

# Experimental Study of River Sand and Gravel Mining on Scouring Pattern Around Pier Group

Mehdi Majedi Asl <sup>1\*</sup>, Rasoul Daneshfaraz <sup>2</sup>, Saeideh Valizadeh <sup>3</sup>

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

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

3- Graduated MSc, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, University of Maragheh, Maragheh, Iran.

\*[mehdi.majedi@gmail.com](mailto:mehdi.majedi@gmail.com)

Received: 9 June 2019, Accepted: 5 August 2019        J. Hydraul. Homepage: [www.jhyd.iha.ir](http://www.jhyd.iha.ir)

## Abstract

**Introduction:** Sand mining, especially from unsuitable places with lower potential, impacts on the flow hydraulic characteristics and sedimentary properties around the bridge piers. The creation of the turbulence causes to the negative effects on the scouring depth and width around the piers. In the present study, the consequences of the mining material, the flow hydraulic conditions, and sedimentary parameters on the scouring patterns of the piers group were studied.

**Methodology:** In order to analysis the scouring of a bridge pier group, 22 experiments were carried out in a rectangular channel with a dimensions of 13 m length, 1.2 m width and 0.8 m depth. The experimental facility is housed at the Hydraulic Lab of Maragheh University. Two false glass floors were installed upstream and downstream at a distance of 4.25 m relative to each other and with a height of 22 cm in the middle of the channel. Sandy movable bed with a height of 22 cm was placed between the aprons. Two pier groups were located upstream and downstream of the bed with a specified distance from the aprons. The pier groups with the same arrangement (three consecutive piers in the direction of flow and at the center of the channel's width) were located with center-to-center distances of 21 cm. To eliminate the effect of the channel wall on local scour, the ratio of the pier center- channel wall distance to the pier diameter was greater than 6.25. Consequently, piers of diameter of 9 cm were used. To prevent the formation of a ripple, the average diameter of the bed particles should be greater than 0.7 mm and the ratio of the pier diameter to the average particle should exceed 20-25. Therefore, the experiments were tested in two different beds, grading A (average sediment diameter = 0.78 mm) and grading B (average sediment diameter=1.7 mm). In order to study the effects of the mining pit hole on scouring rate, the mining was done between the upstream and downstream pier groups.

**Results and discussion:** The results showed that granulation with coarse particles (B) had lower scour depth than substrate with fine grain size (A). So that the maximum scour depth for B aggregate and Froude number equal to 0.5 and 0.25 respectively was 14.14 and 47.58 percent less than A. By mining of the bed from the downstream and upstream of the group piers, the scouring depth has been increased and reduces, respectively. In the Froude

number of 0.5 with the mining of materials from the upstream of the groups in the grain size A, the scour depth was 12 to 10.9 cm. However, taking off the bottom of the bases in the same Froude and grading number increased the maximum scour depth from 15 to 15.6 cm. The maximum scour depth in a discharge of 15 liters per second was less for B, compared with A. The ratio values in the Froude number of 0.25 for grain size A in the downstream bed is approximately 4 times the grain size of B. The lowest ratio in the Froude number of 0.25 is for the B model with the non-pit hole mining material, while the grain size A with the downstream bed is one of the most scouring models in this Froude number. The phenomenon of the scouring in addition to depth dimension, could be studied along the transverse and longitudinal direction. Scouring area is another dimension of the scouring phenomenon that can be affected by parameters. Therefore, the extent of scour area changes in two parts of the scour pattern and bed topography were considered. Nonlinear regression method was used to predict scour depth around bridges. The relationship between experimental data and empirical of other researchers has been verified using experimental data of this study.

**Conclusion:** In the present study, the scour area around the pier group, along the flow direction for two bed and pit hole was studied. The effect of this impression on the pattern and depth of scouring showed that the mining of materials from the upstream of the pier groups led to a decrease and this withdrawal from the downstream, increased the depth and extent of scouring. Therefore, it was observed that the pier groups were more sensitive to the mining of materials from their downstream, and it would be better to take this impression upstream of the pier group. Increasing the number of Froude from 0.25 to 0.5 increased the depth of scouring around the pier group. This increase was more in bigger discharges. Increasing flow Froude number in the bed with the pit hole compared with the non-pit hole bed increases the scour maximum, 33% and 73.5% respectively for A for B.

**Keywords:** Scouring Pattern, Pier Group, Bed Grading, Mining of Material.

# ارزیابی آزمایشگاهی تاثیر برداشت شن و ماسه از بستر رودخانه‌ها بر الگوی آب‌شستگی گروه‌پایه‌های پل

مهدی ماجدی اصل<sup>۱\*</sup>، رسول دانشفراز<sup>۲</sup>، سعیده ولی‌زاده<sup>۳</sup>

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

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

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

\*mehdi.majedi@gmail.com

دریافت: ۱۳۹۸/۰۳/۱۹، پذیرش: ۱۳۹۸/۰۵/۱۴، وب‌گاه نشریه هیدرولیک: www.jhyd.iha.ir

**چکیده:** برداشت شن و ماسه، به‌ویژه از مکان‌هایی با قابلیت کمتر، فراسنجه‌های رسوب و جریان پیرامون پایه‌های پل را تحت تاثیر قرار داده و با ایجاد آشفستگی و افزایش بار رسوبی در جریان، منجر به تاثیرگذاری‌های منفی بر میزان و گستره آب‌شستگی پیرامون پایه‌های پل می‌شود. در این تحقیق، تاثیر برداشت مصالح رودخانه‌ای و فراسنجه‌های هیدرولیکی و رسوبی، بر آب‌شستگی گروه‌پایه پل، بررسی شد. بدین منظور ۲۲ آزمایش در دو دانه‌بندی مختلف A (قطر میانگین ذرات ۰/۷۸ mm) و B (قطر میانگین ذرات ۰/۷۸ mm)، برای دو حالت بستر با گودال و بدون گودال بررسی شد. دو گروه‌پایه با سه پایه متوالی در راستای جریان در بالادست و پایین‌دست بستر متحرکی به طول ۴/۲۵ متر، درون آبراهه‌ای به طول ۱۳ متر و عرض ۱/۲ متر قرار گرفته است. تاثیر برداشت مصالح بر میزان آب‌شستگی در هر دو قسمت بالادست و پایین‌دست گروه‌پایه‌های یاد شده در شرایط جریان زیر بحرانی (محدوده عدد فرود ۰/۱-۰/۵) بررسی شد. نتایج نشان داد که در اعداد فرود ۰/۵ برای هر دو مدل A و B، گستره در پایه اول در بستر بالادست دارای بیشترین مقدار و در اعداد فرود ۰/۲۵ نیز برای هر دو مدل A و B پایه چهارم که در بستر پایین‌دست واقع است، بیشترین گستره آب‌شستگی را به خود اختصاص می‌دهد. بررسی پایین‌دست گروه‌پایه‌ها برای برداشت شن و ماسه، نشان داد که گروه‌پایه‌ها به برداشت مصالح از پایین‌دست خود حساس‌تر هستند. چراکه با برداشت مصالح از بالادست گروه‌پایه، عمق آب‌شستگی کاهش و برداشت از پایین‌دست این گروه‌پایه، عمق آب‌شستگی را افزایش می‌دهد.

**کلید واژگان:** الگوی آب‌شستگی، گروه‌پایه، دانه‌بندی بستر، برداشت مصالح

## ۱- مقدمه

روش‌های دیگر کاهش می‌دهد (Tafarjnoruz et al., 2012). بررسی آزمایشگاهی بیشینه عمق و طول گودال‌های ایجاد شده ناشی از برداشت مصالح رودخانه‌ای در شرایط جریان زیربحرانی نشان دادند که با کاهش عدد فرود و عمق گودال‌ها و همچنین ایجاد جریان ثانویه درون گودال، نسبت بی‌پس شده ارتفاع گودال به عمق اولیه جریان کاهش و نسبت طول و عرض گودال به عمق اولیه جریان افزایش یافت (Daneshfaraz et al., 2018). اقدام‌های دیگری نیز برای مدیریت و مهار آب‌شستگی، همچون استفاده از سنگ‌ریزه در کنار پایه‌ها و ترکیب سنگ‌ریزه و طوقه، بررسی شد (Zarrati et al., 2010).

