

Experimental Investigation of the Effect of Hydrograph and Steady Flow Properties on Bridge Group Pier Scouring for Different Spacing

Shima Abolfathi ^{1*}, Seyed Mahmood Kashefipour ¹, Mahmood Shafaei Bajestan ¹, David R. Fuhrman ²

1- Hydraulic Structures Department, Faculty of Water & Environmental Eng., Shahid Chamran University of Ahvaz, Iran.

2- Section of Fluid Mechanics, Coastal and Maritime Engineering, Department of Mechanical Engineering, Denmark Technical University, Denmark.

* abolfathi_sh@yahoo.com

Received: 24 January 2021, Accepted: 5 May 2021 J. Hydraul. Homepage: www.jhyd.iha.ir

Abstract

Introduction: The pier group is one of the important hydraulic structures that the scouring around them is affected not only by the flow characteristics, but also by their number and arrangement. Each pile in a group has an individual scouring mechanism that can influence other piles in the group. Sheltering, reinforcement, and horse-shoe vortex compression are mechanisms that make pier group scouring more complicated than a single pile (Nazariha, 1996).

More recent attention has been focused on the arrangement and geometric variables and their effects on the scouring size and process in steady flow. Several reviews of the angle of attack, spacing, numbers, and pier diameter have been undertaken (Hannah, 1978; Nouh, 1986; Vittal et al., 1994).

As seen, most studies in the field of scouring around pier groups have only focused on steady current. In fact, there is a relatively small body of literature that is concerned with scouring in pier groups in unsteady flow, while floods, waves and unsteady flows are the most destructive phenomena in rivers and coastal environments. This paper uses the experimental investigation of three piers in the tandem arrangement as a pier group and analyses the impacts of the hydrograph unsteadiness on scouring with different pier spacing in the clear-water regime and investigate the time variation of the scouring depth to understand the scouring process around pier groups in unsteady flow.

Methodology: The experiments were conducted in a flume 10 m in length, 0.74 m in width and 0.6 m in depth at the Hydraulic Laboratory of Shahid Chamran University. In the flume a pump was used to drive the water from an underground reservoir to a head tank. A false bed was built at the bottom of the flume with 0.15 m height, with a 1.7 m length sand bed located 2.8 m from the inlet. The sediment part of the bed was filled with $d_{50}=0.7$ mm uniform sand (Geometric standard deviation of the sand size(σ)=1.3) and the other parts were covered with the materials as rough as the sand.

In this study, 36 experiments were done to evaluate the pier group scouring, which included

9 tests of steady flow in different discharge and pier spacing, and 27 tests of unsteady flow in different peak discharge, time duration and pier spacing. It is worth mentioning that all experiments were performed in the clear water regime.

During the experiments, four cameras (Full High Definition (FHD) resolution) recorded the scouring process from four different angles to investigate the temporal changes (Fig. 4). All piles were scaled to extract the scouring depth from the videos and remove the light deflection effect in the water

Results and Discussion:

Steady flow results: What stands out from the steady flow experiments is that the scour depth around the first pier was more than the next one due to the flow attack. In other piers, because of the previous pier's protection, the scour depth was less than the first one. As shown in Figure 4, the scour depth changing rate decreased earlier at lower discharges, which may be due to the lower flow intensity to continue the scouring process. Early in the second and third pier scouring process, the scouring depth remains constant for a while, which is due to the eroded sediments from the previous pier into the next pier's scouring hole and the equal amount of deposited and eroded sediment. This issue also can be seen in figures of Mahjoub et al.'s (2014) research.

Unsteady flow results: The scouring depth around each pier gradually increases with increasing flow discharge during the hydrograph's rising limb. This increase occurred at the beginning of the process slower than the steady flow due to a gradual increase in flow discharge and, consequently, a gradual increase in flow intensity and shear stress to erode sediments around the pier (Figs. 5-8).

In the unsteady flow experiments, the first pier's scouring process was gradually stopped after the peak discharge and during the falling limb due to the decrease in flow discharge. However, evaluating the recorded videos from the scouring process angles and the extracted data showed that the process proceeded differently for the second and third pier in some experiments. In these cases, four conditions around the pier were occurring by reducing the flow discharge in the falling limb. These conditions caused new phenomena called backfilling in this study.

- Sufficient height of deposition region resulting from previous pier scouring
- Sufficient flow intensity for erosion and moving the sediment
- Short distance for sediment to reach the next pier scouring hole
- Weak vortex of the next pier to re-erode the entered sediments into the hole

Conclusion: Evaluating the scouring hole temporal variation during the unsteady flow shows that the scouring process around the pier group in unsteady flow can differ from steady flow around rear piers and caused a new phenomenon, which is called backfilling. This difference is due to the extra mechanisms in the pier group scouring process, and the flow changes during the hydrograph and changed with the pier spacing variation.

Keywords: Unsteady flow, Scouring, Bridge pier group, Flood hydrograph, Time variation.



© 2021 Iranian Hydraulic Association, Tehran, Iran.
This 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 آزمایشگاهی تأثیر ویژگی‌های آب‌نگار و جریان ماندگار بر آبستگی گروه پایه پل برای فاصله‌های مختلف

شیمای ابوالفتحی^{۱*}، سید محمود کاشفی پور^۱، محمود شفاعی بجستان^۱، دیوید آر فوهرمن^۲

۱- گروه سازه‌های آبی، دانشکده مهندسی آب و محیط زیست، دانشگاه شهید چمران اهواز.

۲- گروه سازه‌های ساحلی، دانشکده مکانیک سیالات، دانشگاه صنعتی دامنارک.

* abolfathi_sh@yahoo.com

دریافت: ۱۳۹۹/۱۱/۰۵، پذیرش: ۱۴۰۰/۰۲/۱۵، وب‌گاه نشریه هیدرولیک: www.jhyd.iha.ir

چکیده: گروه پایه‌های پل احداث شده در رودخانه، از جمله سازه‌های مهمی هستند که آبستگی پیرامون آن‌ها نه تنها توسط ویژگی‌های جریان، بلکه به واسطه شمار و آرایش آن‌ها نیز تحت تأثیر قرار می‌گیرد. این پژوهش به صورت آزمایشگاهی تأثیر ویژگی‌های آب‌نگار شامل سه دبی بیشینه و سه زمان تداوم آب‌نگار را برای سه فاصله نسبی متفاوت در یک گروه پایه متشکل از سه پایه استوانه‌ای هم‌اندازه را در طول زمان بررسی می‌کند. همچنین به ارزیابی پذیری های زمانی حفره آبستگی در جریان ماندگار متناظر با سه دبی بیشینه آب‌نگار و سه فاصله نسبی متفاوت می‌پردازد. در بررسی پذیری های زمانی حفره آبستگی در جریان غیر ماندگار، نتایج نشان داد که در صورت وجود شرایط خاص در روند آب‌نگار، حفره آبستگی پایه دوم و سوم می‌تواند پس از فروکش کردن دبی جریان، توسط رسوب‌های فرسایش یافته از حفره پیشین، بار دیگر پر شود؛ که این پدیده، بازپر شدگی حفره آبستگی نامیده شد و بیشینه میزان آن در آزمایش‌ها، به اندازه ۲۴ درصد قطر پایه مشاهده شد.

کلید واژگان: جریان ناماندگار، آبستگی، گروه پایه پل، آب‌نگار سیل، پذیری های زمانی.

۱- مقدمه

پایه پل‌های احداث شده بر روی رودخانه‌ها یکی از مهم‌ترین سازه‌های هیدرولیکی هستند که تحت تأثیر جریان رودخانه و ویژگی‌های ناماندگاری آن قرار می‌گیرند. گروه پایه‌های پل از جمله انواع پایه‌های پل هستند که به دلیل ویژگی‌های طراحی و مسئله‌های اقتصادی در سال‌های اخیر بسیار مورد توجه قرار گرفته‌اند. احداث یک گروه پایه به جای تک پایه بزرگتر، می‌تواند استحکام و مقاومت کافی را برای پل، با هزینه کمتری فراهم کند (Abbaspour et al., 2020). پدیده آبستگی، عمده‌ترین مسئله‌ای است که پایه‌های پل و دیگر سازه‌های هیدرولیکی احداث شده در بستر رودخانه‌ها را تهدید می‌کند و این مسئله در پایه‌های پل گروهی به دلیل اندرکنش الگوهای جریان پیرامون هر یک از اجزای گروه پایه با یکدیگر، از پیچیدگی بیشتری داشته است. به همین دلیل مسئله آبستگی در پیرامون گروه پایه پل‌ها، بسیار کمتر بررسی و ارزیابی است.

بررسی‌های انجام شده در زمینه آبستگی گروه پایه‌ها در دهه‌های اخیر، به صورت عمده بر عمق آبستگی تعادلی، بررسی تأثیر برخی متغیرهای حاکم و همچنین استخراج رابطه‌های تجربی برای پیش‌بینی عمق آبستگی تعادلی تمرکز داشته‌اند.

با توجه به پیچیدگی اندرکنش بین پایه‌ها و آشفتگی در گروه پایه‌ها، ریخت‌شناسی (مورفولوژی) حفره آبستگی در گروه پایه‌ها در فاصله‌ها و شرایط جریان متفاوت، متغیر خواهد بود (Liang et al., 2013; Vaghefi et al., 2018). این موضوع که ناشی از تغییر ساختار آشفتگی در حفره آبستگی می‌باشد، بیان می‌کند که ساز و کار (مکانیزم) آبستگی در گروه پایه‌ها می‌تواند متفاوت عمل کند. همانطور که (Nazariha, 1996) سه ساز و کار زیر را به عنوان ساز و کارهای موثر در آبستگی گروه پایه‌ها معرفی کرد. (۱) ساز و کار محافظت کننده (محافظت پایه‌های پیشین از پایه‌های پسین در مقابل حمله جریان)، (۲)

ساز و کار تقویت کننده (تأثیر گردابه‌های آبشستگی پایه‌ها بر یکدیگر)، (۳) بهم فشردگی گردابه‌های نعل‌اسبی.

همان‌طور که در بررسی‌های پیشین به چشم می‌خورد، بیشترین بررسی‌ها بر روی آرایش و فراسنجه‌های هندسی گروه‌پایه‌ها صورت گرفته است. بررسی‌های چندی نیز بر روی تأثیر زاویه برخورد جریان، فاصله، شمار و قطر پایه‌ها صورت گرفته است (Hannah, 1978; Nough, 1986; Vittal et al., 1994).

