

EXTENDED ABSTRACT

Experimental investigation of the effect of geometrical parameters on the equilibrium time of scour around the complex pier group

S. Rahimnejad¹, M. Esmaeili Varaki^{2*}, B. shafeie Sabet³ and A. Radice⁴

1- M.Sc. student, Department of Water Engineering, University of Guilan, Rasht, Iran.

2* - Corresponding Author, Associate Professor, Department of Water Engineering, Department of water and environmental engineering, Caspian Sea basin research center, University of Guilan, Rasht, Iran.(esmaeili@Guilan.ac.ir)

3- Assistant Professor, Department of Water Engineering, University of Guilan, Rasht.

4- Associate Professor, Department of Civil and Environmental Engineering, Politecnico di Milano, Milan, Italy.

I - ARTICLE INFO

Article history:

Received: 10 December 2022

Revised: 29 April 2023

Accepted: 1 May 2023

Keywords:

Complex pier, Equilibrium scour time, Scour depth, Pile cap geometry.

TO CITE THIS ARTICLE:

Rahim Nejad, S., Esmaeili Varaki, M., Shafiei, B., Radice, A. (2024). 'Experimental investigation of the effect of geometrical parameters on the equilibrium time of scour around the complex pier group', *Irrigation Sciences and Engineering*, 47(1), pp. 99-117. doi: 10.22055/jise.2023.42501.2048

Introduction

Scour around the bridge piers is a kind of erosion that occurs due to complex vortex flows and finally creates a hole around the bridge piers (Yang et al., 2019). The maximum scour depth, which called Equilibrium scour depth, can take a very long time to reach. Although many researches have been carried out to determine the equilibrium scour time, there is still no suitable criteria for determining the equilibrium scour time for the complex piers which consist of the pile group, pile cap and piers. In the present study, considering the importance of this fact that the local scour process is dependent on time, the effect of the complex pier geometrical parameters on the equilibrium scour time around the complex pier is investigated. In addition, a regression equation for the estimation of equilibrium scour time was presented which has suitable performance to estimate desired output in the range of the experimental data of the present study.

Methodology

The experiments were carried out at the hydraulic and physical-hydraulic modeling laboratory of the water engineering department of University of Guilan using a rectangular flume with a recirculation system 8.15 m long, 0.88m wide and 1 m deep which had walls made of glass and bed made of iron. The pier group in this study consisted of two rectangular columns made of aluminum with a width and length of 2.5 and 3.5 cm, respectively; with 28-degree skew angle were placed on rectangular pile cap with 10 cm width and 16 cm length and 3 and 5 cm thicknesses. The piles were prepared from iron pipes with 2 cm length and 3 cm width and were installed in the form of 2×2 and 2×3 arrangements below the pile cap the sediment used in this study was uniform sand with a particle size of 0.7 mm, large enough to avoid ripple formation. This sand was used to fill a recess section, 1.5 m long and 0.3 m deep. The upstream and downstream reaches of the flume were covered with coarser sand with a size of 1–2 mm. The recess section and the complex piers were sufficiently distant from the flume inlet to ensure that the scour process was induced by a developed flow.

For each run, water was let into the channel at a low discharge to prevent undesired sediment motion before the run was intended to start. Then, the flow depth was increased to the prescribed

value of 0.23 m using the butterfly gate. Finally, the flow discharge was increased to the target value of 0.0537 m³/s, continuously adjusting the butterfly gate to maintain a constant water depth.

Scour depth values were frequently collected using a point gauge whose shape enabled scour depth values to be taken below the cap if needed. Experiments were ended as the variation of the scour depth became less than 1 mm after 3 hours based on Raudkivi and Ettema (1983). The final scour topography was measured using a Laser scanner Leica with ± 1 mm accuracy.

Results and Discussion

It is common to use the effective or equivalent diameter (D_e) for the effect of the effective components in the investigation of scour around the pier groups. The comparison of the results showed that in each installation of the top level of the pile cap, the effective diameter increased by 40% on average with the increase in the diameter of the piles, while the effective diameter increased by 5% on average with increase in the thickness of the pile cap. Also, by increasing the top level installation of the pile cap, due to the smaller piles diameter compared to the pier width, the effective diameter decreases by an average of 8%.

The comparison of the laboratory results of the top level installation of the pile cap $Z/D=1$, indicated that as the relative piles diameter (d_p/D) increased from 0.6 to 0.9 which led to increase in the relative effective diameter of the complex pier, the value of the equilibrium scour time and corresponding scour depth (d_{se}/D) increased by 20% and 11% on average, respectively. At the same condition, the value of the relative pile cap thickness (t_{pc}/D) increased from 0.9 to 1.4 and due to the increase in the relative effective diameter of the complex pier, the equilibrium scour time decreased by 27% on average. Also, the relative equilibrium scour depth (d_{se}/D) decreased by 7% on average. Furthermore, by changing the arrangements of the piles from 2×2 to 2×3 and increasing the relative effective diameter of the complex pier, the value of equilibrium scour time and relative equilibrium scour depth (d_{se}/D) increased by 15% and 13% on average, respectively.

The comparison of the laboratory results in the $Z/D=2$, indicated that with the increase of d_p/D from 0.6 to 0.9, the value of the equilibrium scour and d_{se}/D value increased by 27% and 20% on average, respectively. The laboratory results showed that the increase in T_{pc}/D from 0.9 to 1.4 and increase in D_e/D led to a decrease in the value of equilibrium scour time 34% on average. In addition, the value of d_{se}/D decreases 8% on average. Considering the results indicated that by changing the arrangement of the piles from 2×2 to 2×3 and increasing the D_e/D , the value of the equilibrium scour time and d_{se}/D did not change significantly.

Comparing the results showed that in the $Z/D=3$, by the increasing of d_p/D from 0.6 to 0.9 and increasing D_e/D , the value of the equilibrium scour time increased by 13% on average. In addition, the value of d_{se}/D increases by 23% on average. Considering the laboratory results showed that increasing T_{pc}/D from 0.9 to 1.4 did not significantly change the amount of equilibrium scour time and d_{se}/D . The comparison of the laboratory results showed that by changing the arrangement of the piles from 2×2 to 2×3 , the value of the equilibrium scour time and d_{se}/D did not change significantly.

The laboratory results in the $Z/D=4$ showed that by increasing d_p/D from 0.6 to 0.9, the value of the equilibrium scour time increases and the d_{se}/D increased by 30 and 24% on average, respectively. The comparison of the results showed that the increase of T_{pc}/D from 0.9 to 1.4, the D_e/D increased and the amount of equilibrium scour time increased by 18% and the value of d_{se}/D increased by 12% on average. By changing the arrangement of piles from 2×2 to 2×3 , the value of the equilibrium scour time increased by 11% on average and the value of d_{se}/D does not change significantly.

In this study, in order to derive the regression equation to estimate the equilibrium scour time around the complex pier group, the effective parameters were studied in the form of following equation:

$$t_e = a \left(\frac{D_e}{T}\right)^b \left(\frac{Z}{T}\right)^c \left(\frac{d_p}{T}\right)^d \left(\frac{y}{D_e}\right)^e \left(\frac{d_{se}}{D_e}\right)^f \quad (1)$$

The corresponding values of variables are shown in Table (1). The comparison of results indicated that there is good agreement between the desired outputs and experimental results.

Table 1- Coefficients of equations to estimate equilibrium time and related statistical indicatnes

The number of parameters	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	<i>d</i>	<i>e</i>	<i>f</i>	<i>RMSE</i>	<i>NSE</i>	<i>R</i> ²	<i>MAPE</i> (%)
2	0.68	1.05	2.32	0	0	0	0.12	0.99	0.99	4.67
4	0.72	0.97	-0.004	0.08	2.32	0	0.03	0.99	1	0.21
5	0.72	0.96	0.006	0.09	2.33	-0.01	0.04	0.99	1	0.015

Conclusions

In this research, the effect of different parameters of complex bridge pier (the relative thickness of pile cap, the relative diameter of piles, the arrangement of piles and the relative elevation of pile cap) on the equilibrium scour time around the complex pier group was investigated experimentally. The comparison of the results showed that for all installation of the top level of pile cap, by changing the arrangements of the piles from 2×2 to 2×3, the equilibrium scour time increased between 4 and 22%. The results indicate that at all installation of the top level of the pile cap, by increasing (d_p/D) from 0.6 to 0.9, the equilibrium scour time increases between 14 and 26% on average. The comparison of the results showed that the equilibrium scour time increased by increasing the relative thickness of the pile cap in the range of 8 to 18% on average, but by increasing the number of piles, the equilibrium scour time increased from 0.9 to 1.4 and by increasing the pile cap thickness (T_{pc}/D), the equilibrium scour time increased by 3 and 28% on average. Also, in a regression equations including 2, 4, and 5 parameters were derived to estimate the equilibrium scour time around the complex pier group.

