرافی شهدا و ارایه راه کار مناسب برای کنترل آن

مهديه وحیدی الوار<sup>۱</sup>، سید امین اصغری پری<sup>۲\*</sup>، محمود شفاعی بجستان<sup>۳</sup> و نسیم آرمان<sup>۴</sup>

- ۱- دانشجوی کارشناسی ارشد آب و سازه‌های هیدرولیکی، دانشگاه صنعتی خاتم‌الانبیا (ص) بهبهان.  
 ۲- نویسنده مسئول - دانشیار گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه صنعتی خاتم‌الانبیا (ص) بهبهان. asghari\_amin@bkatu.ac.ir  
 ۳- استاد گروه سازه‌های آبی، دانشکده مهندسی علوم آب، دانشگاه شهید چمران اهواز.  
 ۴- استادیار، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه صنعتی خاتم‌الانبیا (ص) بهبهان.

پذیرش: ۱۳۹۶/۷/۱۶

بازنگری: ۱۳۹۶/۷/۱۲

دریافت: ۱۳۹۶/۲/۲۷

### چکیده

هدف اصلی این تحقیق، مطالعه دلایل تخریب پایین دست حوضچه آرامش سد انحرافی شهدا در استان خوزستان و ارایه راه کارهایی برای جلوگیری از گسترش آن می‌باشد. به همین منظور مدل فیزیکی - هیدرولیکی سد و حوضچه آرامش آن ساخته شده و آزمایش‌ها در دو سناریو انجام گرفت. در آزمایش‌های دسته اول، علت‌های ایجاد آب‌شستگی و عوامل مؤثر در آن و در دسته دوم راه کارهای کنترل آب‌شستگی بررسی شد. نتایج نشان داد کوتاه بودن طول حوضچه آرامش و بیش تر بودن سرعت محلی جریان در پایین دست حوضچه از سرعت آستانه حرکت ذرات بستر، علت‌های اصلی بروز آب‌شستگی می‌باشند. هم چنین مشخص شد با افزایش دبی و افزایش طول پرش هیدرولیکی برای یک دبی ثابت، میزان آب‌شستگی افزایش و با افزایش عمق پایاب، کاهش می‌یابد. اثر سنگ چین و کاهش شیب مصالح پایین دست حوضچه در کاهش میزان آب‌شستگی بررسی و مشخص شد استفاده از سنگ چین ۵ میلی متر (۲۰ سانتی متر در واقعیت) بهترین راه کار در کنترل آب‌شستگی است.

**کلید واژه‌ها:** مدل فیزیکی، آستانه حرکت، طول پرش، رودخانه مارون.

### مقدمه

سد شهدا به منظور انحراف آب رودخانه مارون، بر روی این رودخانه و در ابتدای اراضی کشاورزی دشت بهبهان احداث شده است. این سد از نوع مرکب بتنی - خاکی بوده که قسمت بتنی آن شامل سرریز از نوع اوجی و حوضچه آرامش، دو آبگیر و رسوبگیر در سواحل سمت راست و چپ می‌باشد. ارتفاع این سد ۱۲/۲ متر و طول سرریز آن ۱۵۰ متر می‌باشد. سد شهدا با ظرفیت آگیری ۲۲ مترمکعب بر ثانیه آب اراضی کشاورزی ساحل راست و چپ رودخانه مارون با وسعت ۱۳۵۰۰ هکتار را تأمین می‌کند.

حوضچه آرامش سد انحرافی شهدا از نوع شیب دار طراحی و ساخته شده است. شیب طولی این حوضچه ۱ به ۵ (قائم : افق) می‌باشد. بررسی‌های به عمل آمده نشان می‌دهد که بخش‌هایی از پایین دست این حوضچه آرامش دچار فرسایش و آب‌شستگی شده است و در صورتی که کنترل نشود، گسترش پیدا کرده و ممکن است موجب تخریب حوضچه یا سازه اصلی سد شود. با توجه به شرایط خاص این حوضچه (شیب دار بودن) و نبود تحقیق و

رابطه‌ای که بتوان از آن بهره جست، بررسی علل و چگونگی کنترل آب‌شستگی پیش آمده ضروری است.

حوضچه‌های آرامش متداول ترین نوع مستهلک کننده‌های انرژی جنبشی در پایین دست سازه‌های هیدرولیکی هستند و به طور معمول در پایین دست این مستهلک کننده‌ها آب‌شستگی به وجود می‌آید. محققان دلایل بسیاری را برای بروز این آب‌شستگی بیان کرده‌اند که از مهم ترین آن‌ها می‌توان به ناکافی بودن مقدار استهلاک انرژی در سازه، تشکیل پرش هیدرولیکی ناپایدار، انتقال پرش به خارج از بستر صلب حوضچه آرامش و به وجود آمدن جریان‌های گردابی در پایین دست سازه‌های هیدرولیکی اشاره کرد. اهمیت مسئله محققان بسیاری را بر این داشته که به بررسی موضوع آب‌شستگی در پایین دست حوضچه‌های آرامش بپردازند که بیش تر حوضچه‌هایی افقی با بستر صاف بوده‌اند.

Novak (1955, 1961) با بررسی آب‌شستگی در پایین دست حوضچه آرامش اظهار داشت که با استفاده از یک حوضچه آرامش با طول کافی که پرش هیدرولیکی را در برگیرد، عمق آب‌شستگی نسبت به حالت بدون استفاده از حوضچه آرامش

Dargahi (2003) به مطالعه آب شستگی پایین دست سرریز اوجی همراه با کفبند افقی پرداخت. در این آزمایش‌ها پرش روی بستر متحرک تشکیل شده و بیش‌تر شبیه یک موج متحرک بوده است که از انواع پرش کلاسیک محسوب می‌شود. او روابط زیر را برای تعیین حداکثر عمق آب شستگی در مرکز فلوام ارائه نمود:

$$\frac{y_s}{h_0} = 1.7 \left( \frac{h_0}{d_{50}} \right)^{1/4.5} \quad (۴)$$

$$\frac{x_s}{h_0} = 5 \left( \frac{h_0}{d_{50}} \right)^{1/3} \quad (۵)$$

در این روابط  $y_s$ : حداکثر عمق آب شستگی (m)،  $x_s$ : موقعیت حداکثر عمق آب شستگی از لبه انتهایی کفبند (m)،  $h_0$ : عمق آب روی سرریز (m) و  $d_{50}$ : قطر متوسط مصالح بستر (m) می‌باشد.

Sarkar و Dey (2006) آب شستگی رسوبات یکنواخت و غیریکنواخت در پایین دست کفبند افقی، ناشی از جت افقی مستغرق خروجی از زیر یک دریچه را بررسی کردند و رابطه زیر را برای تعیین عمق آب شستگی ارائه دادند:

$$\frac{y_s}{b} = 2.59 F_d^{0.94} \frac{l^{-0.37}}{b} \frac{y_t^{0.16}}{b} \frac{d_{50}^{0.25}}{b} \quad (۶)$$

در این رابطه  $b$ : میزان بازشدگی دریچه،  $L$ : طول سطح محافظت شده از دریچه تا انتهای کفبند،  $F_d$ : عدد فرود ذره و  $y_t$ : عمق پایاب است.

Hamidifar و Omid (2010) اثر اندازه دانه، عمق پایاب و عدد فرود را بر آب شستگی موضعی بستر پایین دست یک دریچه کشویی بررسی کردند و دریافتند که تأثیر عمق پایاب به میزان عدد فرود ذره بستگی دارد و رابطه زیر را برای پیش‌بینی نیم‌رخ آب شستگی ارائه کردند:

$$\frac{y}{y_{sm}} = -0.0008 \left( \frac{x}{y_{sm}} \right)^3 + 0.0342 \left( \frac{x}{y_{sm}} \right)^2 - 0.2859 \left( \frac{x}{y_{sm}} \right) - 0.3086 \quad (۷)$$

Shafai-Bajestan و Omid (2016) آب شستگی پایین دست حوضچه آرامش صلب را برای موقعیت‌های مختلف تشکیل پرش هیدرولیکی بررسی کردند. نتایج آن‌ها نشان داد که افزایش دبی، عمق و طول آب شستگی را افزایش می‌دهد. همچنین مشخص شد که حداکثر عمق و طول آب شستگی در پرش مستغرق کم‌تر از پرش هیدرولیکی آزاد است و با افزایش درجه استغراق پرش، از میزان آب شستگی کاسته می‌شود. Oliveto (2013) به تکامل زمانی و مکانی آب شستگی موضعی در پایین دست سرریزها با پیش‌بند افقی پرداخت.