Fredsøe and Sumer (2002) در نتایج بررسی‌های خود اشاره کردند که به دلیل تداخل جریان بین پایه‌های مجاور یکدیگر، آبشستگی در پیرامون گروه‌پایه‌ها متفاوت از پایه‌های منفرد است. (Ataie-Ashtiani and Beheshti (2006) برای اعمال تأثیر آرایش پایه‌ها یک ضریب تصحیح استخراج کردند. (Amini et al. (2012) تأثیر فاصله پایه‌ها، آرایش پایه‌ها (به صورت منظم و نامنظم) و نسبت استغراق پایه‌ها در جریان ماندگار را بررسی کردند و روش جدیدی برای پیش‌بینی تأثیر این متغیرها ارائه کردند. (Lança et al. (2013) تأثیر مدت‌زمان آبشستگی، زاویه‌ی برخورد جریان و شمار ستون‌ها در یک گروه‌پایه را بر الگوی آبشستگی و عمق تعادلی آبشستگی بررسی کردند و دو فرمول برای محاسبه آبشستگی پیرامون گروه‌پایه‌ها پیشنهاد نمودند. (Liang et al. (2017) آزمایش‌های آبشستگی تحت رژیم آب زلال را برای مدل‌های تک پایه، پایه‌های قرار گرفته در مجاور یکدیگر (عمود بر راستای جریان)، پایه‌های قرار گرفته در امتداد یکدیگر (در راستای جریان) و چیدمان 3×3 پایه‌ها انجام دادند و معادله‌های موجود را با داده‌های تجربی مقایسه کردند. افزون بر این، روش‌های عددی متفاوتی مانند روش‌های گروهی مدیریت داده‌ها (GMDH) و روش‌های عصبی-فازی را، برای محاسبه و پیش‌بینی عمق آبشستگی پیرامون گروه‌پایه‌ها ارائه نمودند.

به طور کلی بررسی‌های پیشین، بر روی فراسنجه‌های گروه پایه مانند فاصله پایه‌ها، آرایش پایه‌ها و زاویه برخورد جریان با پایه‌ها تمرکز داشته‌اند؛ در حالی که به تأثیر فراسنجه‌های جریان بر آبشستگی یک گروه‌پایه با آرایش خاص توجه نشده است. ساختار جریان (به عنوان مثال گردابه‌های آشفتگی) در پیرامون هر پایه در یک گروه، بر روی یکدیگر تأثیر می‌گذارند و این تأثیر با تجاوز کردن فاصله پایه‌ها از میزان مشخص بحرانی، قابل چشم‌پوشی خواهد بود. برای مثال (Hannah (1978) اشاره کرد

هنگامی که نسبت فاصله بین پایه‌ها به قطر پایه‌ها (S/D) بزرگتر از ۱۱ باشد، عمق آبشستگی پیرامون گروه‌پایه برابر با عمق آبشستگی یک پایه منفرد خواهد بود که بیانگر آن است که می‌توان از اثر گروه‌پایه چشم‌پوشی کرد. اگرچه Amini et al. (2012) اشاره کردند، هنگامی که این نسبت بزرگتر از $3/5$ باشد، هر پایه حفره آبشستگی مخصوص به خود را دارد و از دیگر پایه‌ها مستقل است. (Kim et al. (2014) با استفاده از روش شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ (LES) همراه با انتقال رسوب و مدل‌های ریخت‌شناسی (مورفولوژیکی)، آبشستگی موضعی در پیرامون پایه‌ها را در دو آرایش کنار یکدیگر و در امتداد یکدیگر به صورت عددی بررسی کردند. نتایج آنان نشان داد که الگوی آبشستگی بستر، بستگی خیلی زیادی به فاصله بین پایه‌ها دارد. Zhang et al. (2017) دریافتند که اثر متقابل بین پایه‌ها در فاصله $S/D=4$ چندان وجود ندارد. نتایج ارائه شده متفاوت در مورد میزان بحرانی S/D نشان می‌دهد که شرایط جریان در این آزمایش‌ها با یکدیگر متفاوت بوده‌است، لذا بیانگر آنست که به تحقیقات بیشتری در زمینه تأثیر شرایط جریان بر فاصله بین پایه‌ها نیاز است.

در نهایت با مرور بررسی‌های گذشته، می‌توان به این نتیجه رسید که بیشترین بررسی‌های در مورد آبشستگی پیرامون گروه‌پایه‌ها، تنها در جریان ماندگار انجام گرفته است و شمار کمی از پژوهش‌ها بر آبشستگی گروه‌پایه‌ها در جریان ناماندگار تمرکز کرده‌اند. این در حالی است که سیل، موج و جریان‌های ناماندگار مخرب‌ترین پدیده‌ها در رودخانه‌ها و کناره‌ها و سازه‌های مرتبط با آن‌ها می‌باشند. تأثیر جریان غیر ماندگار بر آبشستگی گروه‌پایه‌ها، نخستین بار توسط Chow and Herbich (1978) به صورت آزمایشگاهی بررسی شد. در بررسی‌های اولیه ایشان، تأثیر موج بر آبشستگی پایه‌های به نسبت بزرگ با آرایش‌های متفاوت بررسی شد. (Fredsoe and Sumer (1998) عدد کولگان کارپنتر را به عنوان اصلی‌ترین فراسنجه در فرآیند آبشستگی ناشی از موج معرفی کردند و آزمایش‌های خود را در رژیم جریان بستر زنده و با آرایش‌های متفاوت و فاصله‌های نسبتاً کم پایه‌ها اجرا کردند (Mostafa and Agamy, 2011). در بررسی‌های خود بر روی اثر موج در خلاف راستای جریان اصلی بر آبشستگی پیرامون تک پایه و گروه‌پایه با آرایش‌های مختلف تحت رژیم جریان آب زلال تمرکز کردند (Larsen et al., 2018). آبشستگی

صورت گرفت. در این فلوم از یک پمپ (پمپیران EA200-23) برای هدایت جریان آب از مخزن زیر زمینی به مخزن ورودی به طول ۰/۶، عرض ۱/۵ و ارتفاع ۲ متر در ابتدای فلوم استفاده شد. یک آرام کننده‌ی جریان برای کاهش تلاطم جریان ورودی در ابتدای فلوم و یک سرریز مستطیلی برای کنترل عمق آب در انتهای فلوم نصب شد. بستر کاذبی به عمق ۰/۱۵ متر از کف فلوم ساخته شد، این بستر آبرفتی به طول ۱/۷ متر با فاصله‌ی ۲/۸ متر از ابتدای فلوم (توسعه یافتگی جریان در فلوم مورد استفاده در پژوهش Shaker (2019) بررسی شده و رخنه‌های سرعت در فاصله‌های مختلف طولی از ابتدای فلوم ارائه شده‌اند)، با استفاده از ماسه یکنواخت با دانه بندی $d_{50}=0.7$ میلی‌متر و انحراف معیار $\sigma=1/3$ پر شد. بستر آبرفتی پیش از هر آزمایش با استفاده از ابزار تسطیح کننده تسطیح می‌شد. شکل ۱ ابعاد هندسی و تجهیزات مورد استفاده برای انجام آزمایش‌ها را نشان می‌دهد. همچنین به منظور انجام تحلیل ابعادی، فراسنجه‌های زیر به عنوان فراسنجه‌های موثر بر پدیده در نظر گرفته شد (رابطه ۱).

$$d_s = f(B, D, S, \rho, \vartheta, d_{50}, \rho_s, \gamma, v, h, g, \theta, \theta_c, t) \quad (1)$$

که در آن B عرض بستر، D قطر پایه‌ها، S فاصله مرکز به مرکز پایه‌ها، ρ چگالی سیال، ϑ لزجت جنبشی (سینماتیک) سیال، d_{50} قطر میانگین ذرات رسوب، ρ_s چگالی ذرات رسوب، γ عمق جریان، v سرعت جریان، h عمق جریان، g شتاب ثقل، θ فراسنجه شیلدز جریان، θ_c فراسنجه شیلدز بحرانی (ذرات در آستانه حرکت) می‌باشند.

با توجه به نظریه باکینگهام در حل تحلیل‌های ابعادی، همچنین حذف فراسنجه‌های ثابت، متغیرهای بدون بعد در این مسئله به صورت رابطه ۲ ارائه می‌گردند.

$$\frac{d_s}{D} = f\left(\frac{\theta}{\theta_c}, \frac{S}{D}\right) \quad (2)$$

مدلی از یک گروه پایه متشکل از سه استوانه به قطر ۰/۰۵ متر در راستای خط مرکزی فلوم نصب شدند که فاصله نخستین پایه از ابتدای فلوم برابر ۱/۳ متر و در بخش آبرفتی فلوم بود. این گروه پایه متشکل از ۳ عضو بوده که در راستای جریان و در امتداد یکدیگر قرار می‌گرفتند. با توجه به تحقیقات گذشته (Ataie-Ashtiani and Beheshti, 2006; Nazariha, 1996; Hannah, 1978; Rashno et al., 2017) بیشینه تأثیر گروه پایه بر آبستگي در فاصله‌های $3 \leq \frac{S}{D} \leq 5$ که در آن S فاصله‌ی

ناشی از امواج تسونامی در کشتزارهای بادی دریایی به صورت آزمایشگاهی بررسی کردند و نتایج آن را با نتایج مدل‌های CFD پویایی (دینامیکی) و ریخت‌شناسی مقایسه کردند (Larsen et al., 2017). همچنین منبع‌های محدودی پیرامون تأثیر امواج و آب نگار ها، پیرامون تک‌پایه‌ها و اجزای آن‌ها وجود دارد (Oliveto and Kothyari et al., 1992; Chang et al., 2004). Hager (2005) با توجه به اهمیت سیل‌پذیری‌های زمانی آبستگي موضوعی پیرامون تکیه‌گاه‌ها، دایک‌ها و پایه‌های پل را بررسی کردند و همچنین تأثیر جریان ناماندگار در طول سیلاب بخشی از بررسی‌های ایشان بود. Lai et al. (2009) تأثیر ناماندگاری جریان بر بیشینه عمق آبستگي پیرامون تک‌پایه پل در رژیم جریان آب زلال را ارزیابی نمودند. Karimaee and Zarrati (2016) تأثیر آب نگار های کوتاه زمان را بر آبستگي پیرامون تک پایه بررسی کردند و به این نتیجه رسیدند که دبی بیشینه آب نگار ، تأثیر بسیار بیشتری نسبت به دیگر فراسنجه های آب نگار ، بر توسعه حفره آبستگي پیرامون پایه منفرد دارد. L'opez et al., (2013) و Link et al. (2017) روشی برای برآورد عمق نهایی در اثر امواج سیل را ارائه کردند که روش Link et al. (2017) بر تکامل آبستگي در طول زمان در اثر آب نگار های مختلف و کل کار موثر تمرکز داشت.

به طور کلی این بررسی ها نشان می‌دهد که برخی بررسی‌های پیرامون آبستگي گروه پایه‌ها در اثر موج و آبستگي تک‌پایه‌ها در اثر سیلاب پیش‌تر بررسی شده‌است. درحالی‌که فرآیند آبستگي پیرامون گروه پایه‌ها در اثر جریان ناپایدار سیلاب، هنوز ناشناخته باقی‌مانده‌است. در این پژوهش تأثیر دو فراسنجه ناماندگاری آب نگار (بیشینه دبی آب نگار و زمان پایه آب نگار) و همچنین تغییر فاصله‌های بین پایه‌ها در آبستگي رژیم آب زلال، پیرامون گروه پایه متشکل از ۳ عضو که در راستای جریان و در امتداد یکدیگر قرار دارند، به صورت آزمایشگاهی بررسی می‌شود. هدف دیگری که این پژوهش دنبال می‌کند، بررسی پذیری‌های زمانی آبستگي ناشی از آب نگار سیل پیرامون گروه پایه‌ها می‌باشد.