پیشرفت علم و صنعت و نیاز به ساخت و سازه‌های بیشتر، رودخانه‌ها را به منبع تامین شن و ماسه برای این ساخت و سازه‌ها تبدیل کرده است. لذا امروزه تحقیق در زمینه اصول و قوانین برداشت مصالح از رودخانه‌ها و تاثیر این برداشت بر سازه‌های هیدرولیکی واقع در آبراهه رودخانه، توجه مهندسان هیدرولیک را به خود معطوف کرده است. در تحقیقی روش‌های مختلف تغییر الگوی جریان برای مدیریت و مهار آب‌شستگی پیرامون تک پایه قائم بررسی و مشاهده شد که استفاده از طوقه، پایه نگهبان و شکاف در پایه، بیشینه عمق آب‌شستگی را تا ۳۵ درصد نسبت به

پایین دست سازه‌های آبراهه جریان دارد. (Valizadeh et al., 2018) تاثیر عدد فرود در آب‌شستگی پیرامون گروه‌پایه‌های محافظت شده با کابل در حضور برداشت مصالح را بررسی کرده و نشان دادند که تفاوت میزان آب‌شستگی در بستر بالادست و پایین دست گودال برداشت مصالح در مقایسه با آزمایش‌های با عدد فرود بیشتر محسوس‌تر بوده است که بیانگر تاثیر بیشتر گودال برداشت مصالح در میزان آب‌شستگی برای اعداد فرود پایین است. در تحقیقی نیز با افزودن رس و پلی‌اکریل‌آمید کاتیونی آب‌شستگی پایه‌های پل و گودال‌های ایجاد شده تحت تاثیر برداشت مصالح رودخانه‌ای بررسی شد و مشاهده شد که افزودن رس و پلی‌اکریل‌آمید کاتیونی در بستر منجر به کاهش عمق و طول آب‌شستگی شده است (Rezaei et al., 2018). بررسی صحرایی و آزمایشگاهی چگونگی جابه‌جایی حفره برداشت مصالح نشان داد که سرعت جابه‌جایی حفره‌ها با دبی جریان و طول حفره نسبت مستقیم و با عمق حفره‌ها نسبت معکوس دارد و از بین فراسنجه‌های یاد شده عمق حفره بیشترین تاثیر را بر جابه‌جایی آن داشته است (Amini, 2001).

بررسی تحقیقات پیشین در زمینه آب‌شستگی پایه‌های پل، نشان داد که استفاده از تعدادی پایه با قطر کمتر به عنوان گروه‌پایه به جای تک پایه با قطر بزرگ، در کاهش آب‌شستگی پیرامون پایه‌ها تاثیر بسزایی دارد. همچنین از آنجایی که بررسی‌های انجام گرفته پیشین در زمینه تاثیر برداشت مصالح رودخانه‌ای، تنها بررسی تاثیر برداشت مصالح بر رژیم جریان و بستر رودخانه بوده است، لذا در این تحقیق به بررسی تاثیر منفی برداشت مصالح بر پایه پل و مدیریت و مهار این تاثیر منفی با استفاده از گروه‌پایه پل به جای تک پایه پرداخته شده است. این برداشت در هر دو قسمت بالادست و پایین دست گروه‌پایه‌ها بررسی شد. تاثیر فراسنجه‌های هیدرولیکی و رسوبی در الگوی آب‌شستگی در پیرامون این گروه‌پایه‌ها نیز در این تحقیق بررسی شده است. در ادامه رابطه‌ای برای برآورد عمق آب‌شستگی ارائه و با رابطه‌های به دست آمده دیگر مقایسه شد.

همچنین با بررسی الگوی جریان در گودال آب‌شستگی پیرامون پایه استوانه‌ای مشاهده شد که یک سامانه گردابی به نام گردابه نعل اسبی در جلو پایه و یک سامانه گردابی دنباله‌دار با قدرت بیشتر در پشت پایه ایجاد می‌شود (Graf and Istiarto, 2002). آب‌شستگی پیرامون پایه‌های پل در بستر با درصد رس مختلف، تحت آب صاف و جریان یکنواخت آزمایش شد و رابطه‌هایی برای محاسبه عمق آب‌شستگی پیشنهاد شده (Ansari et al., 2002). نتایج پژوهشی در زمینه فرسایش ناشی از جریان پیرامون پایه قائم در بستر چسبیده نشان داد که آب‌شستگی نهایی توسط قطر پایه، سرعت جریان، عدد رینولدز، عدد فرود، تنش برشی و ویژگی‌های خاک بستر مدیریت و مهار می‌شود. از این رو به ارائه رابطه‌ای بر مبنای این فراسنجه‌های موثر پرداختند (Rambabu et al., 2003). بررسی آزمایشگاهی گروه‌پایه‌های مسلح شده (با آرایش ۷ شکل) در مدیریت و مهار آب‌شستگی نشان داد، گروه پایه‌های مسلح شده در مقایسه با گروه پایه ساده، آب‌شستگی را ۴۶ درصد کاهش داده است (Majedi Asl et al., 2018). توسعه زمانی عمق آب‌شستگی موضعی در بستر ماسه‌ای یکنواخت تحت آب صاف پیرامون پایه‌های استوانه‌ای بررسی شد. نتایج نشان داد که عمق آب‌شستگی پس از ۱۰ درصد زمان تعادل حدود ۵۰ تا ۸۰ درصد می‌باشد (Melville and Chiew, 1999).

همچنین در زمینه بررسی کاربرد گروه‌پایه در کاهش آب‌شستگی، بررسی تاثیر طوقه بر مدیریت و مهار آب‌شستگی در گروه‌پایه‌ها، نشان داد که حضور طوقه در گروه‌پایه‌ها بیشتر از تک پایه‌ها موجب کاهش آب‌شستگی می‌شود (Vittal et al., 1994). بررسی‌های دیگری درباره آب‌شستگی گروه‌پایه‌ها توسط محققان مختلفی صورت گرفته است (Hannah, 1980; Salim and Jones, 1996; Melville et al., 1997; Amini, 2011).

یکی دیگر از عوامل تاثیر گذار در میزان آب‌شستگی پایه‌های پل‌ها، برداشت شن و ماسه از بستر رودخانه‌ها است، که منجر به تغییر الگوی فرسایشی در بالادست و پایین دست گودال ناشی از این برداشت شده که تاثیرگذاری‌های مخربی در کیلومترها بالادست و

## ۲- مواد و روش‌ها

### ۲-۱- تجزیه ابعادی

عمق آب‌شستگی در پیرامون پایه‌های پل متغیر وابسته بوده و به هیدرولیک جریان، ویژگی‌های رسوب و هندسه پایه پل بستگی دارد. بنابراین متغیرهای موثر بر عمق آب‌شستگی به صورت رابطه (۱) معرفی می‌شود.

$$d_{s\max} = f_1(g, d_0, u_*, H, L, B, \vartheta, s_0, d_{50}, \sigma_g, D, t, V, \gamma_s, \gamma, b, t_e) \quad (1)$$

متغیرهای مستقل عبارتند از: ویژگی‌های هیدرولیکی شامل  $g, d_0, u_*$  و ویژگی‌های مربوط به آب و رسوب شامل  $\sigma_g, \gamma_s, \gamma, d_{50}, V$  و ویژگی‌های مربوط به پایه پل شامل  $D, t_e$  و ویژگی‌های هندسی گودال شامل  $H, L, B$  و ویژگی‌های مربوط به آبراهه آزمایشگاهی شامل  $b, s_0$  می‌باشد.  $g$  شتاب گرانش،  $d_0$  عمق اولیه جریان،  $V$  سرعت میانگین جریان،  $u_*$ : سرعت برشی ذرات رسوبی،  $Y_w$  وزن مخصوص آب،  $Y_s$  وزن مخصوص ذرات رسوبی،  $d_{50}$  قطر میانگین ذرات رسوبی،  $B$  عرض گودال ایجاد شده،  $L$  طول گودال،  $H$  ارتفاع گودال،  $V$  لزجت سینماتیکی آب،  $s_0$  شیب کف آبراهه،  $\sigma_g$  انحراف استاندارد ذرات،  $D$  قطر پایه پل،  $t$  زمان آب‌شستگی،  $V$  سرعت میانگین جریان،  $b$  عرض آبراهه و  $t_e$  زمان تعادل آب‌شستگی را نشان می‌دهد. با استفاده از روش پی-باکینگهام نتیجه تجزیه ابعادی فراسنجه‌های دخیل در آب‌شستگی به صورت رابطه (۲) به دست آمده است:

$$\frac{d_{s\max}}{D} = f_2(\text{Re}^*, Fr, \frac{u_*}{V}, \frac{V \times t}{D}, \frac{H}{d_0}, \frac{L}{d_0}, \frac{B}{d_0}, d_{50}, \frac{d_0}{D}, \frac{t}{t_e}, s_0, \sigma_g, \frac{\gamma_s - \gamma}{\gamma}) \quad (2)$$

در معادله بالا،  $\text{Re}^*$  عدد رینولدز ذرات بوده و از رابطه  $\text{Re}^* = \frac{u_* d_s}{\nu}$  به دست می‌آید.  $Fr$  عدد فرود و  $d^*$  قطر میانگین بی‌بعد شده ذرات بستر است. با توجه به اینکه شیب بستر ثابت می‌باشد، می‌توان از  $s_0$  صرف نظر کرد. لازم به یادآوری است با وجود اینکه مدت زمان رسیدن عمق آب‌شستگی به تعادل بسیار طولانی است و تغییرات