References

- 1- Yang. Y. Melville. B.W. Macky. G. H. and Shamseldin. A. Y. 2019. Local scour at complex bridge piers in close proximity under clear-water and live-bed flow regime. *Water*, 11: 1530. [doi: 10.3390/w11081530](https://doi.org/10.3390/w11081530).
- 2- Raudkivi. A. J. and Ettema. R. 1983. Clear-water scour at cylindrical piers. *Journal of Hydraulic Engineering*, 109 (3): 339-350.



مطالعه آزمایشگاهی اثر پارامترهای هندسی بر زمان تعادل آبشستگی اطراف گروه پایه مرکب

سپیده رحیم‌نژاد^۱، مهدی اسمعیلی ورکی^{۲*}، بهنام شفیعی ثابت^۳ و السیو رادیس^۴

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد سازه های آبی، گروه مهندسی آب، دانشکده علوم کشاورزی، دانشگاه گیلان، رشت.

۲- نویسنده مسئول، دانشیار گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه گیلان، رشت، ایران و وابسته پژوهشی پژوهشکده حوضه آبی دریای خزر، دانشگاه گیلان، رشت، ایران esmaeili@guilan.ac.ir.

۳- استادیار گروه مهندسی آب، دانشکده علوم کشاورزی، دانشگاه گیلان، رشت.

۴- دانشیار گروه عمران و محیط زیست، دانشکده عمران، دانشگاه پلی تکنیک میلان، ایتالیا، میلان.

دریافت: ۱۴۰۱/۰۹/۱۹

بازنگری: ۱۴۰۲/۰۲/۰۹

پذیرش: ۱۴۰۲/۰۲/۱۱

چکیده

آبشستگی در مجاورت پایه‌های پل یکی از مهم‌ترین عوامل مؤثر بر پایداری پل‌های احداث شده در رودخانه‌ها می‌باشد. با توجه به اهمیت بررسی مکانیزم‌ها و پارامترهای اثرگذار بر مقدار عمق آبشستگی، تاکنون محققین زیادی به بررسی آن پرداخته‌اند. یکی از موضوع‌های مهم در این زمینه، اطمینان از حصول عمق تعادل آبشستگی و مدت زمان رسیدن به آن می‌باشد. در تحقیق حاضر، اثر پارامترهای هندسی گروه پایه مرکب بر زمان تعادل آبشستگی به صورت آزمایشگاهی مورد بررسی قرار گرفت. آزمایش‌ها روی گروه پایه کج نصب شده روی سر شمع با ضخامت‌های نسبی (T_{pc}/D) $0/9$ و $1/4$ ، گروه شمع‌هایی با قطرهای نسبی مختلف (d_p/D) $0/6$ و $0/9$ ، آرایش شمع‌های 2×2 و 2×3 و تراز نسبی کارگذاری سرشمع (Z/D) $1/2$ ، 3 و 4 انجام شدند. مقایسه نتایج نشان داد در هر تراز نسبی کارگذاری سرشمع‌ها، زمان تعادل آبشستگی با افزایش قطر شمع‌ها و تعداد شمع‌ها افزایش می‌یابد. همچنین در ترازهای کارگذاری سرشمع در نزدیکی بستر، با افزایش ضخامت سرشمع‌ها، زمان تعادل آبشستگی کاهش یافته و ولی با افزایش تراز کارگذاری و امکان عبور بیشتر جریان از فضای زیر سرشمع، زمان تعادل آبشستگی افزایش می‌یابد. علاوه بر این، رابطه رگرسیونی برای برآورد زمان تعادل آبشستگی در دامنه داده‌های آزمایشگاهی تحقیق حاضر ارائه شد.

کلید واژه‌ها: پایه پل مرکب، زمان تعادل آبشستگی، عمق آبشستگی، هندسه سرشمع.

مقدمه

آبشستگی یکی از مسائل مهم در علم مهندسی رودخانه و مهندسی سواحل می‌باشد. محققین آبشستگی موضعی اطراف پایه‌های پل‌ها را یکی از مهم‌ترین عوامل تخریب پل‌ها می‌دانند. براساس گزارش‌های منتشر شده، علی‌رغم بهبود و ارتقا دانش فنی در مورد طراحی سازه‌های پل‌ها و پیشرفت تکنولوژی، آمار تخریب پل‌ها افزایش یافته است. لذا بررسی هرچه بیشتر این پدیده جهت رسیدن به نتایج دقیق‌تر امری ضروری است. تخریب پل‌ها که می‌تواند ناشی از آبشستگی باشد نه تنها اهداف مهندسی را تحت تاثیر قرار می‌دهد، بلکه منجر به تغییرات ریخت‌شناسی، هیدرولیکی، رسوبی و محیط زیستی رودخانه در محدوده سازه می‌شود (Lagasse et al., 2009).

آبشستگی در حقیقت جابه‌جایی ذرات توسط جریان از محل استقرار اولیه آن‌ها به مکان دیگری است. آبشستگی ممکن است در نتیجه تغییرات طبیعی جریان در آبراهه یا در نتیجه فعالیت‌های انسانی مانند ساخت سازه‌ها در مسیر جریان یا برداشت مصالح بستر اتفاق افتد. به‌طور کلی، آبشستگی را می‌توان از نظر علل

ایجاد آن به سه بخش آبشستگی عمومی، آبشستگی انقباضی و آبشستگی موضعی (اطراف پل‌ها و تکیه‌گاه‌ها) طبقه‌بندی نمود (Richardson and Davis, 2001).

آبشستگی در اطراف پایه پل‌ها در واقع نوعی فرسایش می‌باشد که در اثر جریان‌های پیچیده گردابه‌ای شکل رخ داده و در نهایت باعث ایجاد یک گودال در اطراف پایه‌های پل می‌شود. مکانیزم و الگوی جریان آب در اطراف پایه‌های پل بسیار پیچیده است. دو عامل تاثیرگذار باعث تغییر در مکانیزم جریان در اطراف پایه‌های پل می‌شود: (۱) برخورد جریان آب و (۲) جدا شدن جریان آب از پایه‌های پل. با برخورد جریان به پایه پل، انرژی جنبشی جریان افزایش یافته و ساختارهای متلاطم جدیدی به نام گردابه‌های نعل‌اسبی، برخاستگی و موج کمائی ایجاد می‌شود. با برخورد جریان آب به پایه پل، کاهش فشار از سطح آزاد جریان به سمت بستر رخ داده و جریان‌های رو به پایینی ایجاد می‌شود. سرعت این جریان‌ها یکنواخت نبوده و به دلیل متغیر بودن گرادیان فشار در عمق، از سطح آب به طرف بستر بیشتر می‌شود. جریان‌های رو به پایین پس از برخورد به بستر رودخانه با جریان

هفته یا بیشتر در آزمایشگاه) به طول انجامد. طبق نتایج آن‌ها توسعه زمانی آب‌شستگی در شرایط آب زلال روند تقریبی از صفر تا عمق حداکثر آب‌شستگی دارد.

Raudkivi و Ettema (1983) آب‌شستگی آب زلال در پایه‌های استوانه‌ای را بررسی کردند. آن‌ها بیان داشتند که عمق تعادل آب‌شستگی به اندازه ذرات رسوبی بستر، میانگین اندازه ذرات نسبت به قطر پایه استوانه‌ای، نسبت عمق جریان به قطر پایه و اندازه ذرات رسوبی بستگی دارد. ایشان زمان تعادل را مدت زمانی معرفی نمودند که در سه ساعت متوالی بیش از یک میلی‌متر آب‌شستگی رخ ندهد.

Melville و Chiew (1999)، مقیاس زمانی آب‌شستگی موضعی اطراف پایه‌های پل را به‌صورت آزمایشگاهی مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها بازه زمانی که نرخ تغییر آب‌شستگی پس از ۲۴ ساعت کمتر از پنج درصد از قطر پایه تغییر نماید را به‌عنوان زمان تعادل معرفی نمودند. نتایج نشان داد که با تغییر زمان انجام آزمایش‌ها از پنج تا ۴۰ درصد، عمق آب‌شستگی به مقدار ۵۰ تا ۸۰ درصد تغییر می‌یابد. در نهایت رابطه جدیدی برای تخمین زمان مورد نیاز برای توسعه عمق تعادل آب‌شستگی موضعی پیشنهاد شد.

Oliveto و Hager (2002)، توسعه زمانی آب‌شستگی در پایه و تکیه‌گاه پل‌ها را بررسی کردند. در این بررسی با استفاده از استدلال‌های تشابه و مقایسه خصوصیات جریان، رابطه‌ای را برای توسعه زمانی آب‌شستگی پیشنهاد داده و با روابط ارائه شده قبلی مقایسه نمودند. بررسی نتایج نشان داد که توسعه زمانی آب‌شستگی به سه پارامتر اصلی طول پایه و تکیه‌گاه، عدد فرود و زمان نسبی بستگی دارد.