حدود ۴۵ تا ۶۵ درصد کاهش می‌یابد. همچنین بیان نمود که کم‌ترین مقدار آب شستگی در حالتی رخ می‌دهد که پرش مستغرق بوده و  $y_t/y_{t \min} = 1.6$  باشد و بیش‌ترین مقدار آب شستگی در حالت  $y_t/y_{t \min} = 1$  رخ می‌دهد. در این جا  $y_t$  عمق پایاب و  $y_{t \min}$  کم‌ترین عمق پایاب مورد نیاز برای تشکیل پرش هیدرولیکی آزاد است. همچنین رابطه زیر را برای عمق آب شستگی در پایین دست حوضچه آرامش ارائه نمود:

$$y_s = 0.55 \left[ 6 H^{0.25} q^{0.5} \left( \frac{y_t}{d_{90}} \right)^{0.33} - y_t \right] \quad (۱)$$

که در این رابطه  $y_s$ : حداکثر عمق حفره فرسایش (m)،  $H$ : اختلاف تراز آب در بالادست و پایین دست (m)،  $y_t$ : عمق پایاب (m)،  $q$ : دبی واحد عرض ( $m^2/s$ ) و  $d_{90}$ : اندازه ذرات رسوب (mm) است.

Catakli et al. (1973) بر اساس مطالعات آزمایشگاهی روی یک سرریز با حوضچه آرامشی با طول  $5y_t$  رابطه زیر را برای حداکثر عمق آب شستگی پایین دست حوضچه آرامش ارائه داد:

$$y_s = 1.6 H_1^{0.2} q^{0.6} d_{90}^{-0.1} - y_t \quad (۲)$$

که در این رابطه  $H_1$ : اختلاف تراز آب بالادست از بستر اولیه (m)،  $q$ : دبی واحد عرض ( $m^2/s$ ) و  $d_{90}$ : اندازه ذرات رسوب (mm) می‌باشد.

Smith و Farhoodi (1985) مطالعاتی روی آب شستگی ناشی از جریان خروجی از یک حوضچه آرامش پایین دست یک سرریز انجام دادند. در این آزمایش‌ها از یک کفبند مسطح که طول آن تقریباً برابر با طول پرش هیدرولیکی بود، استفاده شد. سه نوع پرش هیدرولیکی مورد آزمایش قرار گرفت: پرش هیدرولیکی مستغرق، پرش هیدرولیکی متعادل و پرش هیدرولیکی پیش‌رونده به سمت پایین دست. بر اساس نتایج این آزمایش‌ها، وجود تشابه بین نیم‌رخ‌های آب شستگی نشان داده شد. همچنین آن‌ها رابطه زیر را برای پیش‌بینی شکل حفره آب شستگی ارائه نمودند.

$$\frac{y}{y_{sm}} + 9 = 8 \cosh \left[ \frac{1}{8} \left( \frac{x}{y_{sm}} - 3.2 \right) \right] \quad (۳)$$

در رابطه فوق  $y_{sm}$ : حداکثر عمق آب شستگی،  $x$ : فاصله طولی از محل شروع آب شستگی و  $y$ : ارتفاع آب شستگی از سطح اولیه می‌باشد.

Balachandar et al. (2000) به بررسی تأثیر عمق پایاب بر آب شستگی پایین دست دریچه کشویی بدون کفبند پرداختند و نمودارهایی برای توسعه گودال آب شستگی در زمان‌های مختلف ارائه کردند.

طول پرش هیدرولیکی برحسب متر،  $L_B$ : طول حوضچه برحسب متر. لازم به ذکر است که ابعاد آبشستگی شامل پارامترهای عمق حفره آبشستگی ( $y_s$ ) و گسترش طولی حفره ( $L_s$ ) می‌باشد. برخی از این پارامترها در شکل (۱) نشان داده شده است. در نهایت ارتباط بین پارامترها به صورت زیر خواهد بود:

$$\phi_s = f(\rho, \mu, g, y_1, V_1, y_t, y_{tn}, D_s, \rho_s, L_j, L_B) \quad (8)$$

با در نظر گرفتن  $\rho$ ،  $V_1$  و  $y_1$  به عنوان متغیرهای تکراری و به کار بردن قضیه پی باکینگهام، پارامترهای بدون بعد به صورت زیر استخراج گردید:

$$\frac{\phi_s}{y_1} = f\left(Fr_1 = \frac{V_1}{\sqrt{gy_1}}, Re_1 = \frac{\rho V_1 y_1}{\mu}, \frac{y_t}{y_1}, \frac{y_{tn}}{y_1}, \frac{L_j}{y_1}, \frac{L_B}{y_1}, \frac{D_s}{y_1}, \frac{\rho_s}{\rho}\right) \quad (9)$$

محدوده تغییرات عدد رینولدز در آزمایش‌ها بین ۱۸۳۳۵ و ۵۵۳۳۳ بوده که نشان‌دهنده متلاطم بودن جریان است (Mahmoudian Shooshtari, 2008). با توجه به بالا بودن مقدار رینولدز و تأثیر ناچیز نیروی لزجت در مقایسه با نیروهای اینرسی، می‌توان از اثر عدد رینولدز صرف نظر کرد و آن را از معادله حذف نمود. همچنین به دلیل این که تمام آزمایش‌ها با یک نوع ماده رسوبی انجام شده و مصالح بستر از نظر جنس و اندازه یکسان هستند، پارامترهای  $D_s/\rho_s$  و  $\rho_s/\rho$  نیز ثابت بوده و از معادله حذف می‌شوند. با ترکیب پارامترهای  $\frac{L_j}{y_1}$  و  $\frac{L_B}{y_1}$  و همچنین  $\frac{y_t}{y_1}$  و  $\frac{y_{tn}}{y_1}$  معادله اخیر را می‌توان به صورت زیر نوشت:

$$\frac{\phi_s}{y_1} = f\left(Fr_1, \frac{y_t}{y_1}, \frac{L_j}{L_B}\right) \quad (10)$$

آزمایش‌ها با سه قطر مختلف رسوب تقریباً یکنواخت انجام شد. نتایج نشان داد که پارامترهای اصلی حاکم بر فرایند آبشستگی عمق پایاب، عدد فرود ذره، زمان نسبی و فاصله نسبی پاشنه پرش از لبه پیش‌بند هستند. تشابهی بین نیم‌رخ‌های آبشستگی مشاهده نشد.

در تمامی مطالعه‌های ذکر شده حوضچه آرامش یا کف‌بند مورد استفاده، افقی و صاف بوده است و تاکنون مطالعه‌ای در زمینه آبشستگی پایین‌دست حوضچه‌های آرامشی که به سمت پایین‌دست شیب‌دار هستند، انجام نشده است.

از طرفی در گزارش طرح مطالعاتی Dezab Consulting Engineering Company (2003) در خصوص سد انحرافی شهدا به آبشستگی پایین‌دست اشاره شده است.

هدف از انجام این تحقیق، یافتن علل ایجاد آبشستگی پایین‌دست حوضچه آرامش سد شهدا، عوامل مؤثر در آن و در نهایت ارایه یک راه‌کار مناسب برای جلوگیری از گسترش آن می‌باشد.