عمق آب‌شستگی در فواصل زمانی اندازه‌گیری شده ناچیز بوده است، از این‌رو از فراسنجه  $\frac{v \times t}{D}$  نیز صرف نظر شده است (Özalp and Bozkuş, 2013). بنابراین رابطه (۲) به صورت رابطه (۳) به دست می‌آید. لذا رابطه (۲) به صورت رابطه (۳) ارائه می‌شود:

$$\frac{d_{s\max}}{D} = f_3(\text{Re}^*, Fr, \frac{H}{d_0}, \frac{L}{d_0}, \frac{B}{d_0}, d_{50}, \frac{d_0}{D}, \frac{t}{t_e}, \sigma_g, \frac{\gamma_s - \gamma}{\gamma}) \quad (3)$$

### ۲-۲- تجهیزات آزمایشگاهی

برای بررسی آب‌شستگی گروه‌پایه‌های پل، در این تحقیق ۲۲ آزمایش با شرایط آزمایشگاهی یکسان در آبراهه‌ای با مقطع مستطیلی به طول ۱۳ m، عرض ۱/۲ m و عمق ۰/۸ m، آزمایش شد. در همه‌ی آزمایش‌ها عمق آب‌شستگی با استفاده از دستگاه عمق‌سنج با دقت  $\pm 1 \text{ mm}$  اندازه‌گیری شد. دبی‌های مورد نظر توسط دستگاه دبی‌سنج فراصوت با دقت  $\pm 0.1$  لیتر بر ثانیه خوانده شدند. همچنین نیم‌رخ بستر بالادست و پایین‌دست و نیم‌رخ گودال پس از پایان آزمایش‌ها و خشک شدن آب بستر، توسط اسکنر سه‌پسی برداشت شد. شیب آبراهه توسط یک جک قابل تغییر بود. در این تحقیق شیب برای همه آزمایش‌ها صفر تنظیم شد. آب مورد نیاز برای آزمایش‌ها در آبراهه مربوطه، به صورت چرخه‌ای توسط پمپی با قدرت پمپاژ ۷ lit/s تا ۵۲ lit/s تامین شد (شکل ۱). برای آرام کردن جریان و کاهش افت انرژی هنگام ورود جریان بر روی کف‌بند از رمپ استفاده شد. همچنین آشفتگی جریان در آغاز توسط یک منبع آرام کننده در آغاز آبراهه و پس از آن با عبور از دو صفحه مشبک کاهش یافت. در ادامه نیز از یک صفحه شناور پس از صفحه‌های مشبک، برای کاهش بیشتر آشفتگی جریان استفاده شد. دو کف کاذب شیشه‌ای در بالادست و پایین‌دست به فاصله ۴/۲۵ m از هم و ارتفاع ۲۲ cm در میانه آبراهه نصب شد. در آغاز هر آزمایش، بستر ماسه‌ای به آرامی اشباع شد بدین‌صورت که در آغاز دریچه انتهایی بسته و پمپ روشن می‌شد. آب با دبی بسیار کم در بستر جریان پیدا کرده تا مانع از ناهمواری در بستر شود. آنگاه به آرامی دبی به حد

آب‌شستگی در یک ساعت، به  $1\text{ mm}$  می‌رسید، آب‌شستگی به تعادل رسیده و آزمایش متوقف می‌شد. بستر متحرک ماسه‌ای، با ارتفاع  $22\text{ cm}$  در بین کف‌بندها ریخته و متراکم شد. دو ردیف گروه‌پایه در بالادست و پایین‌دست بستر با فاصله مشخص از کف‌بندها واقع شد که در شکل ۲ مشاهده می‌شود.

مورد نظر افزایش یافته و عدد فرود و عمق مورد نظر، با باز کردن دریچه تنظیم شد. پس از هر آزمایش پمپ خاموش و آب آبراهه زهکشی می‌شد. اندازه‌گیری‌های عمق آب‌شستگی در طول آزمایش در آغاز با فاصله زمانی  $30$  دقیقه از آغاز آزمایش پس از آن هر یک ساعت یکبار برداشت شد. در مواقعی که میزان افزایش عمق

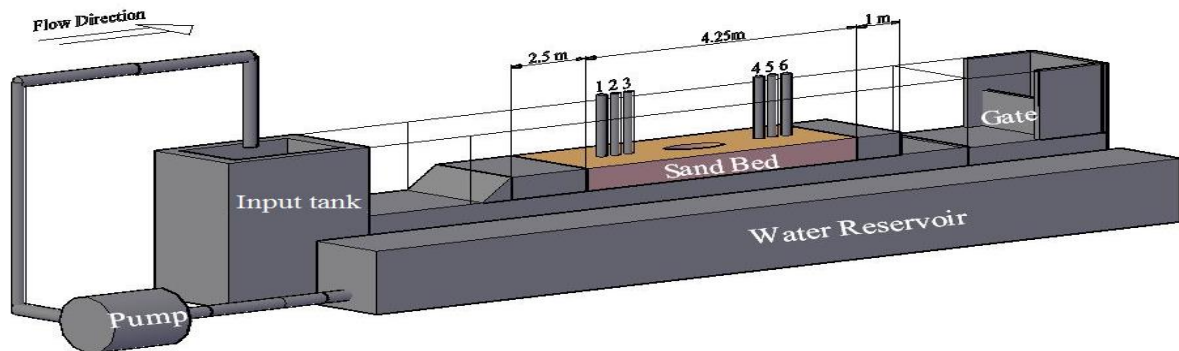


Fig. 1 Schematic laboratory channel

شکل ۱ نمای کلی آبراهه آزمایشگاهی

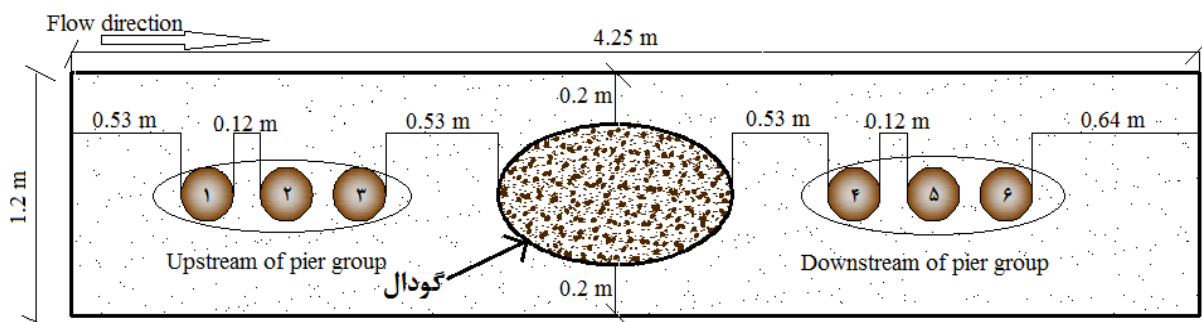


Fig. 2 Movable bed

شکل ۲ بستر متحرک

یکنواختی ذرات بستر ( $C_u$ ) و برخی از فراسنجه‌های دیگر رسوب در جدول ۱ آورده شده است. در هر دو دانه‌بندی  $A$  و  $B$ ، جریان با سه دبی مختلف  $15$ ،  $30$  و  $45\text{ lit/s}$  در سه عدد فرود  $0.1$ ،  $0.25$  و  $0.5$  وارد آبراهه شد. برای بررسی، تاثیر گودال حاصل از برداشت مصالح در میزان آب‌شستگی، این برداشت، هم از بالادست و هم از پایین‌دست گروه‌پایه‌ها انجام گرفت.

$\tau_{cr}$  و  $d^*$  توسط رابطه (۴) و (۵) محاسبه شده است (Julien, 2010).

$$\tau_{cr} = \frac{0.3}{1 + 1.2 \times d^*} + 0.055(1 - \exp(-0.02 \times d^*)) \quad (4)$$

گروه‌پایه‌ها با آرایش یکسان (سه پایه متوالی در راستای جریان و در مرکز عرض آبراهه) به فاصله مرکز به مرکز  $21\text{ cm}$  از هم قرار گرفت. برای از بین بردن تاثیر دیواره آبراهه بر آب‌شستگی موضعی باید نسبت فاصله مرکز پایه تا دیواره آبراهه به قطر پایه، بالاتر از  $6/25$  باشد. لذا در این تحقیق از پایه به قطر  $9\text{ cm}$  استفاده شد. برای جلوگیری از تشکیل شکنج، قطر میانگین ذرات بستر نباید کمتر از  $0.7\text{ mm}$  و نسبت قطر پایه به میانگین ذرات باید بیشتر از  $25-30$  باشد (Raudkivi and Ettema, 1983). بنابراین آزمایش‌ها در دو نوع بستر متفاوت با قطرهای میانگین  $0.78\text{ mm}$  (دانه‌بندی  $A$ ) و  $1.7\text{ mm}$  (دانه‌بندی  $B$ ) آزمایش شد. ضریب

جدول ۱ فراسنجه‌های رسوبی مربوط به دانه‌بندی ۱ و ۲

Table 1 Sediment parameters for grain size 1 and 2

Model	$d_{50} \text{ mm}$	$\tau_{cr}$	$\tau^*$	$d^*$	$u^*$	$\sigma_g$	$C_u$
1	0.78	0.03	0.13226	19.73	0.0115	1.6	1.45
2	1.8	0.038	0.13229	45.53		1.23	1.68

و پایین‌دست به ترتیب از  $d_{s1}$  تا  $d_{s6}$  معرفی شده است.

$$d^* = [g(s-1) / \rho^2]^{1/3} \times d_{50} \quad \text{و} \quad s = \frac{\rho_s}{\rho} \quad (5)$$

### ۳-۱- عمق آب‌شستگی

یکی از مهم‌ترین ابعاد در موضوع آب‌شستگی، بررسی عمق آب‌شستگی و فراسنجه‌های موثر بر این عمق است. برداشت شن و ماسه از بستر رودخانه‌ها و دانه‌بندی بستر از مهم‌ترین عامل‌های موثر بر عمق آب‌شستگی پیرامون پایه‌های پل به‌شمار می‌رود. بنابراین در این تحقیق بررسی میزان عمق آب‌شستگی در دو بخش بستر بدون گودال و بستر با گودال بررسی شد. نمونه‌ای از آب‌شستگی در پیرامون گروه پایه پل (دبی ۳۰ لیتر برثانیه و عدد فرود ۰/۵، برای دانه‌بندی B)، در شکل ۳ ارائه شده است.