Coleman et al. (2003)، توسعه آب‌شستگی در تکیه‌گاه پل را بررسی کردند. آن‌ها اظهار داشتند که عمق آب‌شستگی در اطراف پایه پل به سرعت جریان، قطر پایه، عمق جریان و مشخصات هندسی پایه پل بستگی دارد. آن‌ها افزایش عمق آب‌شستگی در دوره زمانی ۲۴ ساعته به کمتر از درصد خاصی (برای مثال ۱/۶۷ یا پنج درصد) از قطر پایه را به عنوان زمان تعادل آب‌شستگی تعریف کردند. مقایسه نتایج حاکی از آن بود که میزان تاثیر قطر رسوبات بر زمان تعادل آب‌شستگی ناچیز است. آن‌ها همچنین روشی برای تخمین عمق آب‌شستگی اطراف گروه شمع ارائه کردند.

Oliveto و Hager (2002)، توسعه زمانی آب‌شستگی در پایه و تکیه‌گاه پل‌ها را بررسی کردند. این بررسی براساس ۱۵۰ آزمایش آب‌شستگی بود که به مدت ۵۲ روز ادامه داشت. ایشان رابطه جدیدی برای توسعه زمانی آب‌شستگی پیشنهاد دادند. بررسی نتایج آزمایشگاهی نشان داد زمانی که عدد فرود آستانه حرکت بیش از ۰/۶ باشد، رابطه ارائه شده عملکرد خوبی دارد.

Grimaldi (2005)، اقداماتی را برای کاهش نرخ آب‌شستگی انجام داد. او کاهش نرخ آب‌شستگی در دوره زمانی

اصلی ترکیب‌شده و گردابه نعل اسبی را به‌وجود می‌آورد. گردابه‌های نعل اسبی بیشتر در جلو و اطراف پایه پل تشکیل می‌شوند. در اثر جدایی خطوط جریان از پایه پل، گردابه برخاستگی به‌وجود آمده که مانند یک گردباد رسوبات را از کف چاله آب-شستگی به سمت بالا حرکت می‌دهد. بررسی‌ها نشان می‌دهد که گردابه‌های نعل اسبی و برخاستگی نقش عمده‌ای را در ایجاد چاله آب‌شستگی اطراف پایه پل ایفا می‌کنند (Melville and Sutherland, 1988 & Yang et al., 2019).

با استفاده از گروه پایه‌ها، علاوه بر گردابه‌های نعل اسبی و برخاستگی، الگوی‌های متفاوت دیگری در اطراف پایه شکل گرفته که در نتیجه آن، مقدار آب‌شستگی تغییر می‌نماید. در این شرایط عامل تقویت‌کننده در پایه جلویی که باعث افزایش عمق آب‌شستگی در مجاورت آن شده و عامل حفاظ بودن که منجر به کاهش سرعت مؤثر در اطراف پایه پایین‌دست و در نتیجه کاهش مقدار آب‌شستگی در محدوده آن می‌گردد (Moreno and Couto 2015).

براساس مطالعه‌ای که توسط Yang et al. (2020) انجام گرفته است، پدیده آب‌شستگی به‌طور کلی دارای چهار مرحله ابتدایی، توسعه، تثبیت و تعادل است. در مرحله اول عمق حفره آب‌شستگی به سرعت افزایش می‌یابد و معمولاً مدت زمان کوتاه‌تری دارد و در ادامه مرحله دوم نرخ آب‌شستگی کاهش می‌یابد. در مرحله سوم دیواره پایین‌دست حفره آب‌شستگی دستخوش تغییرات محسوسی شده و روند تغییرات نيمرخ بستر کاهش می‌یابد. در نهایت در مرحله چهارم نرخ افزایش عمق آب‌شستگی ناچیز است و با توجه به شرایط جریان، ممکن است جابه‌جایی ذرات متوقف شده یا تنها حرکت ذرات درون حفره آب‌شستگی صورت گیرد.

تعیین عمق تعادل آب‌شستگی و زمان مربوطه در تخمین میزان پتانسیل تخریب جریان در اطراف سازه‌ها و طراحی ابعاد پی آن‌ها نقش مهمی ایفا می‌کنند. با وجود آنکه از سال ۱۹۵۱ تاکنون مطالعه‌های بسیار زیادی در رابطه با آب‌شستگی موضعی اطراف پایه‌های پل انجام گرفته است که منجر به بهبود قابل توجهی در دقت برآورد عمق آب‌شستگی شده است ولی هنوز موارد بسیاری در زمینه آب‌شستگی موضعی در اطراف پایه‌های پل به ویژه پایه‌های مرکب (پل‌های شامل گروه پایه، سرشمع و شمع‌ها) وجود دارد که ادامه تحقیق در این زمینه را ضروری می‌سازد (Lee, 2006).

تاکنون جنبه‌های مختلف موضوع آب‌شستگی اطراف پایه‌های پل بررسی شده است. از جمله این موارد توسعه زمانی آب‌شستگی و نقش مقیاس زمان بر تغییرات آب‌شستگی می‌باشد.

Chabert و Engeldinger (1956) آب‌شستگی اطراف پایه پل را بررسی کردند. آن‌ها مدت زمانی که عمق آب‌شستگی با گذشت زمان تغییر نمی‌کند را زمان تعادل آب‌شستگی معرفی کردند. از نظر آن‌ها آب‌شستگی در پایه‌های پل تحت شرایط آب زلال برای رسیدن به تعادل می‌تواند مدت زمان زیادی (تا چند

پارامترهای نسبت ضخامت سرشمع به عمق جریان، نسبت عرض پایه به عرض سرشمع، نسبت فاصله از سطح بستر اولیه تا بالای سرشمع به عمق جریان و شکل اجزای پایه‌های مرکب بستگی دارد.

Yang et al. (2019)، آب‌شستگی موضعی اطراف پایه‌های پل را در شرایط آب زلال و بستر زنده بررسی کردند. آن‌ها با بررسی روش‌های متداول پیش‌بینی عمق تعادل آب‌شستگی، یک روش ترکیبی از روش‌های موجود را پیشنهاد دادند. تجزیه و تحلیل نتایج نشان داد که زاویه انحراف پایه نسبت به راستای جریان باعث تسریع روند توسعه آب‌شستگی می‌شود. آن‌ها بیان داشتند که آرایش پایه‌های پل اثر محسوسی بر توسعه زمانی آب‌شستگی دارد.

Yang et al. (2020)، توسعه زمانی آب‌شستگی موضعی اطراف پایه‌های مرکب با جانمایی کج و هم‌راستا با جریان برای شرایط آب زلال را بررسی کردند. نتایج گویای آن است که برای پایه‌های مرکب هم‌راستا با جریان، عمق حداکثر آب‌شستگی در پایین‌دست پایه جلویی رخ می‌دهد اما، برای پایه‌های مرکب با جانمایی کج، آب‌شستگی از هر دو کناره‌ی جانبی پایه شروع شده و عمق حداکثر آب‌شستگی در پایین‌دست کناره پایه رخ می‌دهد. تجزیه و تحلیل نتایج نشان داد که روند توسعه آب‌شستگی برای پایه‌های مرکب با جانمایی کج در مقایسه با پایه‌های منفرد، بیشتر است. همچنین آن‌ها اظهار داشتند که در سرشمع مدفون، در مدت زمان بسیار کوتاهی بیش از سه‌چهارم عمق تعادل آب‌شستگی رخ داده و تنها تغییرات آب‌شستگی بسیار کمی بعد از آن باقی می‌ماند. اگرچه تاکنون تحقیقات بسیاری برای تعیین زمان تعادل آب‌شستگی انجام شده است ولی، هنوز معیار مناسبی برای تعیین زمان تعادل آب‌شستگی برای شرایطی که پایه پل از هندسه مرکب شامل گروه پایه، سرشمع و شعع می‌باشد، وجود ندارد. با توجه به اهمیت این موضوع که روند آب‌شستگی موضعی وابسته به زمان است، در تحقیق حاضر اثر پارامترهای هندسی پایه مرکب شامل ضخامت سرشمع و تراز کارگذاری آن، قطر و آرایش شعع‌ها بر زمان تعادل آب‌شستگی مورد بررسی قرار خواهد گرفت.

مواد و روش‌ها

تحلیل ابعادی

مجموعه‌ای از پارامترهای توصیف‌کننده که اندرکنش این عوامل در مسیر جریان موجب افزایش و یا کاهش آب‌شستگی می‌گردد شامل مشخصات سیال و رسوبات بستر، هندسه پایه پل، شعع و سرشمع‌ها، شرایط هیدرولیکی جریان و زمان را می‌شود که آن‌ها را می‌توان به‌صورت رابطه تابعی زیر نوشت:

$$f_1(Y, B, d_{st}, D, D_{pc}, L_{pc}, T_{pc}, Z, d_p, m, n,$$

۲۴ ساعته به کمتر از پنج درصد از یک سوم قطر پایه پل را بعنوان یک معیار محدودکننده برای زمان تعادل آب‌شستگی معرفی کرد. طبق معیار ایشان مدت زمان آزمایش‌ها طولانی‌تر از معیارهای ارائه شده توسط سایر محققین می‌باشد.