۲- مواد و روش‌ها

آزمایش‌ها در یک فلوم به طول ۱۰ متر، عرض ۰/۷۴ متر و ارتفاع ۰/۶ متر در آزمایشگاه هیدرولیک دانشگاه شهید چمران اهواز

مرکز به مرکز پایه‌ها، D قطر پایه‌ها و $\frac{S}{D}$ فاصله‌های نسبی بین پایه‌ها می‌باشد. نتایج نشان داد که برای فاصله‌های نسبی کمتر از ۳ حفره آبشستگی پیرامون گروه پایه‌ها همپوشانی زیادی با یکدیگر داشته و همانند آبشستگی پیرامون یک پایه منفرد خواهد بود. همچنین برای فاصله‌های نسبی بیش از ۵ حفره آبشستگی هر عضو از گروه پایه به صورت جداگانه تشکیل خواهد شد و اندرکنش ضعیفی بین گردابه‌های هر پایه و دیگر اعضای

گروه پایه وجود خواهد داشت. لذا در این پژوهش از فاصله‌های نسبی ۳، ۴ و ۵ به عنوان فاصله‌های نسبی که بیشترین تأثیر را در فرآیند آبشستگی گروه پایه‌ها دارند، استفاده شد؛ همانطور که در پژوهش Rashno et al. (2020) از این سه فاصله به عنوان فاصله‌های مورد چالش و توجه نویسندگان پیشین استفاده نموده و حفاظت آن توسط سنگ‌چین محافظ (ریپ‌رپ) را بررسی کردند.

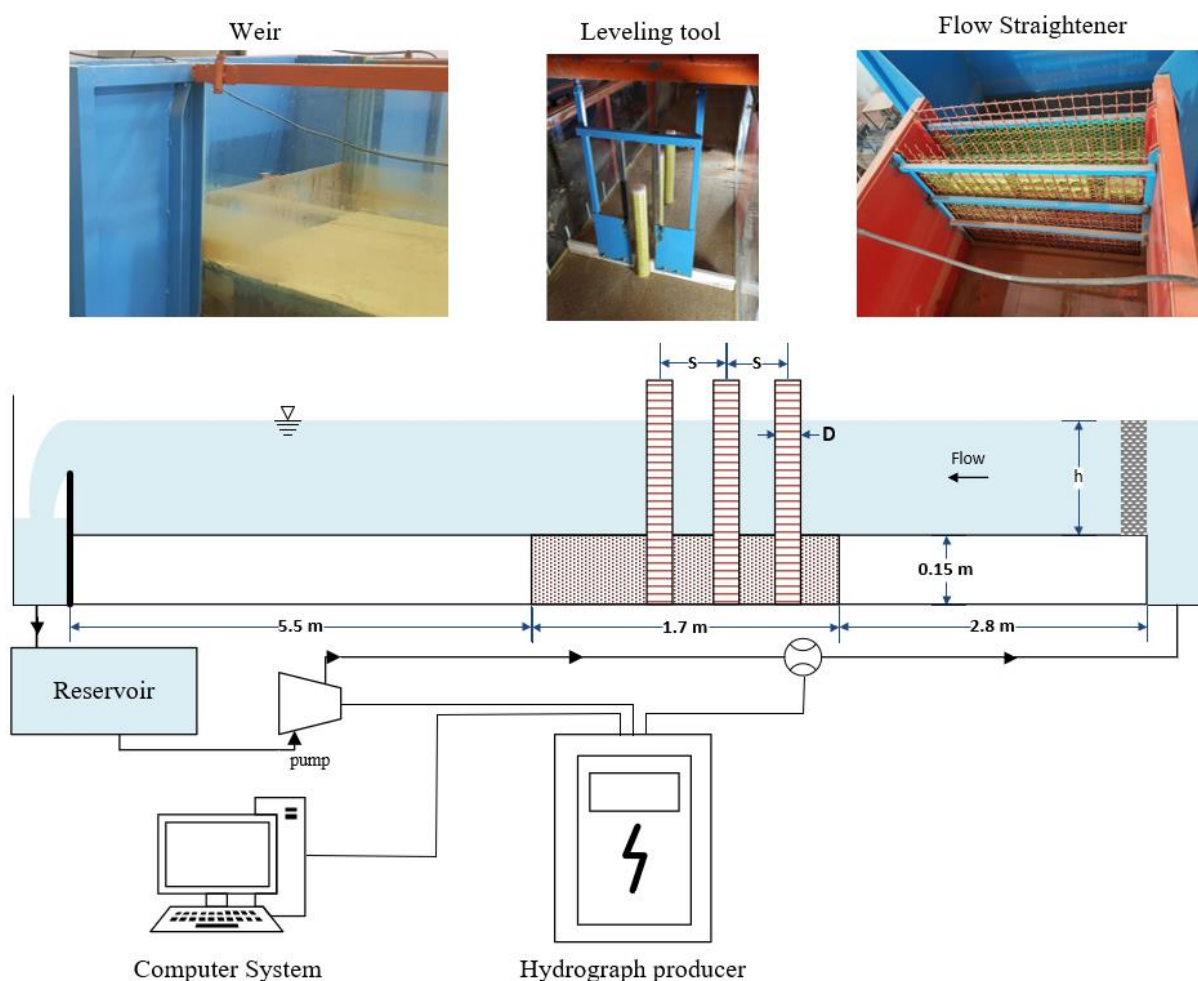


Fig. 1 Geometric dimensions and used equipment for experiments

شکل ۱ ابعاد هندسی و تجهیزات مورد استفاده برای انجام آزمایش‌ها

در این پژوهش از آب‌نگارهای با ویژگی‌های متفاوت (دبی اوج (پیک) و زمان تداوم) به منظور شبیه‌سازی اثر سیل با شرایط مختلف استفاده شد. فلوام مورد استفاده برای انجام آزمایش‌ها، مجهز به یک سامانه (سیستم) تولیدکننده آب‌نگار شامل یک نوسان‌ساز الکترونیکی^۱ برنامه‌نویسی شده متصل به پمپ برای

مهار (کنترل) جریان، و متصل به دبی‌سنج الکترومغناطیس (مگاب ۳۰۰۰ تولید شرکت ایرانمدار با دقت $\pm 0.25\%$ درصد میزان اندازه‌گیری شده و با دامنه اندازه‌گیری دبی مایعات با سرعت بین 0.1 تا 10 متر بر ثانیه و مناسب برای لوله‌های به قطر ۲ تا ۶۰ اینچ) برای دریافت بازخورد از میزان واقعی دبی جریان درون

¹ Inverter

فراسنجه شیلدز بحرانی (آستانه حرکت ذرات بستر دور از سازه) معرفی شده است که با استفاده از مرحله‌های زیر محاسبه شده است. سرعت برشی در این محاسبه‌ها با استفاده از رابطه معروف مقاومت جریان (Uf) (رابطه ۳) به دست آمد (Engelund and Hansen, 1967).

$$\frac{V}{U_f} = 6 + 2.5 \ln \left(\frac{h}{K_s} \right) \quad (3)$$

که در آن $K_s = 2.5d_{50}$ ضریب زبری معادل نیکورادس و h عمق آب می‌باشد. همچنین $Fr = \frac{V}{\sqrt{gh}}$ عدد فرود، $g=9.806$ متر بر مجذور ثانیه میزان شتاب جاذبه، V سرعت میانگین جریان درون فلوم و $Re = \frac{U_f d_{50}}{\nu}$ عدد رینولدز ذره است که در آن لزوجت جنبشی (ویسکوزیته سینماتیک) آب برابر $\nu = 10^{-6}$ مترمربع بر ثانیه تعریف شده است. در این جدول فراسنجه شیلدز نیز به صورت زیر تعریف شده است:

$$\theta = \frac{U_f}{g(s-1)d_{50}} \quad (4)$$

همچنین میزان بحرانی فراسنجه شیلدز (θ_c) با استفاده از رابطه زیر محاسبه شده است (Sui, et al. 2021).

$$\theta_c = 0.17 \log(Re + 0.6)^{-0.8} + 0.45 \log(-40Re^{-1.3}) \quad (5)$$

که در نهایت با استفاده از رابطه ۲ و ۳ میزان فراسنجه شدت جریان بیشینه $\left(\frac{\theta_p}{\theta_c}\right)$ بر اساس نسبت فراسنجه شیلدز جریان در بیشینه دبی آب نگار به فراسنجه شیلدز بحرانی (آستانه حرکت ذرات بستر) محاسبه شد.

پیش از انجام هر آزمایش و پس از تسطیح بستر، انتهای فلوم با استفاده از یک دریچه انتهایی موقتی بسته شد و آب به آرامی وارد فلوم شد تا از کوچکترین حرکت ذرات بستر جلوگیری شود. پس از رسیدن عمق آب به عمق جریان پایه آب نگار، دریچه موقتی به تدریج باز شده و دبی جریان ورودی به تدریج تا رسیدن به جریان پایه آب نگار در جریان‌های ناماندگار افزایش داده شد و پس از آن اجرای آب نگار آغاز شد. در آزمایش‌های جریان ماندگار نیز، عمق آب جریان در دبی مورد نظر (دبی متناظر با دبی بیشینه آب نگار) برای باز کردن دریچه موقتی و آغاز آزمایش، هدف قرار گرفت.

برای انجام داده‌برداری و مشاهده پذیری های زمانی فرآیند آبشستگی در طول اجرای آب نگار، از چهار دوربین با کیفیت FHD استفاده شد که روند آبشستگی را در طول جریان از ۴ برای مختلف ثبت نمودند. لازم به یادآوری است که هر ۳ پایه به

فلوم بود. این سامانه قادر به اجرای هیدروگراف‌های بازخوانی شده (پذیری های دبی نسبت به زمان) با دقت ۱ لیتر بر ثانیه بود. پژوهش حاضر به طور کلی شامل نتایج ۳۶ آزمایش می‌باشد که ۲۷ آزمایش آن شامل آب نگار های نرمال (زمان اوج‌گیری برابر با زمان فروکش سیلاب) با ۳ دبی بیشینه (Qp) ۴۵، ۵۲ و ۶۱ لیتر بر ثانیه و ۳ زمان تداوم متفاوت (Td) ۱۵، ۳۰ و ۶۰ دقیقه و برای ۳ مدل مختلف از پایه‌ها با فاصله های متفاوت استفاده شده است. شکل ۲ آب نگار های به کار برده شده را به نمایش می‌گذارد. آب نگار های مورد نظر به صورت فایل اکسل در نرم افزار متصل به دستگاه اینورتر بازخوانی شده و با استفاده از این نرم افزار ولتاژ ورودی پمپ متصل به فلوم، برای اجرای دبی مربوطه در هر بازه زمانی کنترل شد. پیش از آغاز آزمایش‌ها، اینورتر و نرم‌افزار مربوطه توسط دبی سنج الکترومغناطیس واسنجی شده‌اند.