## مواد و روش‌ها

### تحلیل ابعادی

با هدف استخراج پارامترهای بی‌بعد مؤثر و نیز تحلیل نتایج، تحلیل ابعادی بدین ترتیب صورت گرفت که ابعاد آبشستگی ( $\phi_s$ ) به عنوان پارامتر وابسته در نظر گرفته شد. پارامترهای مستقل نیز عبارت‌اند از:  $\rho$ : دانسیته سیال بر حسب کیلوگرم بر مترمکعب،  $\mu$ : لزجت دینامیکی سیال بر حسب کیلوگرم بر متر در ثانیه،  $y_1$ : عمق اولیه پرش برحسب متر،  $V_1$ : سرعت جریان در محل عمق اولیه پرش برحسب متر بر ثانیه،  $y_t$ : عمق پایاب بر حسب متر،  $y_{tn}$ : عمق پایاب نرمال (عمق پایایی که به ازای آن پرش در ابتدای حوضچه تشکیل می‌شود) برحسب متر،  $g$ : شتاب ثقل برحسب متر بر مجذور ثانیه،  $D_s$ : قطر ذرات رسوبی برحسب متر،  $\rho_s$ : دانسیته رسوبات بستر برحسب کیلوگرم بر مترمکعب،  $L_j$ :

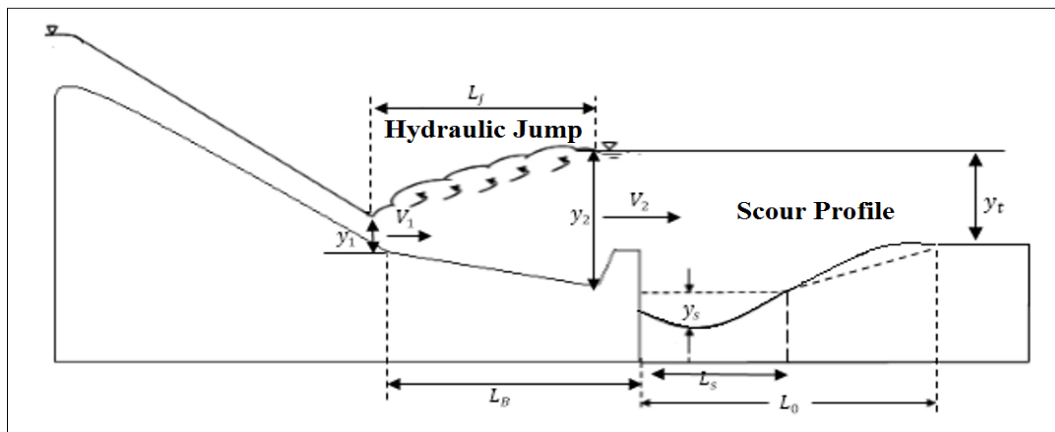


Fig. 1- Schematic of laboratory model, jump and scour characteristic

شکل ۱- طرح‌واره‌ای از مدل آزمایشگاهی، مشخصات پرش و مشخصات آبشستگی

## طراحی مدل فیزیکی - هیدرولیکی

با در نظر گرفتن قانون تشابهی فرود و حداکثر دبی طرح در نمونه اصلی (پروتوتایپ)، مقیاس مناسب برای ساخت مدل تعیین شد. محاسبات مربوط به مقیاس مدل با در نظر گرفتن فرضیه‌های زیر در جدول (۱) آمده است.

- حداکثر دبی در مقیاس واقعی ( $Q_p$ ) معادل با ۲۱۰۰ مترمکعب بر ثانیه؛

- ارتفاع سد در مقیاس واقعی از بستر پایین دست ( $P$ ) معادل با ۱۱۷۰ سانتی‌متر؛

- اندازه متوسط رسوب بستر در مقیاس واقعی ( $D_{50P}$ ) معادل با ۱/۵ سانتی‌متر و

- عرض سد در مقیاس واقعی ۱۵۰ متر و عرض فلوم ۰/۳ متر.

با توجه به نتایج جدول (۱) و با توجه به این که حداکثر دبی قابل تأمین در آزمایشگاه ۲۱ لیتر بر ثانیه است؛ لذا مقیاس مدل سازی معادل با  $L_R = 40$  در نظر گرفته شد. همچنین دبی حداکثر طرح برای مدل ۱۶/۶ لیتر بر ثانیه، ارتفاع کلی مدل ۲۹/۲۵ سانتی‌متر و اندازه متوسط ذرات رسوب در مدل ۰/۳۷۵ میلی‌متر محاسبه شد.

شکل (۲) طرح کلی سد، حوضچه آرامش و مصالح پایین دست آن را با مقیاس ۴۰ نشان می‌دهد.

## برنامه انجام آزمایش‌ها

مطابق با اهداف تحقیق، تعداد ۱۶ آزمایش در دو دسته انجام گرفت. هدف از انجام دسته اول یافتن علل ایجاد آب شستگی و عوامل مؤثر بر آن و هدف دسته دوم بررسی راه‌کارهایی برای کاهش میزان آب شستگی و در نهایت ارائه بهترین راه‌کار بود. سناریوی آزمایش‌ها به شرح زیر است:

دسته اول

- تعداد سه آزمایش با دبی‌های مختلف انجام گرفت. دبی‌هایی که مورد آزمایش قرار گرفت عبارتند از: دبی حداکثر طرح که برای مدل ۱۶/۶ لیتر بر ثانیه به دست آمد، دو سوم دبی طرح معادل ۱۱ لیتر بر ثانیه و یک سوم دبی طرح که معادل ۵/۵ لیتر بر ثانیه

است. این دبی‌ها در واقعیت به ترتیب ۲۱۰۰، ۱۳۹۰ و ۶۹۵ مترمکعب بر ثانیه می‌باشند.

- تعداد چهار آزمایش برای دبی حداکثر طرح، به گونه‌ای انجام شد که عمق پایاب نرمال برای این دبی، ۱۰ و ۲۰ درصد کاهش و سپس به همین مقادیر افزایش داده شد.

با توجه به این که هیچ اطلاعاتی از نحوه طراحی حوضچه در دسترس نبود، فرض شد طراحی بر این اساس بوده که شروع پرش در ابتدای حوضچه باشد، از این رو عمق پایایی که این شرایط را فراهم کند، عمق پایاب نرمال تعریف شد. محاسبه عمق پایاب نرمال برای هر یک از دبی‌های ۱۶/۶، ۱۱ و ۵/۵ لیتر بر ثانیه، با استفاده از نمودار دبی - اشل پایاب زمان طراحی انجام شد. با استفاده از این نمودار و پس از تبدیل واحد و مقیاس، پایاب نرمال برای دبی‌های ۵/۵، ۱۱ و ۱۶/۶ لیتر بر ثانیه به ترتیب ۲۱/۳، ۲۳/۸ و ۲۸/۸ سانتی‌متر محاسبه شد. پس از آن چهار عمق پایایی که از افزایش و کاهش ۱۰ و ۲۰ درصدی آن در آزمایش‌ها مورد استفاده قرار گرفت، به صورت زیر محاسبه شد:

- پایاب با ۱۰ درصد کاهش: ۲۵/۹ سانتی‌متر؛
- پایاب با ۲۰ درصد کاهش: ۲۳ سانتی‌متر؛
- پایاب با ۱۰ درصد افزایش: ۳۱/۷ سانتی‌متر و
- پایاب با ۲۰ درصد افزایش: ۳۴/۵ سانتی‌متر.

## دسته دوم

راه‌کارهایی که در این دسته مورد بررسی قرار گرفت، به صورت پوشش سنگ‌چین و اصلاح شیب مصالح پایین دست حوضچه بود.

- بررسی پوشش سنگ‌چین در ۹ آزمایش و با ۳ قطر مختلف از ذرات انجام گرفت. در این آزمایش‌ها هر قطر از ذرات با سه ضخامت مختلف بررسی شد. مصالح مورد استفاده برای سنگ‌چین دارای اندازه متوسط‌های ۲، ۳/۴ و ۵ میلی‌متر بودند. مشخصات مصالح مورد استفاده در جدول (۲) آمده است. همچنین منحنی دانه‌بندی مصالح در شکل (۳) آورده شده است.

- برای اصلاح شیب مصالح نیز دو آزمایش در نظر گرفته شد. در این آزمایش‌ها شیب یک به پنج اجرا شده در ۲۵ سانتی‌متر دوم از مصالح پایین دست حوضچه که در شکل (۲) نشان داده شده است، کاهش داده شده و به صورت یک به شش و یک به هفت اجرا شد.