Lu et al. (2011)، تغییرات زمانی عمق آب‌شستگی در پایه‌های استوانه‌ای را به‌صورت آزمایشگاهی بررسی کردند. در این بررسی مدل نیمه تجربی برای پیش‌بینی توسعه زمانی عمق آب‌شستگی در پایه‌های استوانه‌ای پیشنهاد شد. مقایسه نتایج گویای آن است که مدل پیشنهاد شده برای برآورد توسعه زمانی عمق آب‌شستگی نتایج و عملکرد قابل قبولی داشت.

Simarro et al. (2011)، عمق تعادل آب‌شستگی در پایه‌های استوانه‌ای را به‌صورت آزمایشگاهی بررسی کردند. آن‌ها زمان تعادل را در حدود ۱۰۰ ساعت پیش‌بینی کردند.

Lança et al. (2013)، آب‌شستگی آب زلال را در گروه پایه‌ها بررسی کردند. آن‌ها تأثیر زمان، فاصله شعع‌ها، زاویه انحراف و تعداد شعع‌های گروه شعع را بر عمق تعادل آب‌شستگی در شرایط آستانه حرکت رسوبات مورد بررسی قرار دادند. بررسی نتایج آزمایش‌های با دوره زمانی کمتر از هفت روز، حاکی از عدم اطمینان برای تعیین عمق تعادل آب‌شستگی می‌باشد. آن‌ها بیان داشتند که عمق آب‌شستگی محاسبه شده از روش برون‌یابی، به‌طور متوسط ۱۰ درصد بیشتر از عمق آب‌شستگی اندازه‌گیری شده در پایان آزمایش‌های طولانی مدت است.

Ferraro et al. (2013)، اثر ضخامت سرشمع بر عمق حداکثر آب‌شستگی در پایه‌های مرکب را بررسی کردند. مقایسه‌ی نتایج نشان داد که به‌طور کلی سرشمع ضخیم‌تر، حفره آب‌شستگی عمیق‌تری ایجاد می‌کند. همچنین ضخامت سرشمع با تغییر تراز کارگذاری سرشمع بر توسعه زمانی آب‌شستگی اثرگذارتر می‌شود. بررسی نتایج حاکی از آن بود که فاصله سرشمع نسبت به بستر اولیه روی زمان تعادل آب‌شستگی اثرگذار است ولی بر عمق حداکثر آب‌شستگی تأثیری ندارد.

Moreno و Couto (2015)، اثر عرض نسبی پایه و ارتفاع سرشمع بر عمق آب‌شستگی موضعی اطراف پایه‌های مرکب را مورد بررسی قرار دادند. مقایسه نتایج نشان داد که افزایش مقادیر عمق آب‌شستگی (توسعه زمانی) به افزایش عرض پایه و تراز کارگذاری سرشمع مرتبط می‌باشد. آن‌ها با بررسی معیارهای متداول برای توقف آزمایش‌ها در پایه‌های مرکب، معیار جدیدی را معرفی کردند.

Moreno و Couto (2016)، پیش‌بینی عمق تعادل آب‌شستگی موضعی در پایه‌های مرکب پل را مورد بررسی قرار دادند. مشاهده‌های آزمایشگاهی حاکی از آن بود که در یک موقعیت خاص فاصله از سطح بستر اولیه تا بالای سرشمع، افزایش عرض پایه، کاهش طول بخش‌های پیشانی و جانبی سرشمع سبب افزایش مقادیر عمق تعادل آب‌شستگی می‌شود. علاوه بر این مدت زمان آزمایش و مراحل مختلف آب‌شستگی به

با جایگزینی پارامتر D به جای y به عنوان مقیاس طول، رابطه (۲) به صورت رابطه (۳)، ساده می‌گردد.

$$\frac{d_{st}}{D} = f_3\left(\frac{B}{D}, \frac{D}{y}, \frac{D_{pc}}{D}, \frac{L_{pc}}{D}, \frac{T_{pc}}{D}, \frac{Z}{D}, \frac{d_p}{D}, \frac{D_{50}}{D}, \frac{\rho_s}{\rho}, \frac{\rho U y}{\mu}, \frac{U}{\sqrt{gy}}, \sigma_g, m, n, \alpha, \beta, \frac{U t}{D}\right) \quad (3)$$

با توجه به شرایط آزمایشگاهی در تحقیق حاضر، از میان پارامترهای مؤثر بر آبشستگی پایه پل، زاویه‌های پایه‌های پل در صفحه موازی و قائم جریان (α و β) ثابت در نظر گرفته شد. پارامتر انحراف معیار هندسی ذرات رسوبی (σ_g) به جهت یکنواختی رسوبات مورد استفاده بر تغییرات عمق آبشستگی بی‌تأثیر است. همچنین، به دلیل آشفته بودن جریان، عدد رینولدز در تمام آزمایش‌ها از ۹۱۰۰ بیشتر بود و از این رو از تأثیر این پارامتر صرف نظر شد و رابطه (۳) به صورت رابطه (۴) اصلاح شد.

$$\frac{d_{st}}{D} = f_4\left(\frac{D}{y}, \frac{T_{pc}}{D}, \frac{Z}{D}, \frac{d_p}{D}, m, n, \frac{U t}{D}\right) \quad (4)$$

در این تحقیق از رابطه (۴) به عنوان یک رابطه اصلی برای انجام آزمایش‌ها استفاده شد.

$$D_{50}, U, U_c, \rho, \rho_s, \mu, g, \sigma_g, \alpha, \beta, t) = 0 \quad (1)$$

که در آن y : عمق جریان، B : عرض فلوم، d_{st} : عمق لحظه‌ای آبشستگی، D : عرض پایه پل، D_{pc} : عرض سرشمع، L_{pc} : طول سرشمع، T_{pc} : ضخامت سرشمع، Z : فاصله سرشمع تا تراز بستر اولیه جریان، d_p : قطر شمع، m : تعداد شمع در یک ردیف، n : تعداد شمع در یک ستون، D_{50} : قطری از ذرات که ۵۰ درصد ذرات از آن کوچکتر است، U : سرعت متوسط جریان، U_c : سرعت جریان برای شرایط آستانه حرکت، ρ : چگالی آب، ρ_s : چگالی رسوبات بستر، μ : لزجت دینامیک، g : شتاب ثقل، σ_g : انحراف معیار مصالح رسوبی بستر، α : زاویه انحراف پایه‌ها در صفحه موازی جریان، β : زاویه انحراف پایه‌ها در صفحه عمود بر جریان، و t : زمان از شروع آبشستگی می‌باشد. در شکل (۱)، برخی از پارامترهای هندسی معرفی شده است.

با استفاده از تئوری باکینگهام و با در نظر گرفتن متغیرهای y ، U و ρ به عنوان متغیرهای تکراری در تحلیل ابعادی می‌توان کمیت‌های بی‌بعد زیر را به دست آورد:

$$\frac{d_{st}}{D} = f_2\left(\frac{B}{y}, \frac{D}{y}, \frac{D_{pc}}{y}, \frac{L_{pc}}{y}, \frac{T_{pc}}{y}, \frac{Z}{y}, \frac{d_p}{y}, \frac{D_{50}}{y}, \frac{U}{U_c}, \frac{\rho_s}{\rho}, \frac{\rho U y}{\mu}, \frac{U}{\sqrt{gy}}, \sigma_g, m, n, \alpha, \beta, \frac{U t}{y}\right) \quad (2)$$

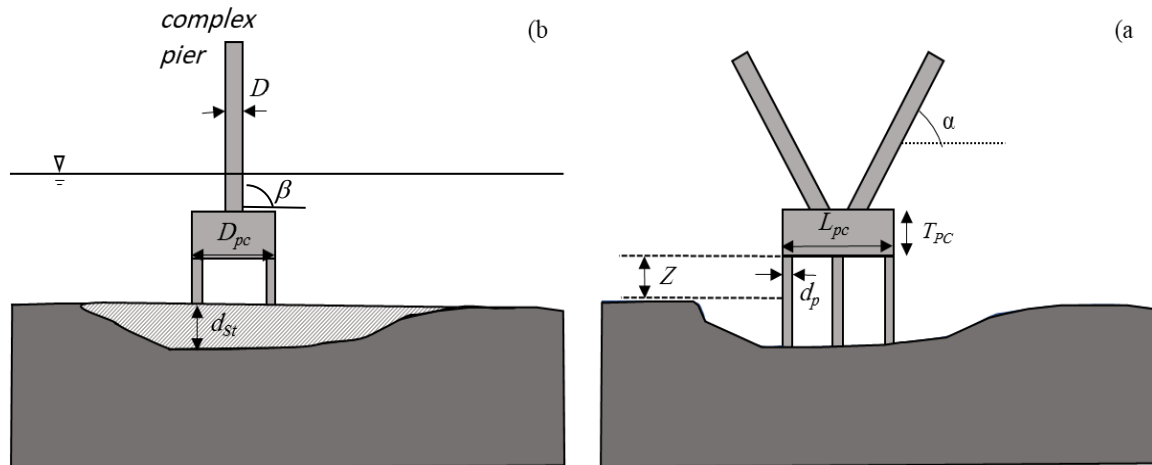


Fig. 1- Introducing the parameters of the complex pier group: (a side view and (b front view

شکل ۱- معرفی پارامترهای گروه پایه مرکب (a نمای جانبی و (b نمای روبه‌رو

توسعه‌یافتگی جریان قبل از رسیدن به پایه پل اطمینان حاصل شود.