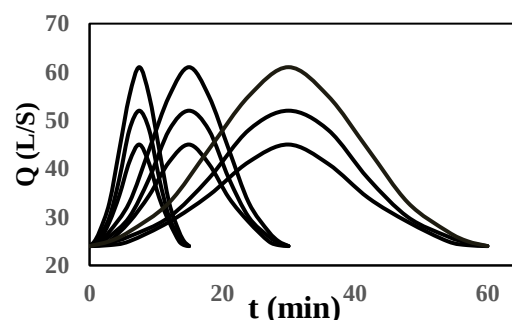


Fig. 2 Hydrographs of unsteady flow simulation

شکل ۲ آب نگار های به کار برده شده برای شبیه‌سازی جریان ناماندگار

۹ آزمایش دیگر شامل جریان ماندگار با ۳ دبی بیشینه (Qp) ۴۵، ۵۲ و ۶۱ لیتر بر ثانیه برای ۳ مدل مختلف از پایه‌ها با فاصله‌های نسبی متناظر با جریان‌های ناماندگار می‌باشد که در این آزمایش‌ها پذیری های عمق آبشستگی در طول زمان برای مدت ۱۸۰ دقیقه بررسی شد. همه‌ی آزمایش‌ها در رژیم جریان آب زلال اجرا شد و دبی مربوط به آغاز فرآیند آبشستگی پیرامون سازه، به عنوان دبی پایه آب نگارها (۲۴ لیتر بر ثانیه $\left(\frac{\theta_b}{\theta_c} = 0.22\right)$) انتخاب شد، به گونه‌ای که برای دبی‌های کمتر از این میزان هیچگونه حرکتی در مواد آبرفتی بستر و پیرامون سازه صورت نمی‌گیرد. جدول ۱ شرح کامل ۳۶ آزمایش انجام شده به همراه متغیرها می‌باشد. همچنین شدت جریان در این جداول بر مبنای نسبت فراسنجه شیلدز جریان در هر لحظه بر

جدول ۱ شرح کامل آزمایش‌های انجام‌شده

Table 1 Experiments description

No.	Type	Name	$\frac{S}{D}$	Q_p (l/s)	*Fr _p	* $\left(\frac{\theta_p}{\theta_c}\right)$	T _d (min)
1	Steady	S-3-45	3	45	0.17	0.60	180
2	Steady	S-3-52	3	52	0.19	0.71	180
3	Steady	S-3-61	3	61	0.21	0.87	180
4	Steady	S-4-45	4	45	0.17	0.60	180
5	Steady	S-4-52	4	52	0.19	0.71	180
6	Steady	S-4-61	4	61	0.21	0.87	180
7	Steady	S-5-45	5	45	0.17	0.60	180
8	Steady	S-5-52	5	52	0.19	0.71	180
9	Steady	S-5-61	5	61	0.21	0.87	180
10	Unsteady	US-3-45-15	3	45	0.17	0.60	15
11	Unsteady	US-3-52-15	3	52	0.19	0.71	15
12	Unsteady	US-3-61-15	3	61	0.21	0.87	15
13	Unsteady	US-3-45-30	3	45	0.17	0.60	30
14	Unsteady	US-3-52-30	3	52	0.19	0.71	30
15	Unsteady	US-3-61-30	3	61	0.21	0.87	30
16	Unsteady	US-3-45-60	3	45	0.17	0.60	60
17	Unsteady	US-3-52-60	3	52	0.19	0.71	60
18	Unsteady	US-3-61-60	3	61	0.21	0.87	60
19	Unsteady	US-4-45-15	4	45	0.17	0.60	15
20	Unsteady	US-4-52-15	4	52	0.19	0.71	15
21	Unsteady	US-4-61-15	4	61	0.21	0.87	15
22	Unsteady	US-4-45-30	4	45	0.17	0.60	30
23	Unsteady	US-4-52-30	4	52	0.19	0.71	30
24	Unsteady	US-4-61-30	4	61	0.21	0.87	30
25	Unsteady	US-4-45-60	4	45	0.17	0.60	60
26	Unsteady	US-4-52-60	4	52	0.19	0.71	60
27	Unsteady	US-4-61-60	4	61	0.21	0.87	60
28	Unsteady	US-5-45-15	5	45	0.17	0.60	15
29	Unsteady	US-5-52-15	5	52	0.19	0.71	15
30	Unsteady	US-5-61-15	5	61	0.21	0.87	15
31	Unsteady	US-5-45-30	5	45	0.17	0.60	30
32	Unsteady	US-5-52-30	5	52	0.19	0.71	30
33	Unsteady	US-5-61-30	5	61	0.21	0.87	30
34	Unsteady	US-5-45-60	5	45	0.17	0.60	60
35	Unsteady	US-5-52-60	5	52	0.19	0.71	60
36	Unsteady	US-5-61-60	5	61	0.21	0.87	60

*This parameter for steady flow tests includes the total time duration

پس از تخلیه آب فلوم، زهکش‌های موجود در کف فلوم باز شده تا آب از فلوم و از بستر آبرفتی خارج شود. در نهایت میزان پذیرایی‌های آبشستگی در طول زمان از فیلم‌های برداشت شده استخراج شد.

دلیل مشاهده و اندازه‌گیری میزان آبشستگی و همچنین به دلیل از بین بردن اثر شکست نور در آب، مدرج شده بودند. شکل ۳ موقعیت مکانی چهار دوربین مورد استفاده و فرآیند آبشستگی را از نگاه هر دوربین به نمایش می‌گذارد. در پایان هر آزمایش



Fig. 3 Location of the cameras and the scouring process from their perspective

شکل ۳ موقعیت مکانی دوربین‌های مورد استفاده و فرآیند آبشستگی از نگاه هر دوربین

دلیل محافظت پایه پیشین، عمق آبشستگی کمتر از پایه اول بود. همانطور که در شکل ۴ ملاحظه می‌گردد، در دبی‌ها کمتر، شیب افزایش عمق آبشستگی، زودتر کاهش که این موضوع می‌تواند به دلیل کمتر بودن شدت جریان برای ادامه‌ی فرآیند آبشستگی باشد. با توجه به نتایج به دست آمده از آزمایش‌ها، کمترین میزان عمق آبشستگی در پایه اول در پایان آزمایش، مربوط به فاصله نسبی ۵ (بیشترین فاصله مورد آزمایش) و دبی ۴۵ لیتر بر ثانیه (کمترین دبی مورد آزمایش) بود. همچنین بیشترین میزان عمق آبشستگی در پایه اول در پایان آزمایش، مربوط به فاصله نسبی ۳ (کمترین فاصله مورد آزمایش) و دبی ۶۱ لیتر بر ثانیه (بیشترین دبی مورد آزمایش و بیشینه شدت جریان در رژیم آب زلال) و به میزان ۱/۵۴ برابر قطر پایه بود. با افزایش دبی، میزان آبشستگی نهایی در پایه اول افزایش پیدا می‌کرد. در حالی که در دبی‌های کمتر، تأثیر فاصله بین پایه‌ها بر عمق آبشستگی نهایی بیشتر احساس شد؛ که این اختلاف در بیشترین میزان خود برابر با ۳۴ درصد قطر پایه به ازای افزایش ۶۶ درصدی فاصله بین پایه‌ها بود. نتایج به دست آمده از بررسی‌های (Diwedat (2013) و Ezzeldin et al. (2006) نیز تأثیر بیشتر فاصله در دبی‌های کمتر را تأیید می‌کند.

۳- نتایج و بحث

باتوجه به سرعت جریان و فاصله بین پایه‌ها شدت و ضعف هر یک از ساز و کارهای موثر بر آبشستگی گروه پایه‌ها تغییر کرده و اثر مستقیم بر چگونگی و میزان آبشستگی پیرامون پایه‌ها خواهد گذاشت که در این پژوهش با استفاده از نتایج آزمایشگاهی بررسی خواهند شد.

۳-۱- بررسی نتایج آزمایش‌های جریان ماندگار

شکل ۴ مجموعه‌ای است از نتایج به دست آمده از آزمایش‌ها جریان ماندگار در فاصله‌های نسبی مختلف بین پایه‌ها که به تفکیک پذیری‌های عمق آبشستگی نسبی ($\frac{d_s}{D}$) در طول زمان را نشان می‌دهد که نمایه (اندیس) آن، نمایشگر پایه مورد نظر می‌باشد (نمایه ۱ پایه اول، نمایه ۲ پایه دوم و نمایه ۳ پایه سوم). در این نمودارها محور عمودی بیانگر عمق آبشستگی نسبی (به صورت بدون بعد) و محور افقی بیانگر زمان سپری شده از ابتدای جریان و آغاز فرآیند آبشستگی (بر حسب دقیقه) می‌باشد. همان‌طور که از بررسی کلی نمودارها می‌توان دریافت که عمق آبشستگی پیرامون پایه اول در هر زمان، به دلیل رو به رو با جبهه جریان بیشتر از دیگر پایه‌ها بود. حال آنکه در پایه‌های دیگر به

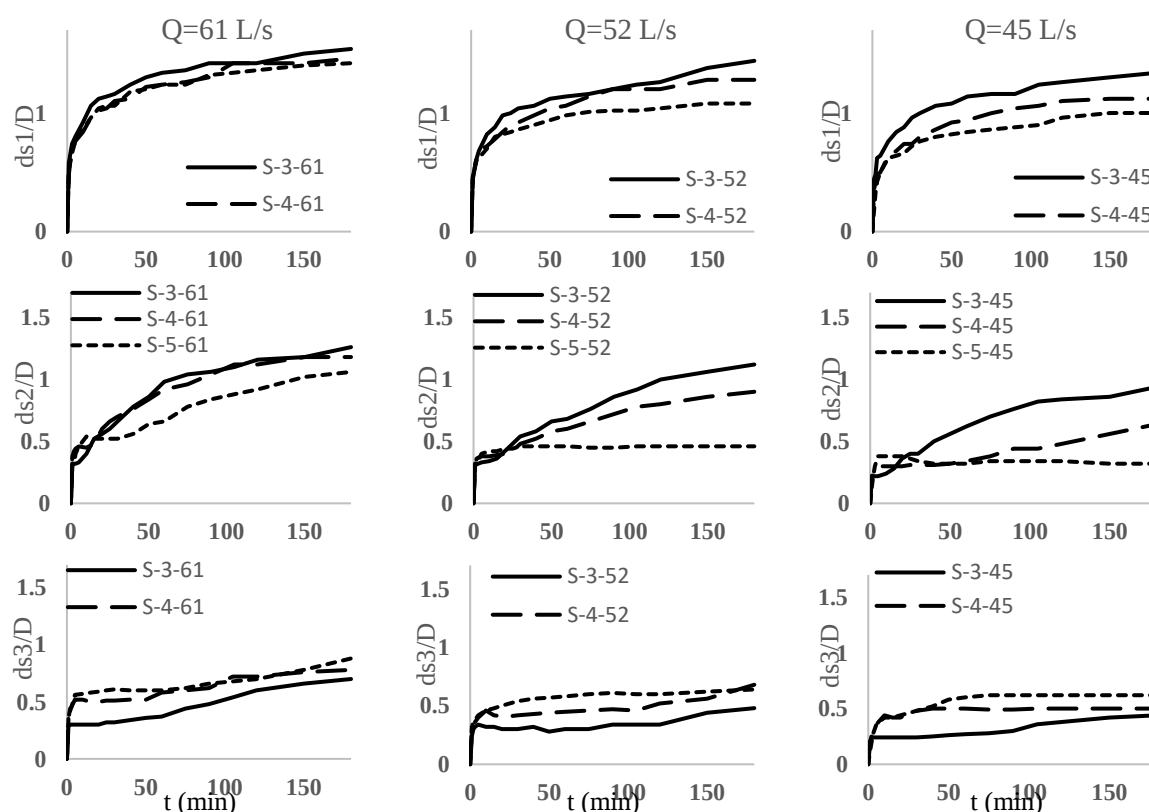


Fig. 4 Relative scouring depth variations versus time in steady flow with different relative spacing and discharge