جدول ۱- مشخصات هیدرولیکی مدل و رسوب

Table 1- Hydraulic characters of model and sediment

Model Scale ( $L_R$ )	Height of Model (cm) ( $P/L_R$ )	Model Discharge (L/S) ( $q_p/L_R^{1.5} (1000 * 0.3)$ )	Sediment Size ( $D_{50P}/L_R$ )
20	58.8	42.95	0.75
30	39	25.56	0.5
40	29.25	16.60	0.375

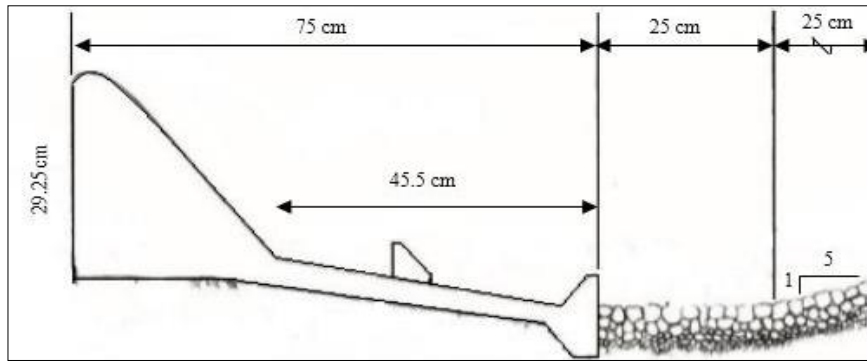


Fig. 2- The Overall design of the dam, stilling basin and its downstream materials with a scale of 40  
 شکل ۲- طرح کلی سد، حوضچه آرامش و مصالح پایین دست آن با مقیاس ۴۰

جدول ۲- مشخصات مصالح مورد استفاده  
 Table 2- Used Material Properties

	$D_{10}$	$D_{16}$	$D_{50}$	$D_{60}$	$D_{84}$	$c_u$	$\sigma_g$
Bed Material	0.3	0.335	0.4	0.412	0.446	1.37	1.15
Riprap 1	1.79	1.82	1.98	2	2.11	1.11	1.07
Riprap 2	2.67	2.81	3.40	3.54	3.87	1.32	1.17
Riprap 3	4.30	4.57	5.01	5.24	6.10	1.21	1.15

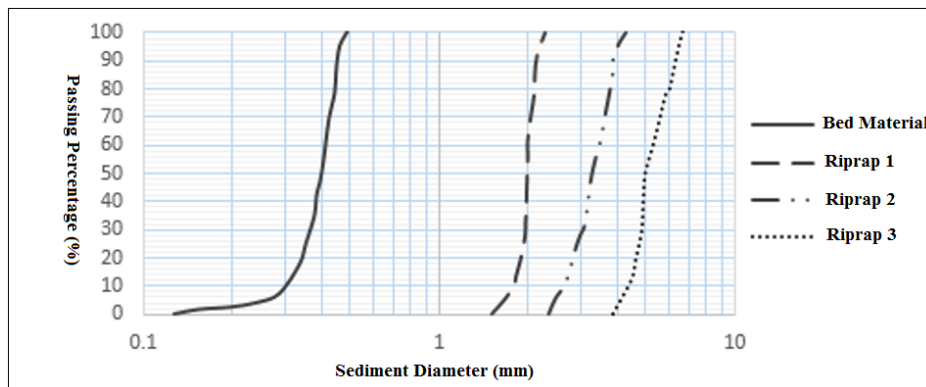


Fig. 3- Aggregate curve of used materials  
 شکل ۳- منحنی دانه بندی مصالح مورد استفاده

$$\sigma_g = (D_{84}/D_{16})^{0.5} \quad (12)$$

مصالح بستر رسوبی

با توجه به این که اندازه متوسط ذرات رسوب در مدل ۰/۳۷۵ میلی متر محاسبه شد؛ لذا از ماسه با میانگین اندازه ذراتی حدود ۰/۴ میلی متر به عنوان ذرات بستر استفاده شد. مشخصات مصالح مورد استفاده در جدول (۲) و منحنی دانه بندی در شکل (۳) آمده است. ضریب یکنواختی ( $c_u$ ) و انحراف معیار هندسی ذرات ( $\sigma_g$ ) در جدول (۲) از روابط (۱۱) و (۱۲) به دست آمده است. از آن جایی که ضریب یکنواختی برای تمامی ذرات کوچکتر از چهار و انحراف معیار هندسی آن ها کوچکتر از ۱/۳ می باشد، مصالح یکنواخت می باشند (Shafai-Bajestan, 2004). چگالی نسبی ذرات  $2650 \text{ kg/m}^3$  بود.

$$c_u = D_{60}/D_{10} \quad (11)$$

امکانات آزمایشگاهی و نحوه انجام آزمایش ها

به منظور انجام این تحقیق، آزمایش ها در فلومی به طول ۱۰ متر، عرض ۰/۳ متر و دارای ارتفاع ۰/۷۵ متر در ۲/۵ متر ابتدایی و ۰/۴۵ متر در ۷/۵ متر انتهایی، در آزمایشگاه هیدرولیک دانشگاه صنعتی خاتم الانبیا (ص) بهیمن انجام گردید. مدل کوچک شده سد و حوضچه آرامش آن با مقیاس ۴۰ و با ورق های گالوانیزه ساخته شده و در فاصله دو متری از ابتدای فلوم نصب شد. پایین دست حوضچه آرامش، مصالح رسوبی از جنس ماسه یکنواخت با قطر متوسط ۰/۴ میلی متر و طول سه متر به عنوان مصالح بستر قرار داده شد. ارتفاع مصالح در ۲۵ سانتی متر ابتدایی ۱۰ سانتی متر بوده، پس از آن به طول ۲۵ سانتی متر ارتفاع با شیب یک به پنج افزایش یافته و به ۱۵ سانتی متر می رسد. در ۲/۵ متر

شد.

در مورد آزمایش‌هایی که با حضور سنگ‌چین انجام گرفت، تمامی مراحل مانند آنچه در بالا گفته شد، صورت گرفت با این تفاوت که پیش از شروع هر آزمایش مصالح رسوبی بستر تا عمقی پایین برده شد که وقتی سنگ‌چین روی مواد بستر ریخته شود، رقوم ارتفاعی سطح سنگ‌چین در تراز قبلی که سطح مصالح بود باقی بماند و اختلاف ارتفاع بین کف حوضچه و سطح سنگ‌چین تغییری نداشته باشد. هم‌چنین بین مصالح رسوبی بستر و مصالح سنگ‌چین از یک توری با بافت ریز به‌عنوان فیلتر استفاده شد.

### نتایج و بحث

در تمامی آزمایش‌ها، وارد شدن جریان به پایین دست حوضچه آرامش و برخورد جریان به بستر رسوبی باعث آب‌شستگی سریع مصالح رسوبی بستر می‌شد. سرعت فرایند فرسایش و تشکیل حفره آب‌شستگی در ابتدای شروع آزمایش‌ها بسیار زیاد بود و با گذشت زمان از میزان فرسایش کاسته می‌شد، به طوری که در حدود ۳۰ دقیقه اول با سرعت بسیار زیادی انجام می‌شد و بیش از ۹۰ درصد آن در چهار ساعت اولیه آزمایش صورت می‌گرفت و در زمان باقی‌مانده سرعت تغییرات بسیار اندک بود.

به‌علت شیب‌دار بودن بستر رسوبی در ۲۵ سانتی‌متر دوم، برخورد جریان به این قسمت از بستر، یک جریان گردابه‌ای ایجاد می‌کرد که باعث حرکت رو به بالا در نزدیکی حوضچه می‌شد شکل (۴) و باعث می‌شد که در انتهای حوضچه رسوب‌گذاری اتفاق بیفتد. پس از آن حفره آب‌شستگی تشکیل می‌شد، به‌گونه‌ای که عمق حفره در فاصله کمی از انتهای حوضچه به حداکثر مقدار خود می‌رسید. با دور شدن از انتهای حوضچه، عمق حفره آب‌شستگی کاهش می‌یافت. هم‌چنین عمق حفره آب‌شستگی در دو طرف فلوم و نزدیک به جداره‌ها بیش‌تر بود که دلیل آن را می‌توان اثر جداره فلوم دانست. در شکل (۵) نمونه‌ای از آب‌شستگی در عدد فرود ۲/۶۸ نشان داده شده است.