### ۳- نتایج و بحث

در این تحقیق، برای بررسی تاثیر فراسنجه‌های هیدرولیکی، رسوبی و برداشت مصالح رودخانه‌ای، در الگوی آب‌شستگی گروه پایه‌های پل ۲۲ آزمایش برابر جدول ۲ انجام گرفت. آزمایش‌ها در چهار بخش، شامل دو دانه‌بندی A ( $178 \text{ mm}$ ) و  $d_{50} = B$  ( $18 \text{ mm}$ ) و هر دانه‌بندی با دو حالت بستر بدون گودال و با گودال بررسی شد. عمق آب‌شستگی در جلوی تک تک پایه‌ها و زمان رسیدن عمق آب‌شستگی به تعادل، برای همه آزمایش‌ها آورده شده است. عمق آب‌شستگی در جلوی هر شش پایه مربوط به گروه پایه بالادست

جدول ۲ عمق آب‌شستگی پایه‌های گروه پایه‌های واقع در بالادست و پایین‌دست

Table 2 Depth of scouring of pier groups in upstream and downstream

Model	Run	$Q$ $m^3/s$	$Fr$	$d_{50}$ $cm$	$d_0$ $cm$	$V_c$ $m/s$	$t_e$ $h$	$d_{s1}$ $cm$	$d_{s2}$ $cm$	$d_{s3}$ $cm$	$d_{s4}$ $cm$	$d_{s5}$ $cm$	$d_{s6}$ $cm$
A	1	0.015	0.1	0.078	10	0.17	7	2	0.4	-0.4	1.4	0.6	0.2
	2	0.03	0.1	0.078	18	0.2	4	2	0.8	1.2	2.1	1.7	1.7
	3	0.045	0.1	0.078	24	0.2	7	1.5	1.1	1.7	3.7	3	3
	4	0.015	0.25	0.078	6	0.17	8.5	3.8	0.2	3	4.1	1.8	2.6
	5	0.03	0.25	0.078	10	0.17	9	6.9	7	3.9	10	6.9	4
	6	0.045	0.25	0.078	13	0.19	9	10	9.8	6.9	12.4	8.9	6
	7	0.015	0.5	0.078	4	0.16	8	11.8	8.4	4.4	7	5	2.9
	8	0.03	0.5	0.078	6	0.17	7.5	15.6	12.3	11	12	11	8.5
	9	0.045	0.5	0.078	8	0.17	....	....	....	....	....	....	....
B	10	0.015	0.1	0.17	10	0.17	0	0	0	0	0	0	0
	11	0.03	0.1	0.17	18	0.21	0	0	0	0	0	0	0
	12	0.045	0.1	0.17	24	0.21	0	0	0	0	0	0	0
	13	0.015	0.25	0.17	6	0.15	2	0.7	0.7	0.8	2.26	2	1.7
	14	0.03	0.25	0.17	10	0.17	5.5	1.8	1.6	2.5	4.9	2.3	2.3
	15	0.045	0.25	0.17	13	0.19	6	4	3	2.2	6.5	4.7	3.5
	16	0.015	0.5	0.17	4	0.16	4.5	9	2.4	2.9	3.6	2	3.6
	17	0.03	0.5	0.17	6	0.17	7.5	13.4	9.5	7.5	10.5	7.5	5.6
	18	0.045	0.5	0.17	8	0.17	6	16.6	12.6	11.1	11.1	9.8	7.3
Without pit hole	A5	0.03	0.25	0.078	10	0.17	5	8	6	6.5	11	7	5.5
	A8	0.03	0.5	0.078	6	0.17	6.5	15	9.5	6.9	10.9	9.3	7
	B5	0.03	0.25	0.17	10	0.17	1	2.1	1.3	1.5	5.3	2.5	1.4
	B8	0.03	0.5	0.17	6	0.17	7.15	12.1	8.4	6.1	10.8	8.4	6.1

خود را راحت تر از دست داده و با شتاب بیشتر تحت تاثیر قرار می گیرند. همچنین به دلیل بیشتر بودن نیروی مقاوم ذرات در دانه بندی B، مقدار آبشستگی نهایی کمتر از دانه بندی ریزتر (A) است. از این رو دانه بندی B با دانه بندی درشت تر، میزان آبشستگی کمتری در مقایسه با دانه بندی A داشته است. نتایج نشان داد که در عدد فرود ۰/۵ با برداشت مصالح از بالادست گروه پایه ها در دانه بندی A، عمق آبشستگی از ۱۲ به ۱۰/۹ سانتی متر رسیده است. این در حالی است که برداشت از پایین دست پایه ها در همین عدد فرود دانه بندی، موجب افزایش بیشینه عمق آبشستگی از ۱۵ به ۱۵/۶ سانتی متر شده است. همچنین بیشینه عمق آبشستگی در دبی ۱۵ لیتر بر ثانیه، برای دانه بندی B در مقایسه با دانه بندی A، در عدد فرود ۰/۲۵ و ۰/۵ به ترتیب ۴۴/۸۷ درصد در پایه چهارم و ۶۱/۸۶ درصد در پایه اول، کمتر مشاهده شده است که علت آن بیشتر توضیح داده شد.

**۳-۱-۳- مقایسه بستر بدون گودال و بستر با گودال**  
مقایسه آزمایش ها بستر با گودال و بدون گودال برای دو دانه بندی A و B، نشان داد که افزایش عدد فرود در حالت با گودال، بستر پایین دست را بیشتر از حالت بدون گودال، تحت تاثیر قرار می دهد. به طوری که افزایش عدد فرود در بستر با گودال در مقایسه با بستر بدون گودال، بیشینه آبشستگی را برای دانه بندی A، ۳۳ درصد و برای دانه بندی B، ۷۳/۵ درصد، بیشتر افزایش می دهد. همچنین مشاهده شد که برداشت مصالح از بالادست گروه پایه ها منجر به کاهش آبشستگی در پیرامون آنها شده است. این در حالی است که این برداشت از پایین دست گروه پایه ها نتیجه عکس داشته و میزان آبشستگی را افزایش می دهد. علت این امر را چنین می توان بیان کرد که با عبور جریان از گروه پایه های بالادست و رسیدن به گودال، افت ناگهانی بستر منجر به تغییر الگوی جریان و برگشت جریان به سمت بالادست می شود. این پدیده که آبشستگی بالارونده نام دارد موجب افزایش آبشستگی در بستر بالادست می شود. از سوی دیگر افت تراز بستر، با افزایش عمق و کاهش سرعت



Fig. 3 Scouring sample around the base group  
شکل ۳ نمونه ای از آبشستگی پیرامون گروه پایه

**۳-۱-۱- بررسی عمق آبشستگی در بستر بدون گودال**  
عمق آبشستگی برای همه پایه ها در آزمایش های مربوط به بستر بدون گودال در دو دانه بندی A و B (با دبی  $lit/s$  ۳۰ و به ترتیب اعداد فرود ۰/۲۵ و ۰/۵)، در یک بستر ماسه ای با دو ردیف گروه پایه در بالادست و پایین دست بستر بررسی شد. نتایج نشان داد که برای هر دو دانه بندی A و B، در عدد فرود ۰/۵، پایه اول دارای بیشترین عمق آبشستگی و برای عدد فرود ۰/۲۵، پایه چهارم بیشترین عمق آبشستگی را به خود اختصاص داده است. نتایج نشان داد که دانه بندی با ذرات درشت تر (B)، دارای عمق آبشستگی کمتری نسبت به بستر با دانه بندی ریز (A) دارد. به طوری که بیشینه عمق آبشستگی برای دانه بندی B در عدد فرود ۰/۵ و ۰/۲۵، به ترتیب ۱۴/۱۰ و ۴۷/۵۸ درصد کمتر از دانه بندی A، به دست آمده است. همچنین افزایش عدد فرود از ۰/۲۵ به ۰/۵، به دلیل کاهش عمق جریان و افزایش سرعت در یک مقطع خاص، در همه پایه ها میزان آبشستگی را افزایش داده است. این افزایش در دانه بندی B با ذرات درشت تر بیشتر به چشم می خورد.