گروه پایه مورد بررسی در این تحقیق از دو پایه کج مستطیلی شکل از جنس آلومینیوم به طول و عرض $2/5$ و $3/5$ سانتی‌متر تشکیل شده که با زاویه (α) 28 درجه روی سرشمع مستطیلی شکل به طول و عرض 10 و 16 سانتی‌متر و با ضخامت‌های سه و پنج سانتی‌متری نصب شد.

لازم به ذکر است تناسب هندسی این گروه پایه دارای مقیاس $1/190$ از پل هشتم شهر اهواز می‌باشد. در انتخاب مقیاس و ابعاد نهایی گروه پایه، ضوابطی که محققان در خصوص تاثیرناپذیری مقدار آب‌شستگی از عرض فلوم ارائه داده‌اند، رعایت گردید. طبق نظر Raudkivi و Ettema (1983) اگر نسبت عرض فلوم به عرض پایه پل از $6/25$ بیشتر باشد، دیواره‌های فلوم تاثیری بر مقدار آب‌شستگی نخواهند داشت. این نسبت برای پایه و ابعاد سرشمع پل مورد بررسی در فلوم آزمایشگاهی به ترتیب برابر با 25 و نه است. شمعی‌های مورد استفاده از لوله‌هایی با جنس آهن در قطرهای دو و سه سانتی‌متر تهیه و در قالب آرایش‌های 2×2 و 2×3 در زیر سرشمع نصب گردیدند.

تجهیزات آزمایشگاهی و روش انجام آزمایش‌ها

آزمایش‌های تحقیق حاضر در آزمایشگاه هیدرولیک و مدل‌های فیزیکی-هیدرولیکی گروه مهندسی آب دانشگاه گیلان در فلومی به شکل مستطیل با سیستم بازچرخانی به طول $8/15$ متر، عرض $0/88$ متر و عمق یک متر که دارای دیواره‌های از جنس شیشه و کف فلزی است، انجام گردید. در شکل‌های (۲) و (۳)، طرح کل فلوم آزمایشگاهی و پایه مرکب مورد بررسی نشان داده شده است.

به‌منظور تأمین دبی جریان، از پمپ سانتریفیوژ استفاده شد که می‌تواند دبی جریان را تا 70 لیتر بر ثانیه تأمین کند. با توجه به اهمیت تنظیم دقیق دبی در آزمایش‌ها، از یک دستگاه کنترل‌کننده سرعت دورانی الکتروموتور پمپ استفاده شد که با حداقل اتلاف وقت امکان تنظیم دبی جریان میسر می‌گردد. برای اندازه‌گیری دبی جریان از دبی‌سنج التراسونیک با دقت $\pm 0/01$ لیتر بر ثانیه استفاده شد که روی لوله مکش پمپ نصب شده بود. جریان خروجی از پمپ ابتدا وارد مخزن اولیه و پس از عبور از آن وارد مخزن آرام‌کننده پایین‌دست می‌شود و سرانجام با عبور از مستقیم‌ساز جریان در خروجی این مخزن، وارد فلوم می‌گردد. محل نصب پایه پل پنج متر بعد از ورودی فلوم انتخاب شد تا از

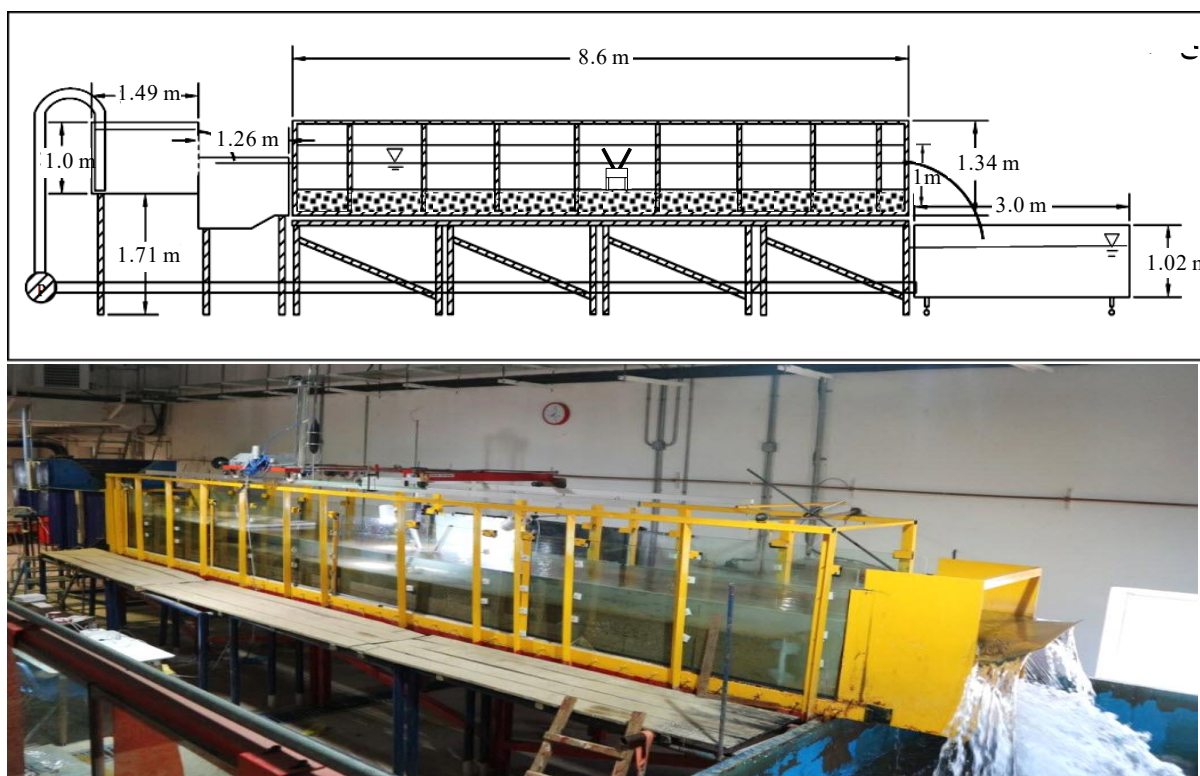


Fig. 2- Scheme and view of laboratory flume

شکل ۲ - طرح کلی و نمایی از فلوم آزمایشگاهی

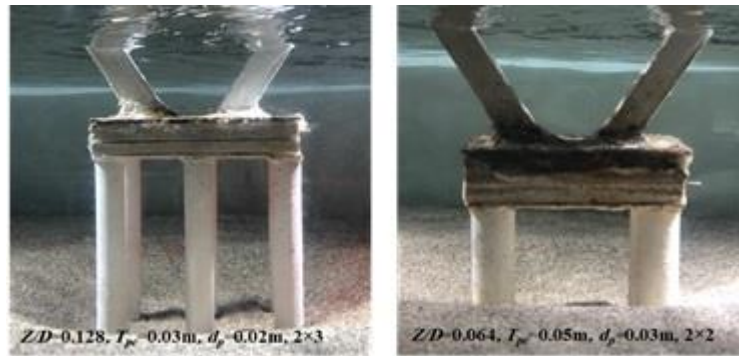


Fig. 3- View of the complex pier for different pile group geometries at the different relative pile cap elevation

شکل ۳- نمایی از گروه پایه مرکب برای هندسه‌های مختلف گروه‌شمع در ترازهای نسبی مختلف کارگذاری سرشمع

Table 1- The range of experimental parameters

جدول ۱- دامنه پارامترهای آزمایشگاهی

Z/D	Fr	y/D	Pile arrangement	d_p/D	T_{pc}/D
1, 2, 3, 4	0.18	6.57	3×2 & 2×2	0.6 & 0.9	0.9
					1.4

انتهایی برای رسیدن به زمان تعادل نمی‌توان به‌دست آورد چراکه هرچه از زمان شروع آب‌شستگی گذشته باشد، باز هم فرآیند فرسایش در حفره هر چند اندک و نامحسوس ادامه می‌یابد و در زمان طولانی نمودار تغییرات آن بصورت مجانب‌وار با خط افق امتداد می‌یابد.

در این تحقیق از دو معیار Melville و Chiew (1999) و Raudkivi و Ettema (1983) برای تعیین زمان تعادل استفاده شد.

در ابتدای هر آزمایش با نصب گروه پایه مورد نظر، بستر رسوبی در مجاورت آن تراز شده و به تدریج آب‌اندازی به کانال انجام می‌گرفت. در نهایت بعد از تنظیم دقیق دبی جریان برای تامین سرعت جریان معادل ۰/۹۵ آستانه حرکت ذرات، عمق نسبی جریان (y/D) در کانال با مانور دریچه انتهایی فلوم برابر ۶/۵۷ تنظیم می‌گردید. پس از شروع آزمایش مقدار توسعه زمانی عمق آب‌شستگی به‌صورت پیوسته با استفاده از عمق‌سنج نقطه‌ای با دقت ۰/۱ ± میلی‌متر اندازه‌گیری به‌عمل می‌شد. در پایان هر آزمایش، عمق حداکثر آب‌شستگی و توپوگرافی بستر با استفاده از متر لیزری با دقت ۱ ± میلی‌متر قرائت شد.