باقی‌مانده ارتفاع مصالح ۱۵ سانتی‌متر باقی می‌ماند. پس از آن نیز تا انتهای فلوم را بستر ثابت به ارتفاع ۱۵ سانتی‌متر تشکیل داد که برای پوشش روی آن از مخلوط چسب و مصالح رسوبی استفاده شد. برای اجرای هر آزمایش سطح رسوبات بستر به‌وسیله تسطیح‌کننده کاملاً تراز شده، دریچه کشویی به‌طور کامل بسته می‌شد و آب زلال به آرامی از پایین دست به درون کانال هدایت می‌شد تا از ایجاد ناهمواری در سطح بستر جلوگیری شود. پس از بالا آمدن آب و اطمینان از مرطوب شدن رسوبات بعد از گذشت چند دقیقه، پمپ با دبی کمی راه‌اندازی می‌شد و جریان ورودی با سرعت بسیار کم وارد کانال می‌گردید تا سطح رسوبات تا ارتفاع چند سانتی‌متری از آب پوشیده شود، سپس دریچه کشویی به تدریج باز شده تا این که دبی و ارتفاع آب درون فلوم (پایاب) در مقدار مورد نظر تنظیم گردد.

با توجه به این که هدف از این مطالعه بررسی علل بروز آب‌شستگی و عوامل مؤثر در آن و ارایه راه‌کارهایی برای جلوگیری از گسترش آن است و هدف ایجاد رابطه‌ای برای پیش‌بینی حداکثر عمق آب‌شستگی نیست و نیز تکمیل فرایند آب‌شستگی مدنظر نبوده؛ بنابراین مدت‌زمان تمام آزمایش‌ها زمان ثابت شش ساعت در نظر گرفته شد. ضمن این که اندازه‌گیری‌های حین آزمایش‌ها نشان داد که بیش از ۹۰ درصد از آب‌شستگی در زمانی حدود چهار ساعت اتفاق می‌افتد و از این‌رو زمان هر آزمایش شش ساعت منظور گردید. پس از آن پمپ خاموش شده و دریچه انتهایی فلوم به‌طور کامل بسته می‌شد تا آب داخل فلوم به آرامی تخلیه شود. پس از خشک شدن آب روی ماسه‌ها، توپوگرافی بستر رسوبی در یک شبکه ۵×۵ سانتی‌متری به‌وسیله متر لیزری با دقت یک میلی‌متر برداشت می‌شد.

در طی مدت‌زمان آزمایش مشخصات پرش هیدرولیکی از جمله طول پرش، طول غلتاب و اعماق مزدوج پرش برداشت می‌شد. طول پرش هیدرولیکی و طول غلتابی توسط متری با دقت یک میلی‌متر، به‌صورت چشمی با مشاهده حباب‌های هوا و اعماق مزدوج پرش، توسط عمق‌سنج با دقت ۰/۱ میلی‌متر اندازه‌گیری

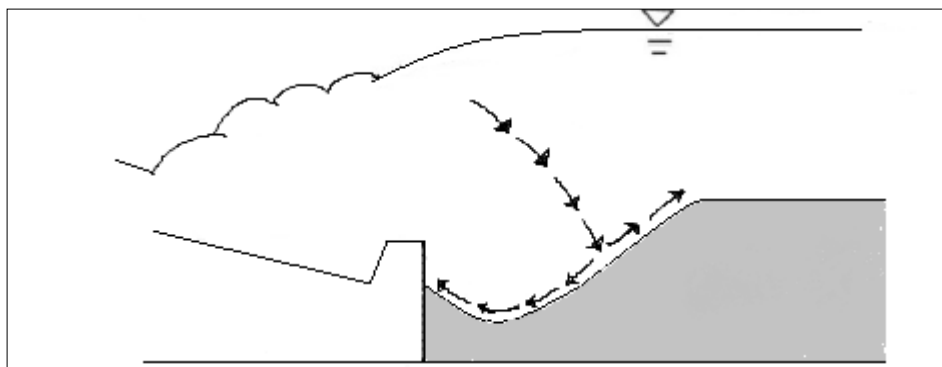


Fig. 4- Flow splitting after impact on materials slope

شکل ۴- تقسیم شدن جریان پس از برخورد به شیب مصالح



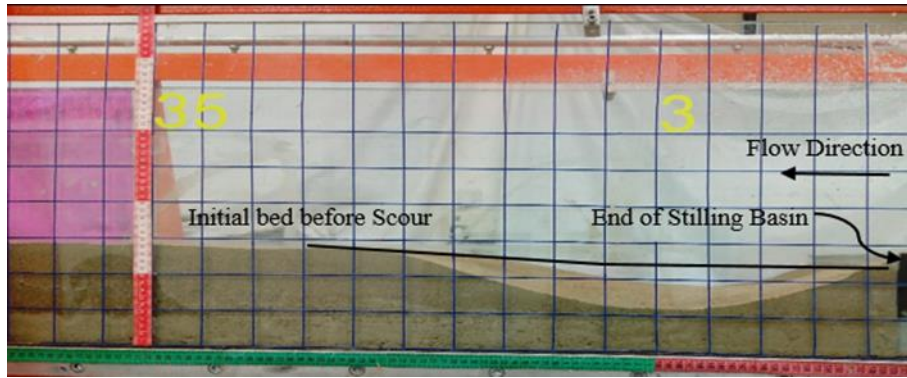


Fig. 5- Scour created in the laboratory at Froude number 2.68

شکل ۵- آب‌شستگی ایجادشده در آزمایشگاه در عدد فرود ۲/۶۸

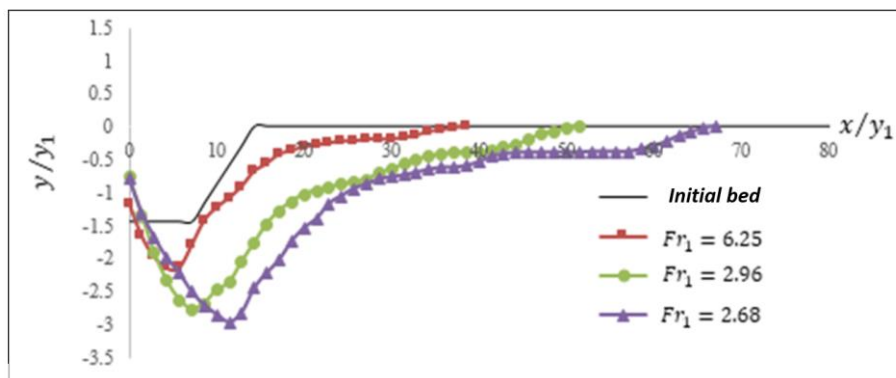


Fig. 6- Dimensionless Scouring profile changes in various initial Froude numbers jump

شکل ۶- تغییرات نیم‌رخ بی بعد آب‌شستگی در اعداد فرود مختلف اولیه پرش

نسبت طول پرش به طول حوضچه‌های متفاوت نشان داده شده است.

در تمامی آزمایش‌های این تحقیق طول پرش هیدرولیکی از طول حوضچه آرامش که معادل ۴۵/۵ سانتی‌متر است، بیش‌تر بود. پس بخشی از پرش بیرون از حوضچه تشکیل می‌شود که باعث ایجاد آب‌شستگی در این قسمت شده است.

#### تأثیر نسبت عمق پایاب به عمق پایاب نرمال بر مشخصات بدون بعد آب‌شستگی

شکل (۸) تغییرات نیم‌رخ بدون بعد آب‌شستگی را برای دبی ثابت حداکثر طرح و نسبت‌های مختلف عمق پایاب به عمق پایاب نرمال، نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل (۸) مشاهده می‌شود، با افزایش نسبت عمق پایاب به عمق پایاب نرمال، حجم کمتری از مواد بستر شسته می‌شود. علت این است که با افزایش عمق پایاب، جت آب خروجی از سرریز که انرژی بالایی دارد، به حجم زیادی از آب با سرعت کم برخورد می‌کند و مقدار زیادی از انرژی آن مستهلک می‌شود، درنهایت آب‌شستگی کم‌تری صورت می‌پذیرد. از طرفی برای یک دبی ثابت، با افزایش عمق پایاب عدد فرود مقطع اولیه پرش ( $Fr_1$ ) افزایش می‌یابد و این بدان معناست که با افزایش پایاب پرش قوی‌تر شده، استهلاک انرژی بیش‌تری صورت می‌گیرد؛ بنابراین آب‌شستگی کم‌تر خواهد بود.