شکل ۴ پذیری‌های عمق آبستگی نسبی با زمان در جریان ماندگار با فاصله‌های نسبی و دبی‌های متفاوت

مجدداً عمق آبستگی آغاز به افزایش کرد. پدیده ثابت ماندن موقتی عمق آبستگی پیرامون پایه‌های پسین، در شکل‌های مربوط به بررسی‌های پیشین مانند (Mahjoub et al., 2014) نیز به چشم می‌خورد و از نتایج این بررسی چنین برمی‌آید که در فاصله‌های نسبی کمتر، به دلیل کمتر بودن مسافت طی شده توسط رسوب‌های تا رسیدن به حفره بعدی، زودتر رخ داد و همچنین برای پایه سوم نیز با تأخیر بیشتری رخ داد.

نکته دیگری که در شکل ۴ ملاحظه می‌شود، در پایه دوم، تأثیر فاصله نسبی بر عمق آبستگی، با پیشرفتن زمان آزمایش بیشتر شده و در پایان آزمایش در بیشترین میزان خود رسیده‌است. در نتیجه تأثیر فاصله نسبی بر عمق نهایی آبستگی پیرامون پایه دوم، از پایه اول و سوم بیشتر است و با افزایش فاصله، عمق نهایی آبستگی پیرامون پایه دوم، به دلیل کاهش اثر تقویتی گردابه-های پایه اول و دوم، کاهش می‌یابد. این کاهش عمق نهایی آبستگی به ازای ۶۶ درصد افزایش فاصله بین پایه‌ها، به ترتیب ۲۰ درصد قطر پایه در دبی ۶۱ لیتر بر ثانیه و ۶۲ درصد قطر پایه در دبی ۴۵ لیتر بر ثانیه، کمترین و بیشترین میزان بود. لذا کمترین عمق آبستگی در پایه دوم مربوط به کمترین دبی و

در پایه دوم با افزایش زمان آزمایش، به دلیل محافظت پایه اول، شیب افزایش عمق آبستگی کمتر شد و این نکته در مقایسه با پایه دوم به میزان کمتری ملاحظه می‌شود. در فرآیند آبستگی پایه دوم و سوم ملاحظه می‌گردد که در بازه‌ای از زمان در اوایل فرآیند آبستگی، عمق آبستگی تا حدودی ثابت ماند و پس از آن با ادامه جریان، بار دیگر عمق آبستگی آغاز به افزایش کرد؛ برخلاف روند آبستگی در پایه اول که عمق آبستگی پیوسته در طول آزمایش در حال افزایش بود. این پدیده بدان دلیل است که در آغاز فرآیند آبستگی، رسوب‌های فرسایش یافته از پایه اول، به سمت جلو حرکت کرده و به درون حفره آبستگی پایه دوم ریخته شدند. از آنجایی که در جریان ماندگار، میزان قدرت انتقال گردابه‌های حلزونی در طول زمان ثابت می‌باشد، این گردابه‌ها نیز رسوب‌ها را مورد فرسایش قرار دادند. لذا میزان رسوب‌های وارد شده از فرسایش پایه پیشین به درون حفره، با میزان رسوب‌های مورد فرسایش قرار گرفته پیرامون پایه یادشده، برابر بوده و در این بازه زمانی عمق آبستگی پیرامون پایه مورد نظر ثابت ماند. با ادامه جریان و انتقال یافتن رسوب‌های فرسایش یافته از پایه پیشین به جلو،

بررسی می‌شود. این شکل‌ها به طور کلی نشان می‌دهند که میزان عمق آبستگی در هر سه پایه، با افزایش جریان و در طول بازوی بالارونده آب نگار، به تدریج افزایش می‌یابد. این افزایش عمق آبستگی در آغاز فرآیند با شیب بسیار ملایم‌تری نسبت به جریان ماندگار رخ داد، که دلیل آن افزایش تدریجی دبی و در نتیجه افزایش تدریجی شدت جریان و تنش برشی برای فرسایش رسوب‌های پیرامون پایه‌ها بود. نکته قابل توجه دیگر در بررسی اندازه‌گیری‌ها اینکه در دقیقه‌های آغازین فرآیند آبستگی در جریان ناماندگار، به دلیل کم بودن دبی و قدرت جریان و در نتیجه کوچک بودن گردابه‌های هر پایه، آبستگی پیرامون آن به صورت مستقل عمل کرده و به عنوان گروه پایه تأثیری بر یکدیگر ندارند؛ لذا عمق آبستگی در هر سه پایه تا حدودی با یکدیگر برابر است. لیکن با ادامه جریان و بیشتر شدن قدرت آن و همچنین قرار گرفتن در جبهه جریان، عمق آبستگی در پایه اول سریع‌تر از دیگر پایه‌ها رشد کرد و تأثیر گروه پایه‌ها بر یکدیگر نمایان شد.

در آزمایش‌های جریان غیر ماندگار، پس از دبی بیشینه آب نگار و در بازوی پایین رونده آن، عمق آبستگی در پایه اول به دلیل کاهش قدرت جریان بتدریج متوقف شد. اما با بررسی فیلم‌های ضبط شده از زاویه‌های مختلف فرآیند آبستگی در طول زمان و همچنین اندازه‌گیری‌های استخراج شده، نتایج به دست آمده در مورد پایه‌های دوم و سوم نشان داد که در برخی آزمایش‌ها فرآیند به گونه‌ای متفاوت پیش رفت. بدینصورت که با فروکش کردن جریان آب نگار و در بازوی پایین رونده، در صورت وجود چهار شرط زیر پدیده‌ای پیرامون پایه رخ می‌دهد که در این پژوهش آن را بازپرسدگی حفره آبستگی^۱ می‌نامیم.

کافی بودن ارتفاع پشته‌های رسوبی ناشی از فرسایش پایه پیشین

• کافی بودن قدرت حمل جریان برای فرسایش و حمل

پشته‌های رسوبی

• کم بودن فاصله برای طی کردن رسوب‌های پشته‌های

رسوبی تا حفره آبستگی پایه بعدی

• کم بودن قدرت گردابه پایه بعدی برای فرسایش مجدد

رسوب‌های وارد شده به درون حفره

بیشترین فاصله و همچنین بیشترین عمق آبستگی مربوط به بیشترین دبی و کمترین فاصله بود که به ترتیب برابر ۰/۳۲ و ۱/۲۶ برابر قطر پایه اندازه‌گیری شد.

در پایه سوم افزایش عمق آبستگی در ابتدای جریان به سرعت رشد کرد و اندکی پس از آغاز جریان با کاهش رشد چشمگیری روبه‌رو بود و افزایش عمق آبستگی در طول زمان به کندی صورت گرفت. در این پایه برخلاف پایه دوم، افزایش فاصله نسبی موجب افزایش عمق نهایی آبستگی شد که می‌تواند ناشی از کاهش اثر حفاظتی پایه دوم از پایه سوم، با افزایش فاصله باشد. اما به طور کلی تأثیر این فراسنجه بر عمق آبستگی پایه سوم بسیار کمتر از پایه دوم و در بیشترین میزان خود ۲۴ درصد قطر پایه و مربوط به دبی ۴۵ لیتر بر ثانیه بود. این تفاوت در دقایق اولیه جریان اندکی قابل ملاحظه‌تر بود که با ادامه جریان بتدریج کاهش یافت. در جدول ۲ میزان‌های بیشترین عمق آبستگی در آزمایش‌های جریان ماندگار و برای هر سه پایه آورده شده است.

جدول ۲ بیشترین میزان‌های عمق آبستگی نسبیدر

آزمایش‌های جریان ماندگار

Table 2 the maximum scouring relative depth values in steady flow experiments

No.	Name	$\left(\frac{d_s}{D}\right)_{Max}$		
		First pier	Second pier	Third pier
1	S-3-45	1.43	0.94	0.44
2	S-3-52	1.44	1.12	0.48
3	S-3-61	1.54	1.26	0.7
4	S-4-45	1.12	0.64	0.5
5	S-4-52	1.28	0.9	0.68
6	S-4-61	1.46	1.18	0.78
7	S-5-45	1	0.32	0.62
8	S-5-52	1.08	0.46	0.64
9	S-5-61	1.42	1.06	0.88

۳-۲- بررسی نتایج آزمایش‌های جریان ناماندگار

در این بخش و با توجه به شکل‌های ۵ تا ۸ پذیری‌های عمق آبستگی در طول زمان، تحت تأثیر آب نگار‌های شبیه سازی شده با زمان‌های تداوم متفاوت و در فاصله‌های نسبی مختلف

¹ Backfilling of scour hole

آبشستگی می‌تواند در شرایطی در پیرامون تک پایه نیز (حداکثر ۵ درصد قطر پایه) رخ دهد، با این حال بررسی این پژوهش نشان می‌دهد که منشأ این پدیده در تک پایه، جابه‌جایی ذرات موجود در همان حفره آبشستگی در اثر فروکش کردن سیلاب می‌باشد.