در این تحقیق به‌منظور بررسی اثر پارامترهای هندسی بر زمان تعادل آب‌شستگی و ارزیابی روابط ارائه شده برای برآورد آن، در مجموع ۳۲ آزمایش برای گروه پایه مرکب با ضخامت نسبی سرشمع (T_{pc}/D) ۰/۹ و ۱/۴، قطر نسبی شمع (d_p/D) ۰/۶ و ۰/۹ و آرایش شمع‌های ۲×۲ و ۲×۳ و ترازهای نسبی کارگذاری سرشمع (Z/D) یک، دو، سه و چهار اجرا شد که دامنه این پارامترهای مورد مطالعه در جدول (۱) آورده شده است.

اندازه ذرات رسوبی از عوامل مؤثر بر عمق آب‌شستگی است. Sutherland و Melville (1988) نشان دادند که اگر نسبت عرض پایه به قطر ذرات رسوبی (D_{col}/D_{50}) از ۲۰ تا ۲۵ بیشتر باشد، کاهش قطر ذرات تاثیری بر مشخصات آب‌شستگی نخواهد داشت. Raudkivi و Ettema (1983) بیان داشتند که برای جلوگیری از تشکیل شکنج در سرعت‌های نزدیک به آستانه حرکت، قطر ذرات رسوبی باید از ۰/۷ میلی‌متر بیشتر باشد. در این تحقیق، قطر ذرات رسوبی مورد استفاده یکنواخت و برابر ۰/۷ میلی‌متر انتخاب و در بازه‌ای به طول ۱/۵ متر، ضخامت ۰/۳ متر در فاصله پنج متری از ابتدای فلوم قرار داده شد که محدوده مورد مطالعه برای آب‌شستگی پایه پل بود. به منظور شبیه‌سازی بهتر بستر رسوبی کانال، بالادست و پایین دست بازه مورد مطالعه برای آب‌شستگی پایه پل از رسوبات درشت‌دانه که در مرحله الک کردن باقی مانده بود، پوشانده شد.

حداکثر آب‌شستگی موضعی در مجاورت پایه پل زمانی اتفاق می‌افتد که ذرات رسوبی بستر در بالادست پایه پل در آستانه حرکت قرار می‌گیرند. از این رو لازم است قبل از شروع بررسی پدیده آب‌شستگی، مقدار سرعت آستانه حرکت ذرات رسوبی تعیین گردد. برای این منظور، در دامنه‌ای از سرعت و عمق جریان وضعیت حرکت ذرات بستر بررسی و در نهایت مقدار متوسط سرعت برای آستانه حرکت رسوبات بستر ۰/۲۸ متر بر ثانیه تعیین گردید. نتایج به‌دست آمده نشان داد که هم‌خوانی مطلوبی با دیاگرام شیلدز و روابط تجربی وجود دارد.

همان‌طور که اشاره شد، پدیده آب‌شستگی فرآیندی زمان بر بوده و تعیین زمان تعادل آب‌شستگی یکی از مباحث مهم در بررسی آب‌شستگی است. لازم به ذکر است که به‌صورت مطلق

نتایج و بحث

الف) بررسی تأثیر پارامترهای هندسی بر زمان تعادل آبشستگی در ترازهای مختلف کارگذاری سرشمع

در بررسی آبشستگی اطراف گروه پایه‌ها متداول است که از قطر مؤثر یا معادل برای اثرگذاری اجزای مؤثر بر آبشستگی استفاده شود. شکل (۴) مفهوم کلی قطر مؤثر پایه مرکب را نشان می‌دهد. در این تحقیق برای محاسبه قطر معادل از روش ارائه شده توسط Renna و Sheppard (2005) استفاده شد. در این روش برای محاسبه قطر مؤثر پایه مرکب با توجه به شرایط رسوبات بستر و تراز کارگذاری سرشمع سه حالت شامل (۱) سرشمع بیرون از بستر رسوبی قرار دارد، (۲) سرشمع کمی در بستر رسوبی مدفون شده است و (۳) سرشمع به طور کامل مدفون شده است، تعریف گردید. در نهایت قطر مؤثر هر یک از اجزای پایه مرکب شامل قطر مؤثر پایه پل (D_{col})، قطر مؤثر گروه شمع (D_{pg}) و قطر مؤثر سرشمع (D_{pc})، جداگانه محاسبه شده و از مجموع قطر مؤثر هر یک از اجزا، قطر مؤثر پایه مرکب به دست می‌آید.

$$D_e = D_{pc} + D_{pg} + D_{col} \quad (5)$$

قطر مؤثر پایه پل به صورت رابطه زیر محاسبه می‌گردد:

$$D_{col} = K_s K_\alpha K_f b_{col} [0.1162 \left(\frac{H_{col}}{y_{0(max)}} \right)^2] - 0.3617$$

$$\left(\frac{H_{col}}{y_{0(max)}} \right) + 0.2476 \quad \text{for } 0 \leq \frac{H_{col}}{y_{0(max)}} \quad (\text{الف-۶})$$

$$D_{col} = 0 \quad \text{for } 0 > \frac{H_{col}}{y_{0(max)}} \quad (\text{ب-۶})$$

که در آن K_s : ضریب شکل، K_α : ضریب زاویه انحراف جریان، K_f : ضریب توسعه سرشمع، b_{col} : عرض پایه پل، H_{col} : فاصله بین بستر و زیر پایه پل، $y_{0(max)}$: مقدار حدی برای محاسبه قطر مؤثر است.

برای محاسبه قطر معادل سرشمع رابطه زیر ارائه شد:

$$D_{pc} = K_s K_\alpha b_{pc} \exp\left(\frac{H_{pc}}{y_{0(max)}}\right) + 1.695 \left(\frac{T_{pc}}{y_{0(max)}}\right)^{\frac{1}{2}} \quad (7)$$

که در آن b_{pc} : عرض سرشمع، H_{pc} : فاصله بین بستر و زیر سرشمع، T_{pc} : ضخامت سرشمع است.

قطر معادل شمع‌ها به صورت رابطه زیر محاسبه می‌گردد:

$$D_{pg} = K_{sp} K_h K_m K_s W_p \quad (8)$$

که در آن K_{sp} : ضریب شکل سرشمع، K_h : ضریب ارتفاع گروه شمع که روی سرشمع تعبیه شده است، K_m : تعداد شمع‌های در معرض جریان، W_p : عرض محاسبه شده شمع‌ها در گروه شمع است.

در شکل (۵) قطر مؤثر پایه مرکب محاسبه شده برای هندسه‌های مختلف سرشمع در تراز نسبی مختلف کارگذاری سرشمع ارائه شده است. مقایسه نتایج نشان داد که در هر تراز با افزایش قطر شمع‌ها به طور متوسط ۴۰ درصد قطر مؤثر افزایش یافته در حالیکه با افزایش ضخامت سرشمع، قطر مؤثر پنج درصد بیشتر می‌گردد. همچنین با افزایش تراز کارگذاری سرشمع‌ها، قطر مؤثر به دلیل کمتر بودن قطر شمع‌ها نسبت به عرض پایه و افزایش سطح در تماس جریان شمع‌ها نسبت به پایه‌های پل، به طور متوسط هشت درصد کاهش می‌یابد.

در شکل (۶)، توسعه زمانی عمق حداکثر آبشستگی برای شرایط مختلف هندسه شمع‌ها و ترازهای مختلف کارگذاری سرشمع آورده شده است.

مقایسه نتایج آزمایشگاهی در تراز کارگذاری سرشمع $Z/D=1$ حاکی از آن است که برای ضخامت نسبی سرشمع (T_{pc}/D) ۱/۴، در آرایش شمع‌ها 2×2 ، با افزایش قطر نسبی شمع (d_p/D) از ۰/۶ به ۰/۹ و در نتیجه افزایش قطر مؤثر نسبی پایه مرکب (D_e/D) از ۱/۳۹ به ۱/۸۷، مقدار زمان تعادل آبشستگی ۱۷ درصد افزایش می‌یابد. همچنین در شرایط مذکور مقدار عمق نسبی تعادلی آبشستگی (d_{se}/D) از ۲/۱۱ به ۲/۶ تغییر پیدا نمود. برای T_{pc}/D مذکور، با تغییر آرایش شمع‌ها به 2×3 ، افزایش d_p/D از ۰/۶ به ۰/۹ و در نتیجه افزایش قطر مؤثر نسبی پایه مرکب (D_e/D) از ۱/۴۵ به ۱/۹۴، مقدار زمان تعادل آبشستگی را به میزان هشت درصد افزایش می‌دهد. در شرایط مذکور مقدار d_{se}/D تغییر محسوسی نمی‌کند.