**۳-۱-۲- بررسی عمق آبشستگی در بستر با گودال**  
در این بخش از تحقیق ۱۸ آزمایش در دو نوع دانه بندی A و B برای بستر با گودال بررسی شد. با توجه به اهمیت شناخت اصول و قواعد برداشت مصالح از رودخانه ها، این برداشت در آزمایش های یاد شده، در بالادست و هم در پایین دست گروه پایه ها بررسی شد. مشاهده شد که عمق آبشستگی و زمان تعادل آبشستگی در همه پایه ها برای دانه بندی B، کمتر از دانه بندی A به دست آمده است. به عبارت دیگر هرچه ذرات درشت تر گردد با افزایش عدد فرود و در نتیجه آن افزایش سرعت جریان، ذرات تعادل



دانه‌بندی A در بستر بدون گودال، نزدیک به ۴ برابر دانه‌بندی B است، ولی عمق آب‌شستگی بستر اول با شیب کمتری در نتیجه افزایش عدد فرود افزایش می‌یابد. همچنین کمترین نسبت  $d_s/D$  در عدد فرود ۰/۲۵ مربوط به مدل B با بستر بدون گودال برداشت مصالح است این در حالی است که دانه‌بندی A با بستر بدون گودال جزء مدل‌های با بیشترین آب‌شستگی در این عدد فرود است.

از آنجایی که عمق اولیه جریان تاثیر مستقیمی بر عمق آب‌شستگی دارد، در شکل ۶ که منحنی نسبت بی‌بعد شده عمق اولیه جریان به قطر پایه در مقابل نسبت بی‌بعد شده عمق آب‌شستگی به قطر پایه را نشان می‌دهد این تاثیر به‌وضوح مشاهده می‌شود. شکل مربوطه برای دبی‌های مختلف در دو بستر با  $d^*$  (قطر میانگین بی‌بعد شده) متفاوت ۱۹/۷۳ و ۴۵/۵۳ رسم شده است. تفسیر این شکل نشان می‌دهد که در هر سه دبی و برای هر دو  $d^*$ ، با افزایش نسبت  $d_0/D$  نسبت  $d_s/D$  یا به عبارت دیگر مقدار عمق آب‌شستگی کاهش می‌یابد. بنابراین می‌توان بیان کرد که میزان عمق آب‌شستگی صرف نظر از مقدار عدد فرود، رابطه عکس با میزان عمق اولیه جریان داشته است. شیب منحنی‌های مربوط به  $d^*$  برابر با ۱۹/۷۳ در مقایسه با شیب منحنی‌های بستر با  $d^*$  برابر با ۴۵/۵۳ در نسبت‌های  $d_0/D$  پایین‌تر، کمتر است. این در حالی است که با افزایش نسبت بی‌بعد شده  $d_0/D$ ، شیب منحنی‌های نقطه‌چین ( $d^*=۱۹/۷۳$ ) کمتر از منحنی‌های خط صاف ( $d^*=۱۹/۷۳$ ) است. بنابراین مشخص است که در  $d^*$  بزرگ‌تر، مقدار  $d_s/D$  با افزایش نسبت  $d_0/D$ ، با شیب متغیری کاهش می‌یابد.

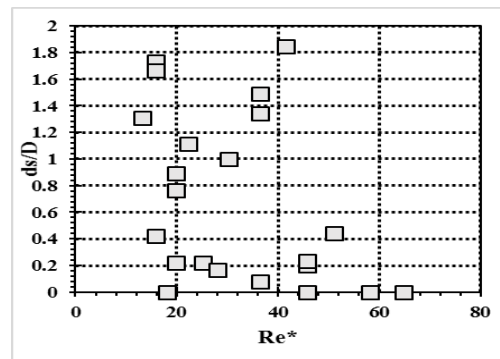


Fig. 4 Scour depth values against  $Re^*$

شکل ۴ مقادیر عمق آب‌شستگی در مقابل عدد رینولدز برشی

جریان، موجب می‌شود که جریان با عدد فرود کمتری وارد بستر پایین‌دست شده و این بستر را کمتر دچار آب‌شستگی کند. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که آب‌شستگی پایه‌های پل به چاله‌های پایین‌دست حساس‌تر بوده و در حد امکان می‌بایست برداشت مصالح از بالادست پایه‌ها انجام گیرد. شکل ۴ منحنی تاثیر  $Re^*$  بر میزان عمق آب‌شستگی بدون پس را نشان می‌دهد، مشاهده می‌شود که در اعداد رینولدز برشی بزرگ‌تر، آب‌شستگی کمتر رخ داده است.

### ۳-۲- بررسی تاثیر عدد فرود و عمق اولیه جریان

در شکل ۵ مشاهده می‌شود که در اعداد فرود ۰/۱ در مدل‌های B آب‌شستگی رخ نداده است. شیب منحنی عدد فرود- نسبت عمق آب‌شستگی به قطر پایه، به دبی بستگی داشته و با افزایش دبی افزایش می‌یابد. در این شکل دو آزمایش مربوط به بستر بدون گودال نیز مشاهده می‌شود که مربوط به دبی ۳۰ لیتر بر ثانیه در عدد فرود ۰/۵ برای دو مدل A و B است. این منحنی‌ها نشان می‌دهند که با وجود اینکه مقادیر نسبت  $d_s/D$  در عدد فرود ۰/۲۵ برای

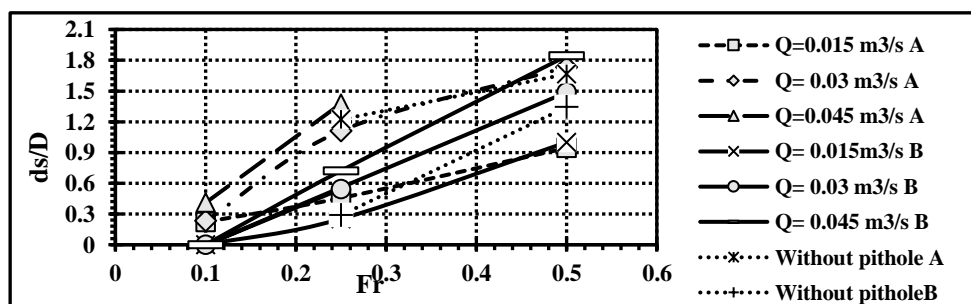


Fig. 5 Curve of the values of the Froude number versus the ratio  $d_s/D$

شکل ۵ منحنی مقادیر عدد فرود در مقابل نسبت  $d_s/D$

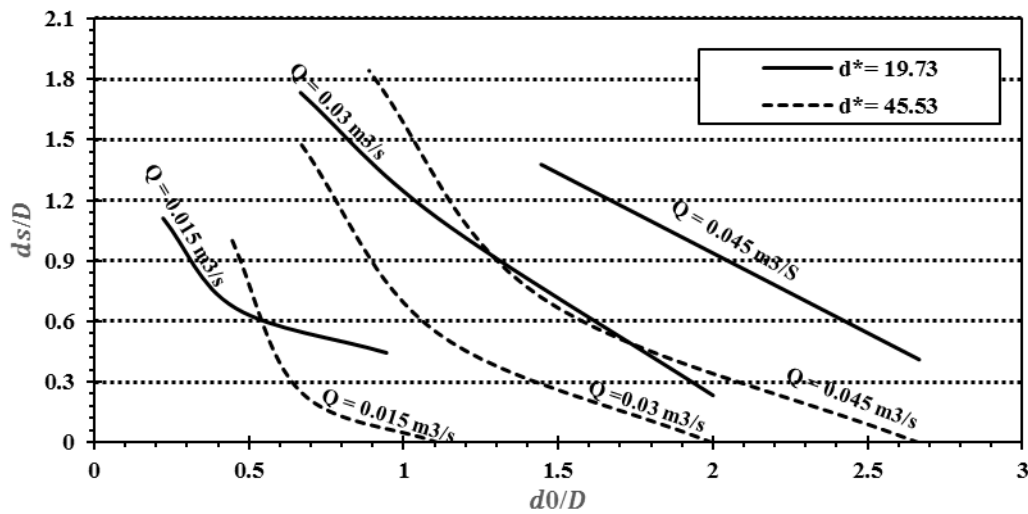


Fig. 6 Curve of the ratio of the  $d_0 / D$  ratio to the ratio of the  $d_s / D$  in different  $d^*$

شکل ۶ منحنی مقادیر نسبت بی بعد شده  $d_0 / D$  در مقابل نسبت بی بعد شده  $d_s / D$  در  $d^*$  های مختلف