شکل ۵ رخ‌نمای آبشستگی یکی از آزمایش‌ها را در چند مرحله در طول آب‌نگار نشان می‌دهد که روند آبشستگی، رسوب‌گذاری و بازپرسدگی به خوبی در آن مشهود است. لازم به یادآوری است همان‌طور که در پژوهش Tabarestani and Zarrati (2016) به چشم می‌خورد، پدیده بازپرسدگی حفره

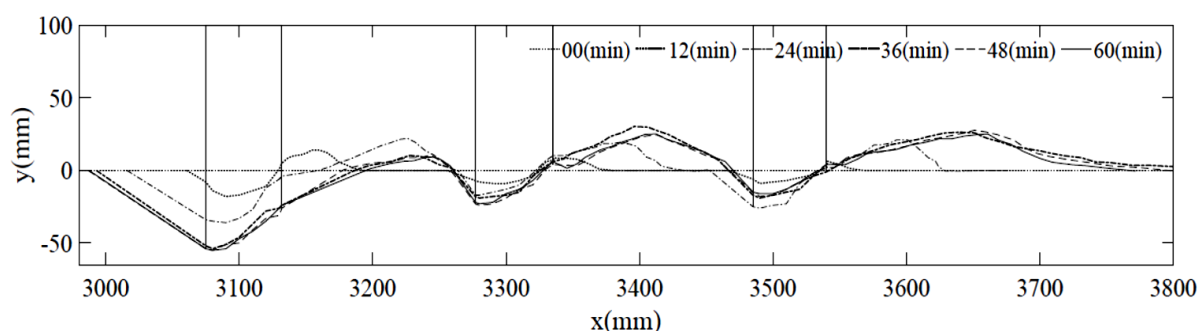


Fig. 5 Longitudinal profile of temporal scouring for the US-4-61-60 experiment

شکل ۵ پذیری‌های زمانی نیم‌رخ طولی آزمایش US-4-61-60 در طول جریان

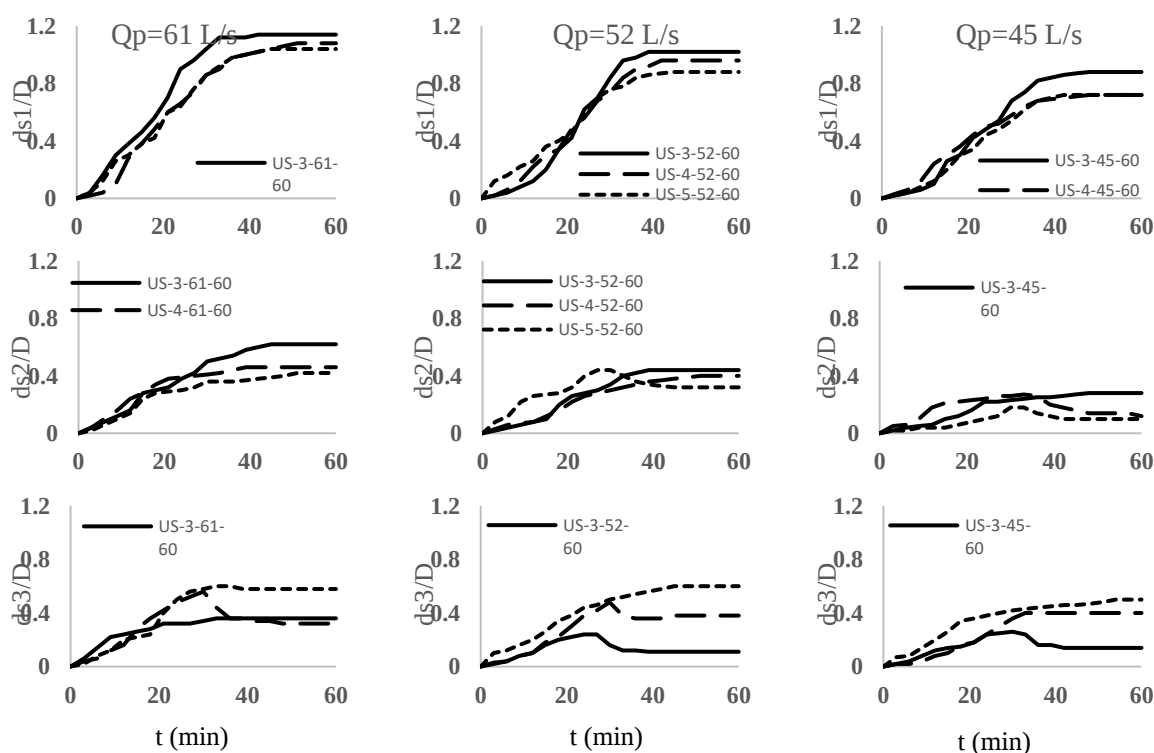


Fig. 6 Relative scouring depth variations versus time in 60 minutes unsteady flow with different relative spacing and discharge

شکل ۶ پذیری‌های عمق آبشستگی نسبت به زمان در جریان ناماندگار با زمان تداوم ۶۰ دقیقه با فاصله‌های نسبی و دبی‌های بیشینه متفاوت

پایه اول، به دلیل قدرت زیاد جریان و همچنین برخورد با گردابه‌های پایه دوم، تا پس از پایه دوم و به دو طرف رخ می‌دهد.

مشاهده‌های آزمایشگاهی نشان می‌دهد که برای آب‌نگارهای با دبی بیشینه بیشتر، حمل رسوب‌های شسته شده از پیرامون

افزایش فاصله و در آزمایش US-4-61-60 این بازپرسدگی در پیرامون پایه سوم به میزان ۲۴ درصد قطر پایه ملاحظه می‌گردد. با افزایش بیشتر فاصله نسبی، رسوب های تجمع یافته پس از هر پایه فرصت حمل تا حفره آبستگی پایه بعدی را ندارند؛ لذا در آزمایش US-5-61-60 نیز بازپرسدگی حفره آبستگی در پیرامون پایه‌ها به چشم نمی‌خورد. در آب نگار های با دبی بیشینه ۵۲ لیتر بر ثانیه، در فاصله های کمتر پشته رسوبی با ارتفاع بیشتری پس از پایه دوم تشکیل شد که باعث شد با فروکش کردن جریان، باز پرسدگی رسوب ها در پیرامون پایه سوم رخ بدهد که میزان آن در فاصله نسبی ۳ حدودا برابر با ۱۴ درصد قطر پایه بود. با زیاد شدن فاصله این فرآیند به پیرامون پایه دوم منتقل شد. زیرا به دلیل زیاد بودن فاصله نسبی، رسوب های شسته شده از پیرامون پایه اول در پشت آن تجمع یافتند که با فروکش کردن جریان و توقف افزایش عمق آبستگی، به حفره بعدی انتقال پیدا کردند. لذا برای فاصله های نسبی بیشتر،

به همین دلیل ارتفاع و حجم پشته‌های رسوبی پس از پایه دوم بیشتر از پایه اول بود؛ که شدت این موضوع با افزایش فاصله نسبی بین پایه‌ها کمتر شد. پس از دبی بیشینه آب نگار و با فروکش کردن جریان، قدرت جریان برای افزایش عمق آبستگی پیرامون پایه‌ها کم شده و در اثر فرسایش پشته‌ها رسوبی، پشته‌ها رسوبی را به حفره بعدی منتقل کرد. در حفره بعدی نیز به دلیل کم بودن قدرت جریان، رسوب ها فرصت رسوب گذاری داشتند. در پیرامون پایه ته‌نشین شده و عمق آبستگی پایه مربوطه کاهش یافت.

در شکل ۶ با بررسی آب نگار های با دبی بیشینه ۶۱ لیتر بر ثانیه به عنوان مثال و در آزمایش US-3-61-60 ملاحظه می‌شود که به دلیل کم بودن فاصله و زیاد بودن قدرت جریان پیرامون پایه‌ها، رسوب های شسته شده تا پس از پایه سوم حمل شده و در پشت آن تجمع یافته‌اند. لذا به دلیل کم بودن حجم و ارتفاع پشته‌های رسوبی پس از پایه اول و دوم، بازپرسدگی چاله آبستگی پیرامون پایه‌های دوم و سوم رخ نداد. درحالی‌که با

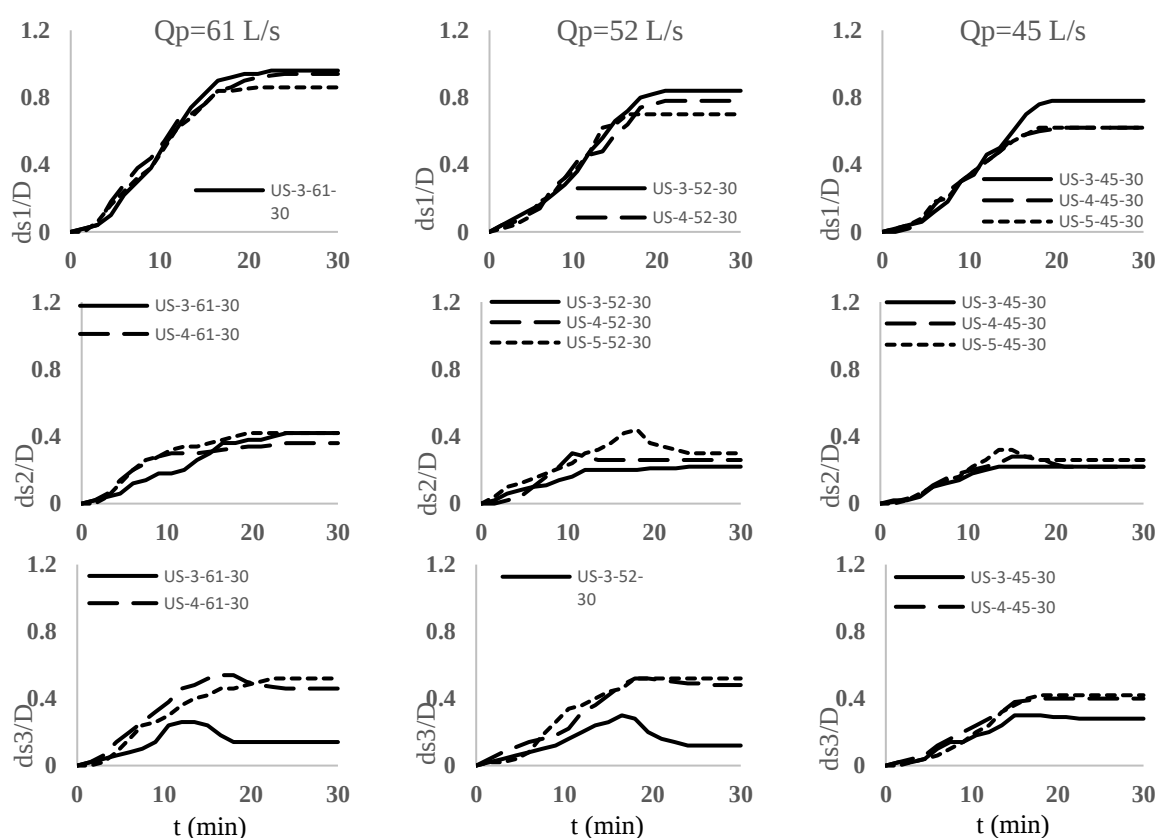


Fig. 7 Relative scouring depth variations versus time in 30 minutes unsteady flow with different relative spacing and discharge

شکل ۷ پذیری های عمق آبستگی نسبت به زمان در جریان غیر ماندگار با زمان تداوم ۳۰ دقیقه با فاصله های نسبی و دبی‌های بیشینه متفاوت

میزان با توجه به شکل ۸ برابر با ۳۲ درصد قطر پایه به ازای ۷۵ درصد کاهش زمان آب‌نگار می‌باشد.