مقایسه نتایج نشان داد که در تراز کارگذاری سرشمع مذکور، با کاهش T_{pc}/D به ۰/۹، در آرایش شمع‌ها 2×2 ، افزایش d_p/D از ۰/۶ به ۰/۹ و در نتیجه افزایش D_e/D از ۱/۳۶ به ۱/۷۵، مقدار زمان تعادل آبشستگی چهار درصد افزایش یافته و مقدار d_{se}/D از ۲/۴ به ۲/۷۱ می‌رسد. با تغییر آرایش شمع‌ها به 2×3 و افزایش d_p/D از ۱/۳۶ به ۱/۸، مقدار زمان تعادل آبشستگی و d_{se}/D تغییر محسوسی نمی‌کند.

به عنوان جمع‌بندی می‌توان بیان داشت که در تراز کارگذاری سرشمع $Z/D=1$ ، اثر افزایش قطر شمع بر مقدار و زمان آب-شستگی تنها در آرایش 2×2 همسو می‌باشند. با افزایش تعداد شمع‌ها در آرایش 2×3 و وقوع پدیده سپردگی برای پایه میانی و عقبی، افزایش قطر شمع‌ها از ۰/۶ به ۰/۹، مدت زمان آبشستگی را افزایش داده ولی مقدار آبشستگی افزایش قابل ملاحظه‌ای پیدا نمی‌کند.

نشان داد که برای d_p/D مذکور، با تغییر آرایش شمع‌ها به 2×3 ، افزایش T_{pc}/D از 0.9 به 1.4 و در نتیجه افزایش D_e/D از 1.36 به 1.45 ، مقدار زمان تعادل آب‌شستگی به میزان 20% کاهش می‌یابد. علاوه بر این در این شرایط مقدار d_{se}/D از $2/57$ به $2/57$ کاهش می‌یابد.

بررسی نتایج آزمایشگاهی نشان داد برای d_p/D برابر با 0.6 ، در آرایش شمع‌ها 2×2 ، افزایش T_{pc}/D از 0.9 به 1.4 و در نتیجه افزایش D_e/D از 1.36 به 1.39 منجر به کاهش مقدار زمان تعادل آب‌شستگی به میزان 23% می‌شود. همچنین در شرایط مذکور مقدار d_{se}/D از $2/4$ به $2/11$ تغییر می‌کند. مقایسه نتایج

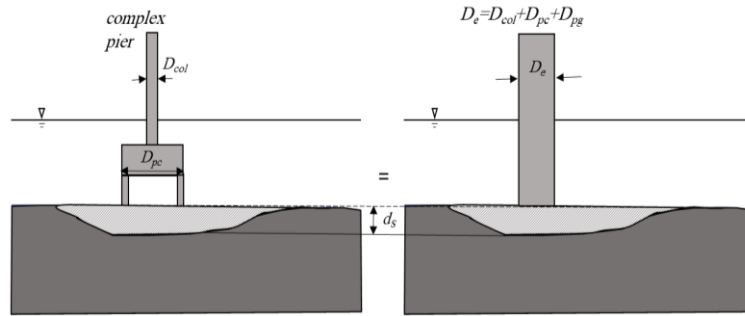


Fig. 4- Scheme of effective diameter for a complex pier

شکل ۴- طرح کلی قطر مؤثر برای گروه پایه مرکب

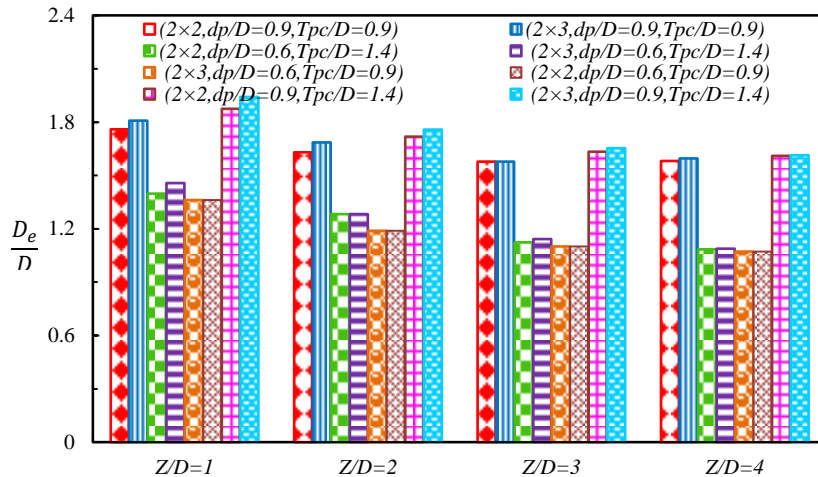


Fig. 5- Calculated effective diameter of the complex pier at the different relative pile cap installation level

شکل ۵- مقادیر قطر مؤثر محاسبه شده برای گروه پایه مرکب در ترازهای نسبی مختلف کارگذاری سرشمع

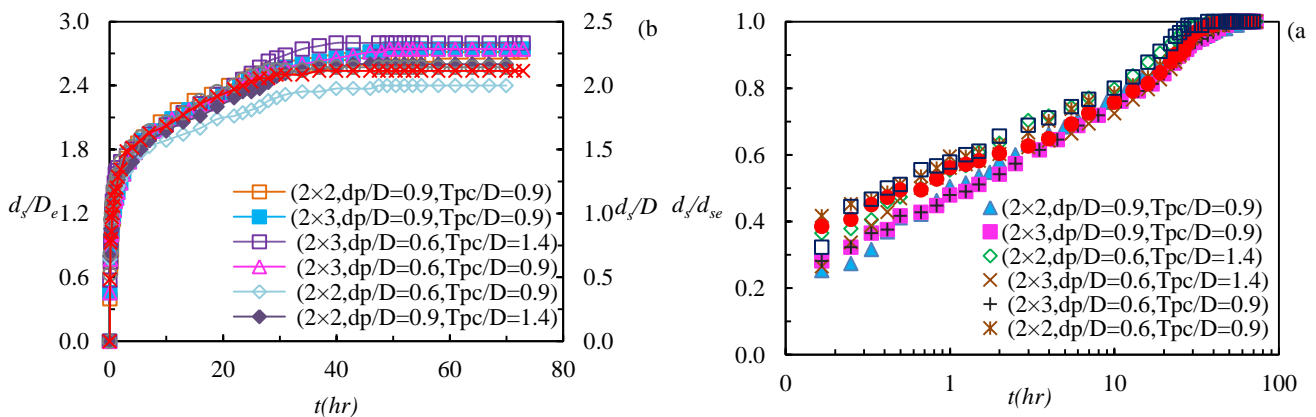


Fig. 6- Temporal development of the instant scour depth for pile group geometries at the relative pile cap elevation $Z/D=1$ a) maximum scour depth b) effective diameter of complex pier

شکل ۶- توسعه زمانی عمق لحظه‌ای آب‌شستگی برای هندسه‌های مختلف گروه شمع در تراز نسبی کارگذاری سرشمع

(a) $Z/D=1$ عمق نهایی آب‌شستگی (b) قطر مؤثر پایه مرکب و عرض پایه پل

هفت درصد افزایش می‌یابد. علاوه بر این شرایط مقدار d_{se}/D از $2/54$ به $2/74$ افزایش می‌یابد.

بررسی نتایج حاکی از آن است که برای T_{pc}/D برابر با $0/9$ ، در آرایش شمع 2×3 ، افزایش d_p/D از $0/6$ به $0/9$ و در نتیجه افزایش D_e/D از $1/18$ به $1/68$ ، مقدار زمان تعادل آب‌شستگی ۱۱ درصد افزایش یافته و مقدار d_{se}/D از $2/57$ به $2/8$ تغییر پیدا می‌کند. بنابراین، با افزایش تراز کارگذاری سرشمع و عبور بیشتر جریان از فضای بین سرشمع و چاله آب‌شستگی، اثر تغییر قطر شمعه‌ها و آرایش آن‌ها بر زمان و مقدار آب‌شستگی مشهودتر می‌گردد.

مقایسه نتایج آزمایشگاهی نشان داد که برای گروه پایه با (d_p/D) برابر با $0/6$ ، در آرایش شمعه‌ها 2×2 ، افزایش T_{pc}/D از $0/9$ به $1/4$ و در نتیجه افزایش D_e/D از $1/18$ به $1/28$ منجر به کاهش مقدار زمان تعادل آب‌شستگی به میزان ۲۱ درصد می‌شود. علاوه بر این در این شرایط مقدار d_{se}/D از $2/54$ به $2/11$ کاهش می‌یابد. مقایسه نتایج نشان داد که برای d_p/D مذکور، با تغییر آرایش شمعه‌ها به 2×3 ، با افزایش T_{pc}/D از $0/9$ به $1/4$ و در نتیجه افزایش D_e/D از $1/18$ به $1/28$ ، مقدار زمان تعادل آب‌شستگی به میزان چهار درصد کاهش یافته و به تبع آن مقدار d_{se}/D از $2/57$ به $2/28$ کاهش می‌یابد.