و تجاوز از سرعت بحرانی منجر به رسوبی شدن جریان و به عبارتی تبدیل بستر ثابت به بستر زنده شده است. همچنین در مقدار ثابت  $V/V_c$ ، نسبت  $d_s / D$  برای دبی ۴۵ لیتر بر ثانیه در بستر با قطر میانگین ذرات ۱/۸ (مدل B)، در مقایسه با بستر با قطر میانگین ۰/۷۸ میلی متر (مدل A)، مقدار کمتری را به خود اختصاص داده است. همچنین می توان دریافت که با افزایش نسبت سرعت ها در یک دبی خاص، عمق آب شستگی یا به عبارتی نسبت بی بعد شده  $d_s / D$  کاهش می یابد.

$$\frac{V_c}{u_*} = 5.75 * \log(5.53 \frac{d_0}{d_{50}}) \quad (6)$$

### ۳-۳- بررسی آستانه حرکت ذرات

نسبت های  $V/V_c$  کمتر از یک جریان آب صاف بوده و بستر رسوبی ثابت است. هنگامی که سرعت میانگین جریان از سرعت بحرانی تجاوز می کند بستر آغاز به حرکت کرده و جریان به جریان رسوبی تبدیل می شود. سرعت بحرانی در این تحقیق از رابطه (۶) به دست آمده و نسبت بی بعد شده سرعت میانگین به سرعت بحرانی در مقابل نسبت بی بعد شده عمق آب شستگی به قطر پایه در شکل ۷ رسم شده است. مشاهده می شود که در جریان های با عمق بیشتر نسبت  $V/V_c$  کمتر از یک است که بیانگر جریان با اب زلال و برای اعداد فرود ۰/۲۵ و ۰/۵ که عمق جریان ناچیز است افزایش سرعت میانگین جریان

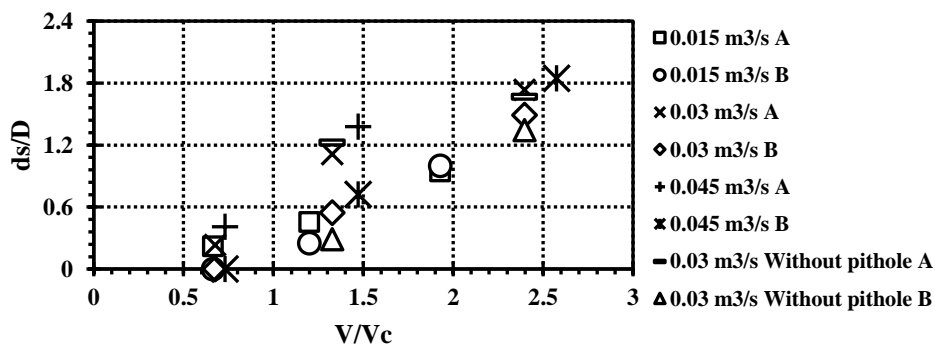


Fig. 7 Curve of Dimensionless ratio Velocity versus Displacement Depth to Dimensionless scour depth

شکل ۷ منحنی مقادیر نسبت بی بعد شده سرعت به سرعت بحرانی در مقابل نسبت بی بعد شده عمق آب شستگی به قطر پایه

### ۳-۴- گستره آب‌شستگی

پدیده آب‌شستگی علاوه بر پس عمق، در راستای عرضی و طولی نیز قابل بررسی است. گستره آب‌شستگی یکی دیگر از ابعاد پدیده آب‌شستگی است که تحت تاثیر فراسنجهایی می‌تواند قرار گیرد. بنابراین در این بخش از تحقیق، میزان تغییرات گستره آب‌شستگی در دو بخش الگوی آب‌شستگی و عوارض بستر بررسی شد.

#### ۳-۴-۱- بررسی عوارض بستر

با بررسی و تحلیل آزمایش‌ها انجام گرفته در این تحقیق مشاهده شد که در عدد فرود  $0/5$  سرعت جریان به قدری زیاد است که با وارد شدن جریان به درون آبراهه روند تغییرات نیم‌رخ بستر تغییر یافته و پایه‌های بالادست به‌ویژه پایه اول به سرعت دچار آب‌شستگی می‌شود. این مفهوم را می‌توان در شکل ۸ (عوارض بستر بالادست و پایین‌دست چهار آزمایش مختلف با اعداد فرود  $0/5$  و  $0/25$  برای دبی  $30$  لیتر بر ثانیه در دو مدل A و B پس از رسیدن به آب‌شستگی نهایی) به روشنی مشاهده کرد. تمرکز خطوط پیرامون پایه‌های ۱ و ۴ بیانگر تغییرپذیری‌ها بیشتر عمق آب‌شستگی پیرامون این پایه‌ها و تاثیر بیشتر الگوی جریان در پایه‌های جلویی هر گروه پایه است. با توجه به شکل ۷، نه تنها در پایه‌های اول گروه پایه‌های واقع در بالادست و پایین‌دست عمق آب‌شستگی بیشترین مقدار را به خود اختصاص داده است بلکه گسترش آب‌شستگی در عرض و طول نیز (گستره آب‌شستگی) در این پایه‌ها بیشترین مقادیر را داشته که در ادامه در این مورد بیشتر توضیح داده خواهد شد.

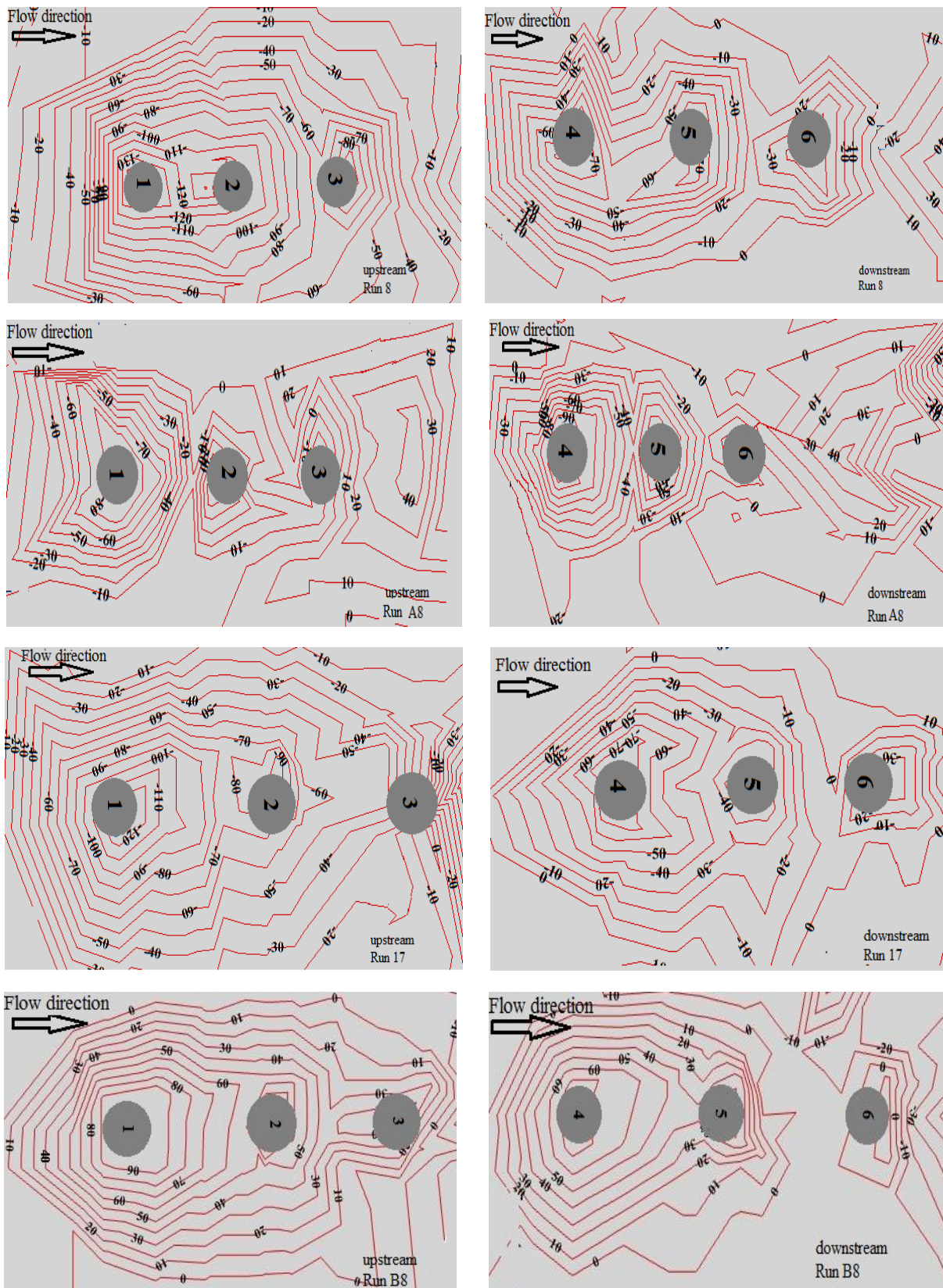
#### ۳-۴-۲- بررسی الگوی آب‌شستگی

در جدول ۳ مقادیر گسترش آب‌شستگی در راستای Y (عرض آبراهه) و X (طول آبراهه) به همراه تصویرهایی کلی از الگوی آب‌شستگی پیرامون پایه‌ها برای برخی از آزمایش‌های مربوط به بستر بدون گودال و بستر با گودال آورده شده است. همه‌ی الگوهای آب‌شستگی پیرامون پایه‌ها، بلافاصله پس از پایان آزمایش رسم شده‌اند. روند کار به این صورت بود که در آغاز تصویرهای دیجیتالی الگوی