در آب‌نگارهای با زمان ۱۵ دقیقه (شکل ۷) به دلیل کم شدن فرصت جریان برای پیش‌راندن رسوب‌ها، پشته‌های رسوبی با ارتفاع کمتر صورت گرفت و اغلب بیشتر در پشت پایه اول تجمع یافت؛ که این مهم باعث کاهش احتمال بازپرسدگی و همچنین میزان آن شد که در پایه دوم بیشتر رخ داد. در شکل ۸ ملاحظه می‌شود که همچون شکل ۷ هرچه فاصله کمتر و دبی بیشینه آب‌نگار بیشتر بود، ذرات فرسایش یافته بیشتر به پیش‌رانده و در نتیجه پشته رسوبی تشکیل شده پس از پایه دوم، قابل ملاحظه‌تر بوده و اثر فروکش کردن جریان پس از بیشینه دبی آب‌نگار، فرآیند بازپرسدگی، پیرامون پایه سوم رخ داد. همچنین، هرچه دبی بیشینه آب‌نگار کمتر و فاصله نسبی بیشتر بود، این فرآیند پیرامون پایه دوم حاصل شده، اما به دلیل زمان کمتر، شدت این فرآیندها کمتر بود.

بازپرسدگی رسوب‌های پیرامون پایه دوم با احتمال بیشتری رخ داد، در حالی‌که برای فاصله‌های نسبی کمتر، این فرآیند پیرامون پایه سوم رخ داد. همین موضوع برای آب‌نگارهای با دبی بیشینه ۴۵ لیتر بر ثانیه نیز برقرار بوده اما با شدت کمتری اتفاق افتاد. به طوری‌که بیشینه میزان بازپرسدگی در این آب‌نگارها برابر با ۱۲ درصد قطر پایه بود. در شکل ۶ و با بررسی عمق آبشستگی نهایی پیرامون پایه‌ها ملاحظه می‌گردد که تأثیر فاصله بر عمق آبشستگی نهایی پایه اول ناچیز بود. در حالی‌که بیشینه این میزان برای پایه دوم برابر با ۲۰ درصد قطر پایه و برای پایه سوم برابر با ۴۹ درصد قطر پایه به ازای ۶۶ درصد افزایش فاصله نسبی بود. در شکل ۷ ملاحظه می‌شود که به‌طور کلی با کاهش زمان تداوم آب‌نگار، میزان عمق آبشستگی نیز به دلیل کم بودن فرصت هر دبی برای استفاده از ظرفیت حمل رسوب‌ها و ایجاد آبشستگی، کاهش یافت؛ به طوری‌که ۵۰ درصد کاهش زمان آب‌نگار می‌تواند تا ۲۰ درصد قطر پایه، عمق آبشستگی پایه اول را در آب‌نگار و فاصله نسبی متناظر با آن کاهش دهد. این

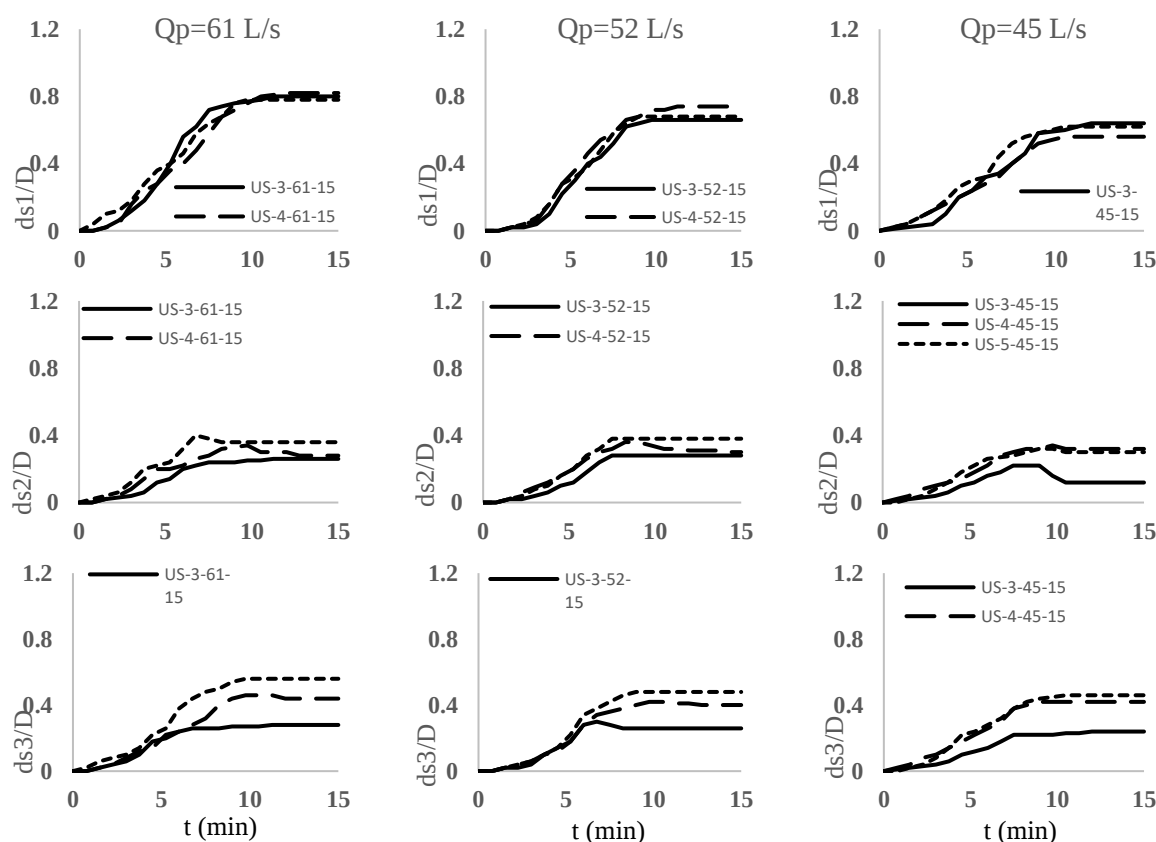


Fig. 8 Relative scouring depth variations versus time in 15 minutes unsteady flow with different relative spacing and discharge

شکل ۸ پذیری عمق آبشستگی نسبت به زمان در جریان غیر ماندگار با زمان تداوم ۱۵ دقیقه با فاصله‌های نسبی و دبی‌های بیشینه متفاوت

به طور کلی می‌توان نتیجه گرفت که زیاد شدن فاصله نسبی بین پایه‌ها، احتمال بازپرسدگی پیرامون پایه دوم را افزایش و پیرامون پایه سوم را کاهش می‌دهد. همچنین کم بودن زمان آب نگار، به دلیل کمتر بودن آبشستگی پایه پیشین و همچنین کمتر بودن زمان لازم برای انتقال به حفره بعدی، باعث کم تر شدن احتمال و میزان بازپرسدگی می‌شود. همچنین می‌توان دریافت که تأثیر فاصله نسبی بر روند و میزان آبشستگی پایه

سوم، بیشتر از پایه دوم و در پایه دوم، بیشتر از پایه اول می‌باشد. اما در جریان ماندگار، بیشتر بودن تأثیر فاصله نسبی بر آبشستگی پایه دوم نسبت به پایه سوم به چشم می‌خورد. جدول ۳ میزان‌های بیشینه عمق آبشستگی، میزان‌های نهایی عمق آبشستگی و میزان عمق بازپرسدگی حفره آبشستگی در صورت وجود را در آزمایش‌های جریان ناماندگار بیان می‌کند که همه‌ی اعداد در آن به صورت بی بعد و نسبتی از قطر پایه هستند.

جدول ۳ میزان‌های عمق آبشستگی و بازپرسدگی حفره نسبت به قطر پایه

Table 3 Scouring depths and backfilling values to the pile diameter

No.	Type	Name	Second pier			Third pier		
			Maximum scour depth	Final scour depth	Backfilling depth	Maximum scour depth	Final scour depth	Backfilling depth
1	Unsteady	US-3-45-15	0.22	0.12	0.1	0.24	0.24	-
2	Unsteady	US-3-52-15	0.28	0.28	-	0.26	0.26	-
3	Unsteady	US-3-61-15	0.26	0.26	-	0.28	0.28	-
4	Unsteady	US-3-45-30	0.22	0.22	-	0.3	0.28	0.2
5	Unsteady	US-3-52-30	0.22	0.22	-	0.3	0.12	0.18
6	Unsteady	US-3-61-30	0.42	0.42	-	0.26	0.14	0.12
7	Unsteady	US-3-45-60	0.28	0.28	-	0.26	0.14	0.12
8	Unsteady	US-3-52-60	0.44	0.44	-	0.24	0.11	0.13
9	Unsteady	US-3-61-60	0.62	0.62	-	0.36	0.36	-
10	Unsteady	US-4-45-15	0.34	0.32	0.02	0.42	0.42	-
11	Unsteady	US-4-52-15	0.36	0.3	0.06	0.42	0.4	0.02
12	Unsteady	US-4-61-15	0.34	0.28	0.06	0.46	0.44	0.02
13	Unsteady	US-4-45-30	0.28	0.22	0.06	0.4	0.4	-
14	Unsteady	US-4-52-30	0.52	0.48	0.04	0.44	0.3	0.14
15	Unsteady	US-4-61-30	0.36	0.36	-	0.52	0.52	-
16	Unsteady	US-4-45-60	0.27	0.12	0.15	0.4	0.4	-
17	Unsteady	US-4-52-60	0.4	0.4	-	0.48	0.38	0.1
18	Unsteady	US-4-61-60	0.46	0.46	-	0.56	0.32	0.24
19	Unsteady	US-5-45-15	0.32	0.3	0.02	0.46	0.46	-
20	Unsteady	US-5-52-15	0.38	0.38	-	0.48	0.48	-
21	Unsteady	US-5-61-15	0.4	0.36	0.04	0.56	0.56	-
22	Unsteady	US-5-45-30	0.32	0.26	0.06	0.42	0.42	-
23	Unsteady	US-5-52-30	0.3	0.26	0.04	0.52	0.52	-
24	Unsteady	US-5-61-30	0.42	0.42	-	0.54	0.46	0.08
25	Unsteady	US-5-45-60	0.18	0.1	0.08	0.5	0.5	-
26	Unsteady	US-5-52-60	0.44	0.32	0.12	0.6	0.6	-
27	Unsteady	US-5-61-60	0.42	0.42	-	0.6	0.58	0.02

۴- نتیجه‌گیری

در این پژوهش به بررسی تأثیر جریان ماندگار و غیر ماندگار بر آبشستگی پیرامون گروه‌پایه‌ها پرداخته شد. بررسی فرآیند آبشستگی در طول زمان، نشان داد که روند این فرآیند در جریان غیر ماندگار، به صورتی متفاوت از دیگر فرآیندها عمل می‌کند و پدیده‌ای رخ می‌دهد که بازپرسدگی حفرة آبشستگی نامیده شد که این پدیده ناشی از اندر کنش ساز و کارها موجود در فرآیند آبشستگی گروه‌پایه‌ای پل و پذیری‌های جریان در طول آب‌نگار می‌باشد. با جمع بندی نتایج به دست آمده می‌توان گفت که پدیده بازپرسدگی که در جریان ماندگار به دلیل ثابت بودن قدرت گردابه‌ها خود را به صورت ثابت ماندن عمق آبشستگی نشان می‌داد، در جریان غیر ماندگار به دلیل کاهش قدرت جریان و گردابه‌های آبشستگی در بازوی پایین‌رونده آب‌نگار، به صورت کاهش عمق آبشستگی نمایان شد.