#### تأثیر میزان عدد فرود بر نیم‌رخ بدون بعد آب‌شستگی

نتایج حاصل از آزمایش‌ها نشان می‌دهد که در شرایط تشکیل پرش در ابتدای حوضچه ( $y_t/y_{tn} = 1$ )، با افزایش عدد فرود در مقطع اولیه پرش ( $Fr_1$ ) آب‌شستگی کاهش می‌یابد. از آنجایی که قدرت پرش به عدد فرود قبل از آن بستگی دارد، با افزایش عدد فرود پرش قوی‌تر شده و استهلاک انرژی بیش‌تری صورت می‌گیرد؛ پس آب‌شستگی کم‌تر خواهد بود. شکل (۶) تغییرات نیم‌رخ بدون بعد آب‌شستگی را در اعداد فرود اولیه مختلف نشان می‌دهد.

#### تأثیر نسبت طول پرش به طول حوضچه بر نیم‌رخ بدون بعد آب‌شستگی

نتایج نشان می‌دهد که طول و عمق بدون بعد آب‌شستگی با نسبت طول پرش به طول حوضچه ( $L_j/L_B$ ) رابطه مستقیم دارند. در یک دبی ثابت، با افزایش میزان نسبت طول پرش به طول حوضچه آرامش مقدار عمق و طول بدون بعد آب‌شستگی افزایش می‌یابد؛ زیرا بخش بیش‌تری از پرش خارج از حوضچه اتفاق افتاده در نتیجه انرژی آب به‌طور کامل درون حوضچه مستهلک نشده و گردابهایی که از حوضچه خارج می‌شوند دارای انرژی زیادی بوده که آب‌شستگی زیادی را در پایین‌دست حوضچه موجب می‌شوند. در شکل (۷) تغییرات نیم‌رخ بی‌بعد آب‌شستگی در دبی ثابت و

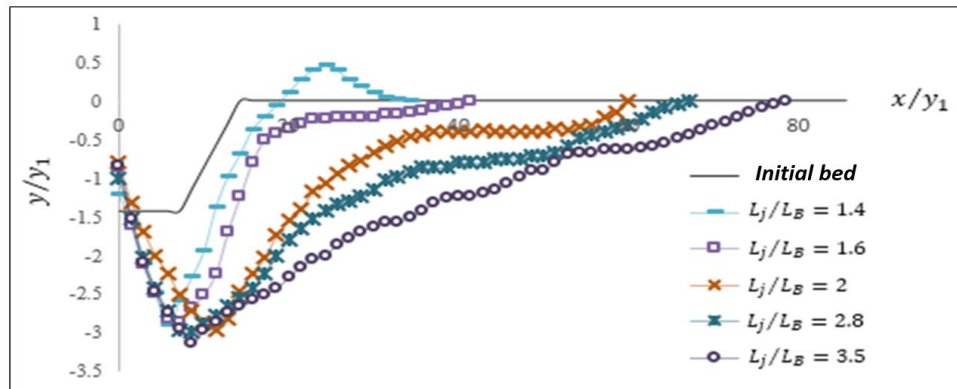


Fig. 7- Dimensionless Souring profile changes in the maximum design discharge and ratios of length of jump to different lengths of stilling basin

شکل ۷- تغییرات نیم‌رخ بی بعد آب شستگی در دبی ثابت حداکثر طرح و نسبت‌های طول پرش به طول حوضچه متفاوت

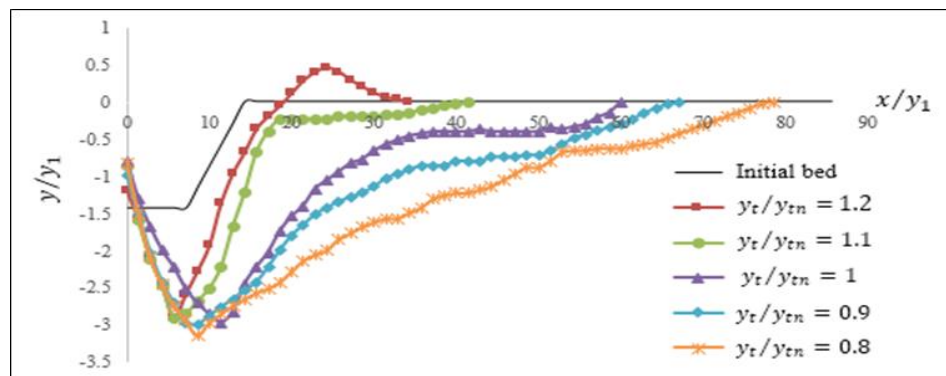


Fig. 8- Dimensionless Souring profile changes in the maximum design discharge and ratios of the downstream depths to different downstream normal depths

شکل ۸- تغییرات نیم‌رخ بی بعد آب شستگی در دبی ثابت حداکثر طرح و نسبت‌های عمق پایاب به عمق پایاب نرمال متفاوت

#### بررسی عملکرد راه کارهای ارایه شده در کاهش آب شستگی

نتایج آزمایش‌ها نشان داد که استفاده از سنگ‌چین به‌عنوان لایه حفاظتی بستر، باعث کاهش مشخصات آب شستگی به‌میزان قابل توجهی می‌شود. علت این امر، افزایش قطر ذرات و در نتیجه افزایش سرعت آستانه حرکت آن‌هاست که این مطلب در جدول (۴) قابل مشاهده است؛ به همین دلیل وقتی سنگ‌چین با اندازه ذرات پنج میلی‌متر مورد آزمایش قرار گرفت، به‌علت بیش‌تر بودن آستانه حرکتش از سرعت جریان، آب شستگی اتفاق نیفتاد و مصالح سنگ‌چین در اثر جریان فقط دچار تکان‌های ریزی در جای خود می‌شدند. همچنین در آزمایش‌هایی که ضخامت لایه سنگ‌چین برای هر یک از قطرهای افزایش داده شد (هر یک از قطرهای سنگ‌چین با سه ضخامت یک، دو و سه برابر اندازه متوسط ذراتش آزمایش شد)، مشخص شد که افزایش ضخامت لایه برای یک قطر ثابت، عملکرد آن‌را در کاهش آب شستگی افزایش می‌دهد.

برای سنگ‌چین پنج میلی‌متر، چون در آزمایش اول و با یک لایه سنگ‌چین (ضخامت یک برابر اندازه متوسط ذراتش) آب شستگی رخ نداد، آزمایش‌ها با این قطر و با ضخامت‌های بیش‌تر، ادامه داده نشد.

#### بررسی تأثیر آستانه حرکت ذرات در میزان آب شستگی

مقایسه سرعت متوسط جریان و سرعت بحرانی ذرات در آزمایش‌ها نشان داد که وقتی سرعت متوسط جریان از سرعت بحرانی ذرات بیشتر می‌شود، قدرت حمل و ظرفیت انتقال رسوبات در پایین دست پرش افزایش یافته و باعث می‌شود که رسوبات در اثر جریان شسته شده و در طول وسیع‌تری در پایین دست حوضچه انباشته شوند.

سرعت آستانه حرکت ذرات با استفاده از رابطه ارایه شده توسط Shafai-Bajestan (2013) به‌صورت  $V_c = 2.2[g(G_s - 1)D_s]^{0.5}$  پایین دست پرش با تقسیم دبی بر سطح مقطع جریان در این قسمت (حاصل ضرب عمق ثانویه پرش در عرض فلوم) محاسبه گردید. با توجه به جدول (۳)، سرعتی که لازم است تا ذرات بستر رسوبی با اندازه متوسط  $0.4$  میلی‌متر به حرکت درآیند،  $0.175$  متر بر ثانیه است. نتایج جدول (۳) نشان می‌دهد که برای تمام آزمایش‌ها سرعت متوسط جریان بیش‌تر از سرعت آستانه حرکت ذرات است؛ بنابراین قدرت جابه‌جایی و ظرفیت انتقال طولی رسوبات در پایین دست پرش زیاد بوده و همین امر باعث بروز آب شستگی در این ناحیه شده است.