آب‌شستگی در پلان گرفته شد. پس از آن با مقایسه عکس و الگوی واقعی آب‌شستگی درون آبراهه آزمایشگاهی، نمای کلی این الگو در نرم افزار اتوکد رسم شد. همان‌طور که مشاهده می‌شود بیشترین گستره آب‌شستگی مربوط به آزمایش ۸ با دبی  $30$  لیتر بر ثانیه و عدد فرود  $0/5$  در بستر با قطر میانگین  $0/78$  میلی‌متر برای بالادست گودال است که در راستای عرض آبراهه  $38$  سانتی‌متر و در راستای طول آبراهه  $64/5$  سانتی‌متر گسترش پیدا کرده است. مقایسه شکل‌ها نشان می‌دهد که عمق و گستره آب‌شستگی از یک روند پیروی می‌کنند. چنین می‌توان بیان کرد که در اعداد فرود  $0/5$  برای هر دو مدل A و B، گستره در پایه اول در بستر بالادست دارای بیشترین مقدار و در اعداد فرود  $0/25$  نیز برای هر دو مدل A و B پایه چهارم که در بستر پایین‌دست واقع است بیشترین گستره آب‌شستگی را به خود اختصاص می‌دهد. با دقت در تصویرهای می‌توان دریافت که پایه میانی در هر دو گروه پایه بالادست و پایین‌دست همه مدل‌ها در گستره کمتری نسبت به پایه جلویی و عقبی خود دچار آب‌شستگی شده‌اند. همان‌طور که پیشتر نیز به آن اشاره شد علت این امر می‌تواند غلبه تاثیر نگره‌بانی این پایه از پایه عقبی، بر تاثیر محافظت‌شوندگی از جانب پایه جلویی باشد. همچنین پایه وسط از دو طرف تحت تاثیر جریان برخوردی به پایه‌های پیرامون بوده و می‌توان گفت که نمی‌تواند الگوی حاصل از آب‌شستگی در پیرامون خود را به‌طور کامل نشان دهد. در برخی آزمایش‌ها از جمله آزمایش ۱۸ و ۷ که مربوط به اعداد فرود  $0/5$  می‌باشند مشاهده می‌شود که سرعت جریان به قدری زیاد است که گستره گودال حاصل از آب‌شستگی در پایه اول از گروه پایه‌ها، تا پایه‌های پسی نیز ادامه پیدا کرده و گودال آب‌شستگی مربوط به پایه‌های پشتی را تحت تاثیر خود قرار داده است.

### ۴- مقایسه با رابطه‌های تجربی دیگر محققان

برآورد دقیق پدیده عمق آب‌شستگی در شرایط آزمایشگاهی و صحرایی، با استفاده از فراسنجه‌های موثر، مستلزم دسترسی به تجهیزات و دستگاه‌های اندازه‌گیری



**Fig. 8** Upstream and downstream topography after final scouring  
 شکل ۸ عوارض بستر بالادست و پایین دست پس از آب‌شستگی نهایی

جدول ۳ مقادیر گستره آبشستگی در راستای طولی و عرضی آبراهه و نمای کلی الگوی آبشستگی

**Table 3** Scaling area in the longitudinal and transverse direction of the channel and schematic scouring pattern

<i>Y</i> CM	<i>X</i> CM	<i>Upstream bed</i>	<i>Y</i> CM	<i>X</i> CM	<i>Downstream bed</i>
29	24	<p>Run 15</p>	25	20	<p>Run 15</p>
24	16		22.5	19	
23	15		23	23	
26.5	20	<p>Run 14</p>	26	21	<p>Run 14</p>
17	22		17	18	
22	16		25	16	
9.5	11	<p>Run 13</p>	17	15	<p>Run 13</p>
14.5	13		17	15	
16.5	15		18	13	
59	41.5	<p>Run 18</p>	47	29	<p>Run 18</p>
28	27		25	24	
33	20		32	20	
51	39	<p>Run 17</p>	41	31	<p>Run 17</p>
23	21		24	19	
33	22		34	24	
38	30	<p>Run 16</p>	40.5	27	<p>Run 16</p>
18	19		9	20	
23	24		27	22	

64.5	38		40	35	
22.5	23		22	23	
23	24		26	22	
51	32		43	30	
19	23		16	23	
21	27		19	21	
44	35		43	32	
28	26		28	22	
23	24		24	24	
38	29		41.5	30	
24.5	21		6.5	21	
29	26		26	26	
21	23		22.5	25	
16	24		15	20	
25	15		23.5	25	

$$\frac{d_s}{D} = 74.44(Fr)^{1.9}(\tau^*)^{0.13} \quad (7)$$

$$\left(\frac{d_0}{D}\right)^{1.12} / \left(\frac{d_{50}}{D}\right)^{0.2}$$

نتایج پیش‌بینی نسبت عمق آب‌شستگی به قطر پایه پل  
 (۴) بر مبنای چهار رابطه ارائه شده توسط محققان  
 مختلف و رابطه ۷ محاسبه و در شکل ۹ آورده شده است.

پیشرفته است. بنابراین محققان برای پیش‌بینی عمق  
 آب‌شستگی و همچنین صحت‌سنجی نتایج تحقیق خود به  
 ارائه رابطه‌های تجربی غیرخطی و خطی پرداخته‌اند (جدول  
 ۴). در این تحقیق برای پیش‌بینی عمق آب‌شستگی  
 پیرامون پایه‌های پل از روش رگرسیون غیرخطی استفاده  
 شده و رابطه (۷) ارائه شده است. رابطه‌ی به‌دست‌آمده با  
 رابطه‌های تجربی محققان دیگر با استفاده از داده‌های  
 آزمایشگاهی این تحقیق صحت‌سنجی شده است.

جدول ۴ رابطه‌های تجربی محققان مختلف برای برآورد عمق آب‌شستگی

Table 4 Experimental relationships of different researchers to estimate the scour depth

Researcher	Scour Equation
This study	$\frac{d_s}{D} = 74.44(Fr)^{1.9}(\tau^*)^{0.13}\left(\frac{d_0}{D}\right)^{1.12} / \left(\frac{d_{50}}{D}\right)^{0.2}, 0.1 \leq Fr \leq 0.5$
Melville (1997)	$\frac{d_s}{D} = \frac{v}{v_c} * 0.57 \log\left(2.24 \frac{D}{d_{50}}\right) * k_{yd}$ $k_{yd} = 2.4 \rightarrow \frac{D}{d_0} \leq 0.7$ $k_{yd} = 2\sqrt{\frac{d_0}{D}} \rightarrow 0.7 \leq \frac{D}{d_0} \leq 5, k_{yd} = 4.5 \rightarrow \frac{d_0}{D} > 5$
CSU (Richardson 2001)	$\frac{d_s}{D} = 2k_3 \left(\frac{d_0}{D}\right)^{0.35} Fr^{0.43}$ , $k_3 = 1.1 \rightarrow$ plane bed
Jain (1981)	$\frac{ds}{D} = 1.41\left(\frac{y^0}{D}\right)^{0.3} \left(\frac{uc}{\sqrt{gy^0}}\right)^{0.25}$
Hancu (1971)	$\frac{ds}{D} = 2.42\left(\frac{2V}{V_c} - 1\right) \left(\frac{V^2}{gD}\right)^{1.3}$

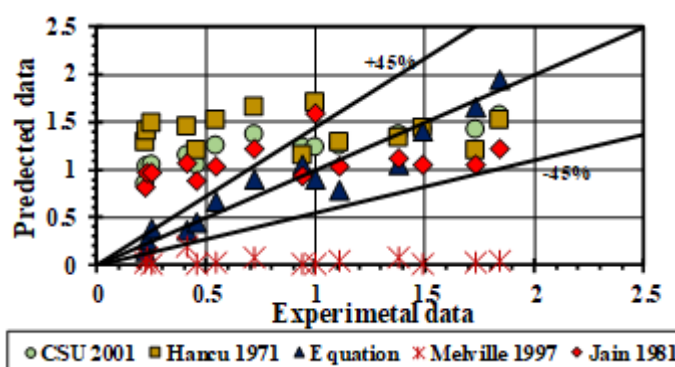


Fig. 9 Curve comparison of the experimental relationships of different researchers with the relationship provided in the present Study

شکل ۹ منحنی مقایسه رابطه‌های تجربی محققان مختلف با رابطه ارائه شده در این تحقیق

زیادی همراه است. همه‌ی داده‌های پیش‌بینی شده توسط رابطه غیرخطی به‌دست آمده در این تحقیق بین خط ۴۵٪- و ۴۵٪+ قرار داشته که بیانگر عملکرد مناسب رابطه مربوطه در پیش‌بینی عمق آب‌شستگی پیرامون پایه‌های پل است.