در نهایت بررسی فرآیند آبشستگی پیرامون گروه‌پایه‌ها در جریان ماندگار و غیر ماندگار نشان می‌دهد که در جریان ناماندگار در بازوی بالارونده آب‌نگار، رسوب‌های پیرامون هر پایه فرسایش پیدا می‌کنند و در صورت دور بودن پایه بعدی یا کم قدرت بودن گردابه آن، رسوب‌های فرسایش یافته، پس از پایه رسوبگذاری می‌شوند. در غیر این صورت توسط گردابه‌های پایه بعدی به پیش و دوطرف رانده می‌شوند، تا جایی که شرایط جریان برای رسوبگذاری آنها فراهم باشد. با فروکش کردن دبی و در بازوی پایین‌رونده آب‌نگار، قدرت جریان برای افزایش عمق آبشستگی کاهش می‌یابد؛ اما به دلیل مقاومت پشته‌های رسوبی پس از پایه‌ها در مقابل جریان، این پشته‌ها دچار فرسایش می‌شوند و در صورت کافی بودن فاصله و همچنین کم بودن قدرت گردابه‌های پایه بعدی، به حفرة آبشستگی پایه بعد می‌ریزند و عمق آبشستگی آن را کاهش می‌دهند. آزمایش‌های انجام شده در این پژوهش نشان می‌دهد که همچنین بنابر مشاهده‌های این پژوهش، این فرآیند موجب می‌شود که در بررسی آبشستگی گروه‌پایه‌ها در اثر جریان ناماندگار، میزان عمق آبشستگی در پایان سیلاب با بیشینه عمق آبشستگی برابر نباشد و بیشینه میزان آبشستگی تحت تأثیر سیلاب، در میانه آن رخ دهد.

۵- فهرست نشانه‌ها

قطر پایه‌ها (m) D

قطر میانگین ذرات رسوب (m) d_{50}

عمق آبشستگی (m) ds

عدد فرود جریان Fr

شتاب نیروی ثقل (m/s^2) g

عمق آب (m) h

ضریب زبری نیکورادس K_s

بیشینه دبی آب‌نگار (L/s) Q

عدد رینولدز ذره Re_f

فاصله مرکز به مرکز پایه‌ها (m) S

چگالی نسبی ذرات s

زمان تداوم آب‌نگار (min) T_d

سرعت برشی جریان (m/s) U_f

سرعت میانگین جریان (m/s) V

نشانه‌های یونانی:

انحراف معیار ذرات رسوب σ

لزوجت جنبشی (سینماتیک) سیال (m^2/s) v

فراسنجه شیلدز Θ

زیر نویس‌ها:

بیشینه جریان آب‌نگار P

شرایط بحرانی جریان (ذرات در آستانه حرکت) C

پایه اول 1

پایه دوم 2

پایه سوم 3

۶- سپاسگزاری

نگارندگان بر خود لازم می‌دانند برای حمایت‌های مالی این پژوهش از مرکز مطالعات و همکاری‌های علمی بین‌المللی وزارت علوم، تحقیقات و فناوری (CISSC) و همچنین واحد پژوهشی دانشگاه شهید چمران اهواز تشکر نمایند.

۷- منابع

Amini, A., Melville, B.W., Thamer, M.A. and Ghazali A.H. (2012). Clear-Water Local Scour around Pile Groups in Shallow-Water Flow. Journal of Hydraulic Engineering, 138(2), 177-185.

Ataie-Ashtiani, B. and Beheshti A.A. (2006). Experimental Investigation of Clear-Water Local Scour at Pile Groups. Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, 132(10), 1100-1104.

- unsteady flow. *Journal of Hydraulic Engineering*, 135(7), 609-614.
- Lança, R., Fael, C., Maia, R. and Pêgo, J.P. (2013). Clear-Water Scour at Pile Groups. *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, 139(10), 1089-1098.
- Larsen, B.E., Arbøll, L.K., Kristoffersen, S.F., Carstensen, S. and Fuhrman D.R. (2018). Experimental study of tsunami-induced scour around a monopile foundation. *Coastal Engineering*, 138, 9-21.
- Larsen, B.E., Fuhrman, D.R., Baykal, C. and Sumer, B.M. (2017). Tsunami-induced scour around monopile foundations. *Coastal Engineering*, 129, 36-49.
- Liang, F., Wang, C., Huang, M. and Wang, Y. (2016). Experimental observations and evaluations of formulae for local scour at pile groups in steady currents. *Mar. Georesour. Geotechnol.*, 35(2), 245-255.
- Liang, F., Wang, C., Huang, M. and Wang, Y. (2017). Experimental observations and evaluations of formulae for local scour at pile groups in steady currents, 35(2), 245-255.
- Link, O., Castillo, C., Pizarro, A., Rojas, A., Ettmer, B., Escarriaza, C. and Manfreda, S. (2017). A model of bridge pier scour during flood waves. *Journal of Hydraulic Research*, 55(3), 310-323.
- Mahjoub, B., Mohammad Nezhad, B. and Behmanesh, J. (2014). Numerical modeling of local scouring around the bridge pier group and comparison with the experimental results. *Water and soil Journal (Agricultural Science and Technology)*, 28(2), 267-275. (In Persian)
- Melville, B.W. and Coleman, S.E. (2000). *Bridge scour*, Highlands Ranch, CO: Water Resources Publications.
- Mostafa, Y.E. and Agamy, A.F. (2011). Scour around single pile and pile groups subjected to waves and currents. *International Journal of Engineering Science and Technology*, 3(11), 8160-8178.
- Nazariha, M. (1996). Design relationships for maximum local scour depth for bridge pier groups, Thesis, Univ. of Ottawa, Ottawa.
- Nouh, M. (1986). Local scour at pile groups in meandering channels, Symposium on Scale Effects In Modelling Sediment Transport Phenomena., IAHR, Toronto, Canada.
- Chang, W.Y., Lai, J.S. and Yen, C.L. (2004). Evolution of scour depth at circular bridge piers, *Journal of Hydraulic Engineering*, 130(9), 905-913.
- Chow, W.Y. and Herbich, J.B. (1978). Scour around a group of piles. *Offshore Technology Conference*.
- Coleman, S.E. (2005). Clearwater local scour at complex piers. *Journal of Hydraulic Engineering*, 131(4), 330-334.
- Diwedat, A.S.I. (2013). Investigating the Impact of Pile Group Arrangement on Local Scour around Bridge Pier Using Physical Model. *Nile Water Science & Engineering Journal*, 6(2), 12-25.
- Dongfang, L., Hitoshi, G., Natasha, S. and Hongwu, T. (2013). Experimental Study of Local Scour around Twin Piles in Oscillatory Flows, *Journal of Waterway*, 139(5), 404-412.
- Engelund, F. and Hansen E. (1967). A monograph on sediment transport in alluvial streams, Copenhagen, stervoldgade 10, Technical University of Denmark.
- Ezzeldin, M.M., Moharram, S.H., Sarhan, Th.E. and Elhamrawy, A.M.S. (2006). Scour Around Pile Group of Small Bridge. *Tenth International Water Technology Conference. IWTC10 Alexandria, Egypt*.
- Hannah, C. (1978). *Scour at Pile Groups*. M.S. thesis. Canterbury, New Zealand, Canterbury University.
- Jafari, F., Abbaspour, A. and Arvanaghi, H. and Hosseinzade-Dalir, A. (2020). Experimental and numerical investigation of scour around inclined pier group with sacrificial pile and collar. *Amirkabir Journal of Civil Engineering*. (In press)
- Kim, H.S., Nabi, M., Kimura, I. and Shimizub, Y. (2014). Numerical investigation of local scour at two adjacent cylinders. *Advances in Water Resources*, 70, 131-147.
- Kothyari, U.C., Garde, R.C.J. and Ranga Raju, K.G. (1992). Temporal variation of scour around circular bridge piers. *Journal of Hydraulic Engineering*, 118(8), 1091-1106.
- L'opez, G., Teixeira, L., Ortega-Sánchez, M. and Simarro, G. (2013). Estimating final scour depth under clear-water flood waves. *Journal of Hydraulic Engineering*, 140(3), 328-332.
- Lai, J.S., Chang, W.Y. and Yen, C.L. (2009). Maximum local scour depth at bridge piers under

Oliveto, G. and Hager, W.H. (2005). Further results to time-dependent local scour at bridge elements, *Journal of Hydraulic Engineering*, 131(2), 97-105.

Rashno, E., Zarrati, A.R. and Tabarestani M.K. (2017). Experimental Investigation of Local Scour around Bridge Pier Group. *Journal of Experimental Research in Civil Engineering*, 3(6), 143-154.

Rashno, E., Zarrati, A.R. and Tabarestani, M.K. (2020). Design of riprap for bridge pier groups. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 47(5), 516-522.

Shaker, E. (2019). Experimental Investigation on the Influence of Unsteady Flow on Bed Scour Under the Pipeline Crossing Across the River. Ph.D. Thesis. Shahid Chamran University of Ahvaz, 149 p. (In Persian)

Sheppard, D.M. and Renna, R. (2005). Bridge scour manual, Tallahassee, Florida DOT.

Sui, T., Staunstrup, L.H., Carstensen, S. and Fuhrman, D.R. (2021). Span shoulder migration in three-dimensional current-induced scour beneath submerged pipelines. *Journal of Coastal Engineering*, Elsevier. 164, <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2020.103776>.

Sumer, B.M. and Fredsøe J. (1998). Wave scour around group of vertical piles. *Journal of waterway, port, coastal, and ocean engineering*, 124(5), 248-256.

Sumer, B.M. and Fredsøe J. (2002). The mechanics of scour in the marine environment, Singapore, World Scientific.

Tabarestani, M.K. and Zarrati, A.R. (2016). Local Scour Calculation Around Bridge Pier During Flood Event. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 21, 1462-1472.

Vaghefi, M., Tabib-Nazhad-Motlagh, M.J., Hashemi, S.Sh. and Moradi, S. (2018). Experimental study of bed topography variations due to placement of a triad series of vertical piers at different positions in a 180° bend. *Arabian Journal of Geosciences*, 11(5), 102.

Vittal, N., Kothiyari, U. and Haghighat, M. (1994). Clear-water scour around bridge pier group. *Journal of Hydraulic Engineering*, 120(11), 1309-1318.

Zhang, Q., Zhou, X.L. and Wang, J.H. (2017). Numerical investigation of local scour around three adjacent piles with different arrangements under current. *Ocean Engineering*, 142, 625-638.