آبشستگی رخ نخواهد داد؛ بنابراین استفاده از معادل این قطر در واقعیت که برابر با  $20\text{ cm} = 200\text{ mm} = 40\text{ mm} \times 5$  خواهد بود، با در نظر گرفتن یک ضریب اطمینان قابل قبول، راه کار مناسبی برای کنترل آبشستگی پایین دست حوضچه آرامش سد انحرافی شهدا، می باشد.

#### تأثیر پارامترهای بی بعد به دست آمده از تحلیل ابعادی بر مشخصات بی بعد آبشستگی

شکل های (۹ الف و ب) میزان عمق و طول بدون بعد حفره آبشستگی را در برابر عدد فرود مقطع اولیه پرش نشان می دهد. نتایج نشان می دهد که با افزایش عدد فرود عمق و طول بی بعد آبشستگی افزایش می یابد.

در شکل های (۱۰ الف و ب) و (۱۱ الف و ب) عمق و طول بی بعد آبشستگی به ترتیب در برابر  $L_j/L_B$  و  $y_t/y_{tn}$  نشان داده شده است. نتایج نشان می دهد که عمق و طول بی بعد آبشستگی با افزایش  $L_j/L_B$  افزایش و با افزایش  $y_t/y_{tn}$  کاهش می یابد.

در آزمایش های اصلاح شیب مشاهده شد که هرچه شیب کم تر شود، از جریان های گردابه ای که در پایین دست حوضچه تشکیل می شود، کاسته شده و میزان آبشستگی نیز کاهش می یابد ولی میزان این کاهش در مقایسه با پوشش سنگ چین کم تر می باشد. به عبارت دیگر پوشش سنگ چین در مقایسه با کاهش شیب عملکرد بهتری در کاهش میزان آبشستگی داشته است.

جدول (۵) درصد کاهش آبشستگی برای آزمایش های سنگ چین و کاهش شیب را که از رابطه زیر محاسبه شده است، نشان می دهد.

$$\text{درصد کاهش آبشستگی} = \frac{y_s \max - y_s}{y_s \max} \times 100 \quad (13)$$

در این رابطه،  $y_s \max$  حداکثر عمق آبشستگی و  $y_s$  عمق آبشستگی رخ داده در آزمایش های سنگ چین و کاهش شیب است.

با توجه به آنچه گفته شد، در صورت به کار بردن سنگ چین، با قطر متوسط پنج میلی متر به عنوان لایه حفاظتی بستر،

#### جدول ۳- نتایج مربوط به سرعت جریان و سرعت بحرانی برای آزمایش های دسته اول

Table 3- Results related to the flow velocity and critical velocity for first series test

$Q$ (lit/s)	$(m)y_t$	$(mm)D_{50}$	$(m/s)V_c$	$V$ (m/s)
5.5	0.213	0.4	0.175	0.229
11	0.238	0.4	0.175	0.394
16.6	0.230	0.4	0.175	0.553
16.6	0.259	0.4	0.175	0.526
16.6	0.288	0.4	0.175	0.472
16.6	0.317	0.4	0.175	0.345
16.6	0.345	0.4	0.175	0.307

#### جدول ۴- نتایج مربوط به سرعت جریان و سرعت بحرانی برای آزمایش های سنگ چین

Table 4- Results related to the flow velocity and critical velocity for Rip-rap test

$Q$ (lit/s)	$(m)y_t$	$(mm)D_{50}$ Riprap	$(m/s)V_c$	$V$ (m/s)
16.6	0.288	2	0.392	0.472
16.6	0.288	3.4	0.416	0.472
16.6	0.288	5	0.620	0.472

#### جدول ۵- درصد کاهش آبشستگی در آزمایش های دسته دوم

Table 5- The percentage of scour reduction in second series test

Scour Reduction Percentage	Description of experiment
74	$D_{50}$ Riprap = 2 mm - $t_{Riprap}$ = 2 mm
76	$D_{50}$ Riprap = 2 mm - $t_{Riprap}$ = 4 mm
79	$D_{50}$ Riprap = 2 mm - $t_{Riprap}$ = 6 mm
80	$D_{50}$ Riprap = 3/4 mm - $t_{Riprap}$ = 3/4 mm
85	$D_{50}$ Riprap = 3/4 mm - $t_{Riprap}$ = 6/8 mm
90	$D_{50}$ Riprap = 3/4 mm - $t_{Riprap}$ = 10/2 mm
100	$D_{50}$ Riprap = 5 mm - $t_{Riprap}$ = 5 mm
45	Slope 1 to 6
	Slope 1 to 7

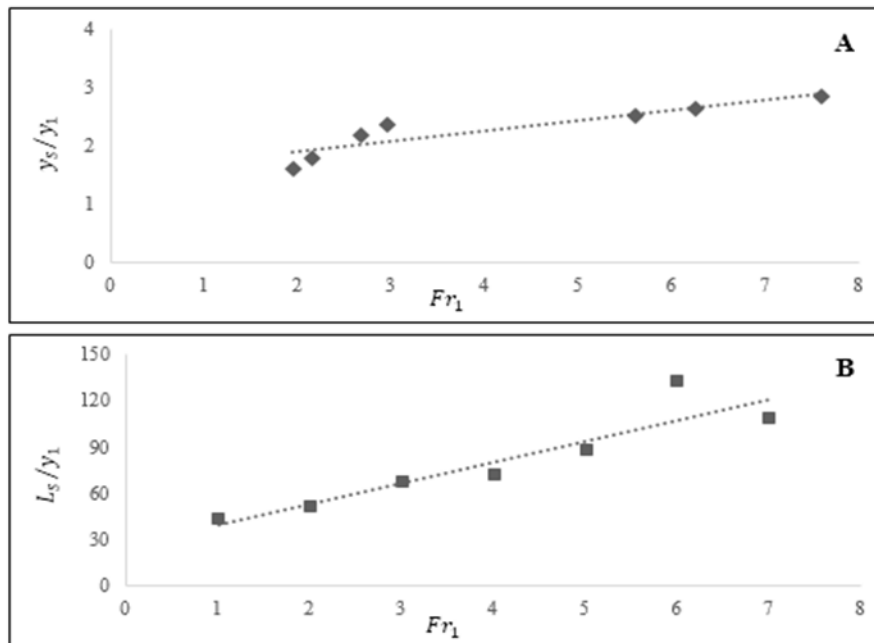


Fig. 9- A: Deep variation of maximum relative scour depth to Froude number, B: Maximum scour length variation against Froude number

شکل ۹- الف) تغییرات عمق حداکثر آب شستگی نسبی به ازای عدد فرود، ب) تغییرات طول حداکثر حفره آب شستگی در برابر عدد فرود

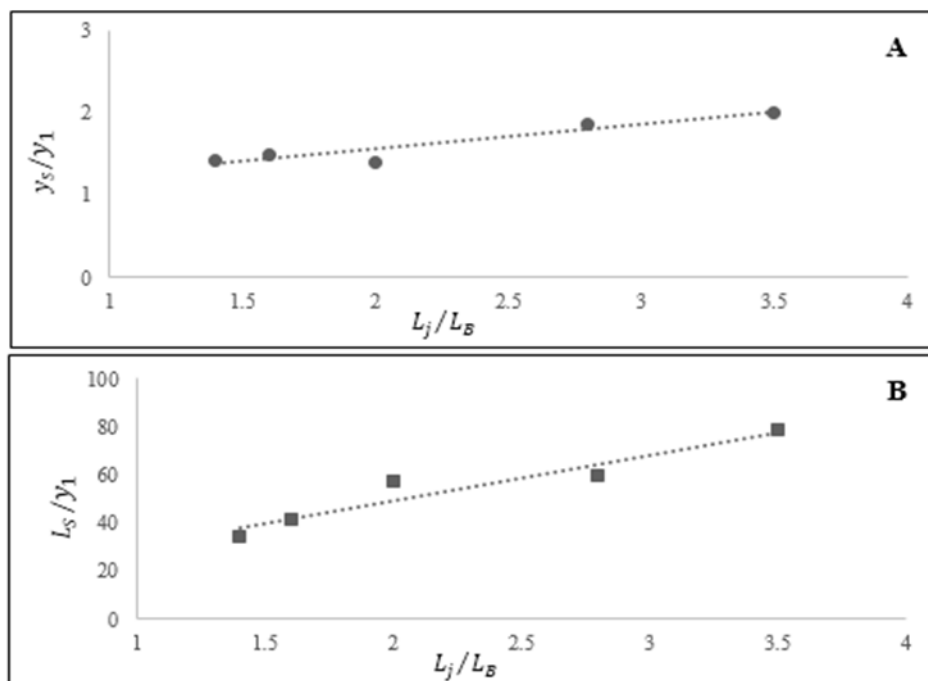


Fig. 10- A: Deep variation of maximum relative scour depth to jump relative length, B: Maximum scour length variation against jump relative length