### ۵- نتیجه‌گیری کلی

در این تحقیق میزان آب‌شستگی پیرامون گروه‌پایه، واقع در راستای جریان برای دو حالت بستر با گودال برداشت مصالح و بستر بدون گودال برداشت مصالح بررسی شد. با توجه به حجم زیاد آزمایش‌ها و زمان تعادل بالا برای هر آزمایش، در این تحقیق آزمایش‌ها در دو دانه‌بندی A (بستر با قطر میانگین ذرات ۷۸ mm) و B (بستر با قطر میانگین ذرات ۱/۸ mm) و در محدوده اعداد فرود ۰/۱ الی

همان‌طور که در شکل ۸ مشاهده می‌شود رابطه غیرخطی ارائه شده در این تحقیق در مقایسه با رابطه‌های محققان دیگر دارای ضریب همبستگی بالاتر ( $R = 0.93$ ) و خطای کمتری است. به عبارت دیگر از آنجایی که رابطه ارائه شده در این تحقیق بر مبنای داده‌ها و شرایط آزمایشگاهی همین تحقیق به‌دست آمده است، همبستگی داده‌های اندازه‌گیری شده با رابطه ارائه شده بیشتر می‌باشد. به‌طوری‌که پیش‌بینی عمق آب‌شستگی از رابطه ملویل ۱۹۹۷ و هانسو ۱۹۷۱ با استفاده از داده‌های آزمایشگاهی این تحقیق دارای بدترین نتایج معیارهای ارزیابی بوده و کمترین همبستگی و بیشترین خطا را از خود نشان داده‌است. علت این امر می‌تواند شرایط متفاوت آزمایشگاهی و حضور پارامتر سرعت باشد که برآورد آن در پس آزمایشگاهی به دلیل وجود آشفتگی در جریان با خطای

اولیه جریان  $d_0/D$  در مقابل نسبت بی‌پس عمق آب‌شستگی  $d_s/D$ ، برای قطر میانگین بی‌پس شده ذرات بستر، مشاهده شد که در  $d^*$  های بزرگ، مقدار  $d_s/D$  با افزایش نسبت  $d_0/D$  با شیب متغیری کاهش می‌یابد.

## ۶- منابع

Tafarajnoruz, A., Gaudio, R. and Calomino F. (2012). Evaluation of flow-altering countermeasures against bridge pier scour. *Journal of Hydraulic Engineering*, 138, 297-305.

Daneshfraz, R., Chabokpour, J. and Dasine, M. (2018). The experimental investigation of the maximum depth and length of pit holes created by bed material removal under subcritical flow condition. *Water and Soil Conservation*, 26(1), 111-130 (in Persian).

Zarrati, A.R., Chamani, M.R., Shafaie, A. and Latifi, M. (2010). Scour countermeasures for cylindrical piers using riprap and combination of collar and riprap. *International Journal of Sediment Research*, 25, 313-22.

Graf, W. and Istiarto, I. (2002). Flow pattern in the scour hole around a cylinder. *Journal of Hydraulic Research*, 40, 13-20.

Ansari, S., Kothyari, U. and Ranga Raju, K. (2002). Influence of cohesion on scour around bridge piers. *Journal of Hydraulic Research*, 40, 717-29.

Rambabu, M., Rao, S.N. and Sundar, V. (2003). Current-induced scour around a vertical pile in cohesive soil. *Ocean Engineering*, 30, 893-920.

Melville, B.W. and Chiew, Y.-M. (1999). Time scale for local scour at bridge piers. *Journal of Hydraulic Engineering*, 125, 59-65.

Majedi ASL, M., Daneshfaraz, R. and Valizadeh, S. (2018). Experimental investigating effect of river materials mining on scouring around armed pier groups. *Iranian Journal of Soil and Water Research*. <http://dx.doi.org/10.22059/ijswr.2019.269942.668062> (in Persian).

Vittal, N., Kothyari, U. and Haghghat, M. (1994). Clear-water scour around bridge pier group. *Journal of Hydraulic Engineering*, 120, 1309-18.

Valizadeh, S., Majedi Asl, M., Daneshfaraz, R. and Chabokpour, J. (2018). Laboratory study of the effect of Froude number on scour around a cable-protected base group in the presence of mining materials. *Seventh National Hydraulic Conference of Iran*, University of shahrekord (in Persian).

Özalp, M.C. and Bozkuş, Z. (2013). Experimental

برای جریان زیربحرانی انجام شد. همچنین برداشت مصالح در بالادست و پایین‌دست گروه‌پایه‌ها بررسی شد. با توجه به ابعاد آبراهه آزمایشگاهی مربوطه، ابعاد گودال برداشت مصالح و فاصله مد نظر از گروه‌پایه‌ها با آزمون و خطا برای شرایط بحرانی انتخاب شد. تاثیر این برداشت در الگو و عمق آب‌شستگی نشان داد که برداشت مصالح از بالادست گروه‌پایه‌ها منجر به کاهش و این برداشت از پایین‌دست گروه‌پایه‌ها موجب افزایش عمق و گستره آب‌شستگی شده است. بنابراین مشاهده شد که گروه‌پایه‌ها به برداشت مصالح از پایین‌دست خود حساستر بوده و بهتر است این برداشت در بالادست گروه‌پایه انجام گیرد. افزایش عدد فرود از  $0.25$  تا  $0.5$  موجب افزایش عمق آب‌شستگی بیشینه در پیرامون گروه‌پایه شده است. به طوری که این افزایش در دبی‌های بزرگتر بیشتر به چشم می‌خورد. نتایج دیگری نیز در این تحقیق به دست آمده است که در زیل به آن‌ها اشاره می‌شود:

۱- افت تراز بستر، با افزایش عمق و کاهش سرعت جریان، موجب می‌شود که جریان با عدد فرود کمتری وارد بستر پایین‌دست گودال برداشت مصالح شده و این بستر را کمتر دچار آب‌شستگی کند. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که آب‌شستگی پایه‌های پل به چاله‌های پایین‌دست حساس‌تر بوده و در حد امکان می‌بایست برداشت مصالح از بالادست پایه‌ها انجام گیرد.

۲- بیشترین گستره آب‌شستگی مربوط به آزمایش ۸ با دبی  $30$  لیتر بر ثانیه و عدد فرود  $0.5$ ، در بستر با قطر میانگین  $0.78$  میلی‌متر برای گروه‌پایه واقع در بستر بالادست گودال است که در راستای عرض آبراهه  $38$  سانتی‌متر و در راستای طول آبراهه  $64/5$  سانتی‌متر گسترش پیدا کرده است.

۳- افزایش عدد فرود در بستر با گودال برداشت مصالح در مقایسه با بستر بدون گودال، عمق آب‌شستگی را بیشتر تحت تاثیر قرار داد. به طوری که افزایش عدد فرود در بستر با گودال برداشت مصالح، بیشینه آب‌شستگی را برای دانه‌بندی A،  $33$  درصد و برای دانه‌بندی B،  $5/73$  درصد، بیشتر از بستر بدون گودال افزایش می‌دهد.

۴- در این تحقیق با بررسی منحنی نسبت بی‌پس عمق



investigation of local scour around bridge pier groups: MSc thesis, Department of Civil Engineering. The graduate School of Natural and Applied Sciences of Middle East Technical University.

Hannah, C. (1980). Scour at pile groups, University of Canterbury Library.

Hancu, S. (1971). Sur le calcul des affouillements locaux dans la zone des piles des ponts, Proc., 14<sup>th</sup> IAHR Congress, Paris, France, Vol. 3, 299-313.

Salim, M. and Jones, J.S. (1996). Scour around exposed pile foundations. North American water and environment congress & destructive water: ASCE, 2202-11.

Rezaei, M., Daneshfraz, R. and Dasine, M. (2018). Experimental Investigation on the Effect of Adding Cationic and Polyacrylamide Caps on the Scouring of pier and Pit hole Under the Effects of River Matter. Iranian Hydraulic Association. 10.30482/jhyd.2018.81358. (in Persian)

Amini, A. (2001). Field and Laboratory Survey of Moving the Cavity of Harvesting Materials. Tarbiat Modarres University, Tehran. (in Persian)

Raudkivi, A.J. and Ettema, R. (1983). Clear-water scour at cylindrical piers. Journal of Hydraulic Engineering, 109, 338-350.

Richardson, E.V. and Davis, S.R. (2001). Evaluating scour at bridges. Publication No. FHWA NHI 01-001, Hydraulic Engineering Circular No. 18, Federal Highway Administration, U.S. Dept. of Transportation, Washington, D.C.

Jain, S. (1981). Maximum Clear-Water Scour around Cylindrical Piers, Journal of Hydraulic Engineering, 107(5), 611-625.

Julien, P.Y. (2010). Erosion and sedimentation: Cambridge University Press.