شکل ۱۰- الف) تغییرات عمق حداکثر آب شستگی نسبی به ازای طول نسبی پرش، ب) تغییرات طول حفره آب شستگی در برابر طول نسبی پرش

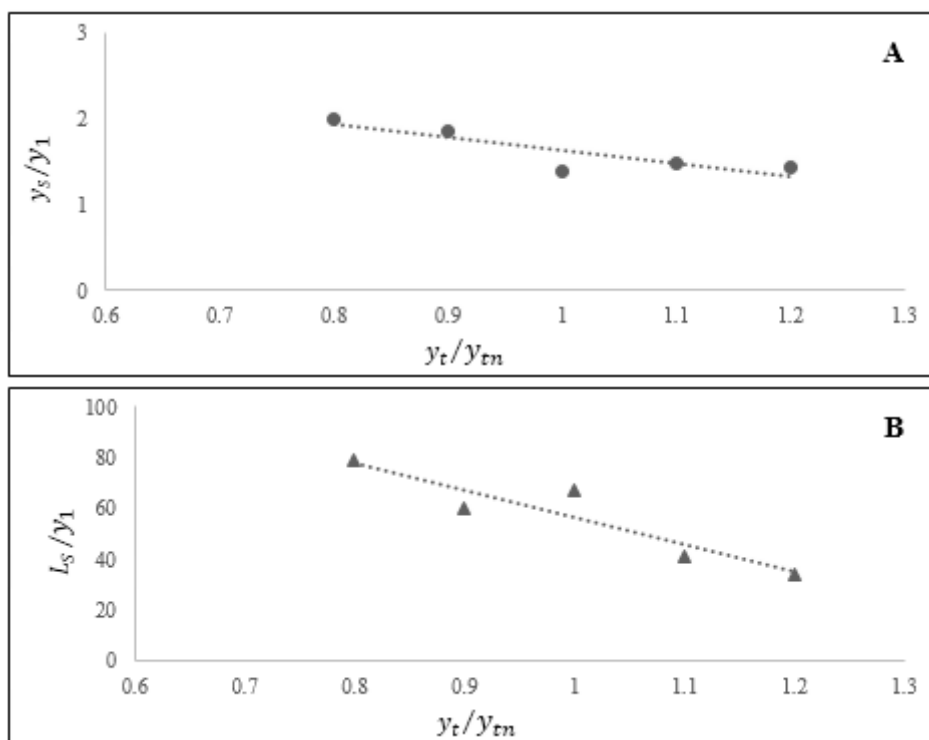


Fig. 11- A: Deep variation of maximum relative scour depth to downstream relative depth, B: Maximum scour length variation against downstream relative depth

شکل ۱۱- الف) تغییرات عمق حداکثر آب شستگی نسبی به ازای عمق نسبی پایاب، ب) تغییرات طول حفره حداکثر آب شستگی در برابر عمق نسبی پایاب

می‌شود، قدرت کف‌کنی را در این ناحیه کاهش داده و باعث می‌شود که میزان آب شستگی به‌طور متوسط تا ۴۶ درصد کاهش یابد. وجود سنگ‌چین به‌عنوان لایه‌ای برای حفاظت بستر، راه‌کار بسیار خوبی برای کاهش میزان آب شستگی تشخیص داده شد و میزان آب شستگی را به‌طور متوسط تا ۸۳ درصد کاهش داد. در نهایت استفاده از سنگ‌چین با دانه‌بندی متوسطی برابر ۲۰ سانتی‌متر (در بررسی‌های آزمایشگاهی و در مقیاس مدل پنج میلی‌متر) برای کنترل آب شستگی پایین‌دست حوضچه آرامش سد انحرافی شهیدا پیشنهاد می‌گردد.

#### تشکر و قدردانی

این تحقیق با حمایت مالی و معنوی دفتر پژوهش‌های کاربردی سازمان آب و برق خوزستان انجام گردیده که بدینوسیله از آن‌ها تشکر و قدردانی می‌گردد.

#### نتیجه‌گیری

در این تحقیق به بررسی آب شستگی پایین‌دست حوضچه آرامش سد انحرافی شهیدا پرداخته شد. بر اساس نتایج آزمایشگاهی مشخص شد که کوتاه بودن طول حوضچه آرامش و بیش‌تر بودن سرعت محلی جریان در پایین‌دست پرش از سرعت آستانه حرکت ذرات بستر، علت‌های بروز آب شستگی در پایین‌دست حوضچه آرامش هستند. همچنین مشخص شد که با افزایش میزان دبی و افزایش طول پرش هیدرولیکی برای یک دبی ثابت، ابعاد حفره آب شستگی افزایش یافته و افزایش عمق پایاب برای یک دبی ثابت، باعث کاهش در مشخصات حفره آب شستگی می‌شود تا جایی که افزایش عمق پایاب به‌میزان ۲۰ درصد، باعث کاهش حداکثر عمق حفره آب شستگی تا ۴۱ درصد و کاهش گسترش طولی آب شستگی تا ۷۰ درصد می‌شود. اصلاح شیب مصالح در پایین‌دست حوضچه آرامش با کاهش قدرت جریان‌های گردابه‌ای که به‌علت وجود این شیب تشکیل

#### References

- Balachandar, R., Kells, J. A. and Thiessen, R. J. 2000. The effect of tailwater depth on the dynamics of local scour. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 27: 138-150.
- Catakli, O., Ozal, K., Tandogan, A. 1973. A study of Scours at end of stilling basin and use of horizontal beams as energy dissipators. 11<sup>th</sup> Congress of Large Dams, Madrid. Q41 R2: 23-37.

- 3- Dargahi, B. 2003. Scour downstream of a spillway. *Journal of Hydraulic Research*, 41(4): 417-426.
- 4- Dey, S and Sarkar, A. 2006. Scour downstream of an apron due to submerge horizontal jets. *Journal of Hydraulic Engineering*, 132(3): 246 – 257.
- 5- Dezab Consulting Engineering Company Report No 2004286, 2003. Calibration of Irrigation gates of Shohada and Jayzan diversion dams. (In Persian).
- 6- Farhoodi, J and Smith, K. 1985. Local scour profile downstream of hydraulic jump. *Journal of Hydraulic Research* 23(4): 343-359.
- 7- Hamidifar, H. and Omid, M. H. 2010. Noncohesive Sediment Scour Downstream of an Apron. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 11(2): 17-28. (In Persian)
- 8- Mahmoudian Shooshtari, M. 2008. Principles of flow in open channels. First volume. Second edition. *Shahid Chamran University of Ahvaz Publications*. (In Persian)
- 9- Novak, P. 1955. Study of stilling basin with special regard to their end sill. *Proceeding of 6<sup>th</sup> IAHR Conference*, The Hague, paper C15.
- 10- Novak, P. 1961. Influence of bed load passage on scour and turbulence downstream of stilling basin. *Proceeding of 19th IAHR Conference*, Dubrovnik: 66-75.
- 11- Oliveto, G. 2013. Local scouring downstream of a spillway with an apron. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers*. 166. 254-261.
- 12- Shafai-Bajestan, M. 2004. Sediment Hydraulic. Third edition. *Shahid Chamran University of Ahvaz Publications*. (In Persian)
- 13- Shafai-Bajestan, M. 2013. Basic theory and practice of hydraulics of sediment transport. *Shahid Chamran University press*. Ahvaz. Iran.
- 14- Shafai-Bajestan, M., Omidi, S. 2016. Investigation of Scour Depth Downstream of Stilling Basin for the Case of B-Jump. *Irrigation Sciences and Engineering*, 38(4), 125-136. (In Persian)