بررسی نتایج آزمایشگاهی گویای آن است که برای گروه پایه با d_p/D برابر با $0/9$ ، در آرایش شمعه‌ها 2×2 ، افزایش T_{pc}/D از $0/9$ به $1/4$ و در نتیجه افزایش D_e/D از $1/62$ به $1/71$ ، مقدار زمان تعادل آب‌شستگی تغییر محسوسی نمی‌کند. علاوه بر این مقدار d_{se}/D از $2/74$ به $2/68$ کاهش می‌یابد.

مقایسه نتایج آزمایشگاهی نشان داد که برای قطر نسبی شمع (d_p/D) برابر با $0/9$ ، در آرایش شمعه‌ها 2×3 ، با افزایش T_{pc}/D از $0/9$ به $1/4$ و در نتیجه افزایش D_e/D از $1/68$ به $1/75$ ، مقدار زمان تعادل آب‌شستگی به میزان چهار درصد کاهش یافته ولی مقدار d_{se}/D تغییر محسوسی نمی‌کند.

مقایسه نتایج آزمایشگاهی حاکی از آن است که برای گروه پایه با T_{pc}/D برابر با $0/9$ و d_p/D برابر با $0/6$ ، با تغییر آرایش شمعه‌ها از 2×2 به 2×3 ، اگرچه مقدار D_e/D و زمان تعادل آب‌شستگی تغییر محسوسی نمی‌کند ولی مقدار d_{se}/D از $2/54$ به $2/57$ افزایش می‌یابد. همچنین در T_{pc}/D و d_p/D برابر با $0/9$ ، تغییر آرایش شمعه‌ها از 2×2 به 2×3 و در نتیجه افزایش D_e/D از $1/62$ به $1/68$ ، منجر به افزایش مقدار زمان تعادل آب‌شستگی به میزان چهار درصد و تغییر مقدار d_{se}/D از $2/74$ به $2/8$ می‌گردد.

مقایسه نتایج آزمایشگاهی نشان داد که برای گروه پایه با T_{pc}/D برابر با $1/4$ و d_p/D برابر با $0/6$ ، با تغییر آرایش شمعه‌ها از 2×2 به 2×3 ، D_e/D یکسان باقی مانده ولی مقدار زمان تعادل آب‌شستگی به میزان ۲۳ درصد و d_{se}/D از $2/11$ به $2/28$ افزایش می‌یابد. بررسی نتایج در تراز مذکور حاکی از آن است که برای گروه پایه با T_{pc}/D برابر با $1/4$ ، با افزایش d_p/D به $0/9$ ، تغییر

بررسی نتایج آزمایشگاهی گویای آن است که برای گروه پایه با d_p/D برابر با $0/9$ ، در آرایش شمعه‌ها 2×2 ، افزایش T_{pc}/D از $0/9$ به $1/4$ و در نتیجه افزایش D_e/D از $1/75$ به $1/87$ منجر به کاهش مقدار زمان تعادل آب‌شستگی به میزان ۱۳ درصد می‌شود. همچنین در شرایط مذکور مقدار d_{se}/D از $2/71$ به $2/6$ تغییر پیدا نمود. مقایسه نتایج آزمایشگاهی نشان داد که برای گروه پایه با d_p/D برابر با $0/9$ ، در آرایش شمعه‌ها 2×3 ، با افزایش T_{pc}/D از $0/9$ به $1/4$ و در نتیجه افزایش D_e/D از $1/8$ به $1/94$ ، مقدار d_{se}/D از $2/74$ به $2/57$ کاهش و به تبع آن زمان تعادل آب‌شستگی به میزان ۱۴ درصد کاهش یافت.

مقایسه نتایج آزمایشگاهی حاکی از آن است که برای T_{pc}/D برابر با $0/9$ و d_p/D برابر با $0/6$ ، با تغییر آرایش شمعه‌ها از 2×2 به 2×3 ، اگرچه مقدار D_e/D تغییر محسوسی نکرد، ولی مقدار زمان تعادل آب‌شستگی به میزان پنج درصد افزایش یافته و مقدار d_{se}/D از $2/4$ به $2/74$ افزایش می‌یابد. همچنین در T_{pc}/D مذکور و d_p/D برابر با $0/9$ ، تغییر آرایش شمعه‌ها از 2×2 به 2×3 و در نتیجه افزایش D_e/D از $1/75$ به $1/8$ ، مقدار زمان تعادل آب‌شستگی تغییر محسوسی نمی‌کند. یا این وجود، مقدار d_{se}/D از $2/71$ به $2/74$ افزایش یافت.

مقایسه نتایج آزمایشگاهی نشان داد که با افزایش T_{pc}/D به $1/4$ ، در d_p/D برابر با $0/6$ ، با تغییر آرایش شمعه‌ها از 2×2 به 2×3 و در نتیجه تغییر D_e/D از $1/39$ به $1/45$ ، مقدار زمان تعادل آب‌شستگی به میزان ۹ درصد افزایش می‌یابد. همچنین در شرایط مذکور مقدار d_{se}/D از $2/11$ به $2/57$ افزایش می‌یابد. بررسی نتایج در T_{pc}/D مذکور حاکی از آن است که با افزایش d_p/D به $0/9$ ، با تغییر آرایش شمعه‌ها از 2×2 به 2×3 و در نتیجه افزایش D_e/D از $1/87$ به $1/94$ ، مقدار زمان تعادل آب‌شستگی و d_{se}/D تغییر محسوسی نمی‌کند.

در شکل (۷)، توسعه زمانی عمق حداکثر آب‌شستگی برای شرایط مختلف هندسه شمعه‌ها در تراز کارگذاری سرشمع $Z/D=2$ آورده شده است. مقایسه نتایج آزمایشگاهی در تراز کارگذاری سرشمع $Z/D=2$ حاکی از آن است که برای T_{pc}/D برابر با $1/4$ ، در آرایش شمعه‌ها 2×2 ، با افزایش d_p/D از $0/6$ به $0/9$ و در نتیجه افزایش D_e/D از $1/28$ به $1/71$ ، مقدار زمان تعادل آب‌شستگی ۳۶ درصد افزایش می‌یابد. همچنین در شرایط مذکور مقدار d_{se}/D از $2/11$ به $2/68$ افزایش می‌یابد.

برای T_{pc}/D مذکور، با تغییر آرایش شمعه‌ها به 2×3 ، افزایش d_p/D از $0/6$ به $0/9$ و در نتیجه افزایش D_e/D از $1/28$ به $1/75$ ، مقدار زمان تعادل آب‌شستگی را به میزان ۱۱ درصد افزایش می‌دهد. همچنین در شرایط مذکور مقدار d_{se}/D از $2/28$ به $2/8$ تغییر می‌کند.

مقایسه نتایج نشان داد که برای T_{pc}/D برابر با $0/9$ ، در آرایش شمعه‌ها 2×2 ، افزایش d_p/D از $0/6$ به $0/9$ و در نتیجه افزایش D_e/D از $1/18$ به $1/62$ ، مقدار زمان تعادل آب‌شستگی

بررسی نتایج آزمایشگاهی نشان داد که برای گروه پایه با d_p/D برابر با ۰/۶، در آرایش شمعه 2×2 ، افزایش T_{pc}/D از ۰/۹ به ۱/۴ و در نتیجه افزایش D_e/D از ۱/۱ به ۱/۱۲ مقدار زمان تعادل آبشستگی و d_{se}/D تغییر محسوسی نمی‌کند. مقایسه نتایج نشان داد که برای d_p/D مذکور، با تغییر آرایش شمعه به 2×3 ، با افزایش T_{pc}/D از ۰/۹ به ۱/۴ و در نتیجه افزایش D_e/D از ۱/۱ به ۱/۱۴، مقدار زمان تعادل آبشستگی تغییر محسوسی نمی‌کند ولی، مقدار d_{se}/D از ۲/۳۷ به ۲/۴۲ افزایش می‌یابد.

بررسی نتایج آزمایشگاهی گویای آن است که با افزایش قطر گروه پایه به d_p/D برابر با ۰/۹، در آرایش شمعه 2×2 ، افزایش T_{pc}/D از ۰/۹ به ۱/۴ و در نتیجه افزایش D_e/D از ۱/۵۷ به ۱/۶۳، مقدار زمان تعادل آبشستگی و d_{se}/D تغییر محسوسی نمی‌کند. با تغییر آرایش شمعه به 2×3 ، با افزایش T_{pc}/D از ۰/۹ به ۱/۴ و در نتیجه افزایش D_e/D از ۱/۵۷ به ۱/۶۵، مقدار زمان تعادل آبشستگی به میزان ۱۰ درصد افزایش می‌یابد. همچنین در شرایط مذکور مقدار d_{se}/D تغییر محسوسی نکرد. این موضوع توسط Esmaili Varaki et al. (2022) نیز گزارش شده است.

مقایسه نتایج آزمایشگاهی حاکی از آن است که در T_{pc}/D برابر با ۰/۹ و d_p/D برابر با ۰/۶، با تغییر آرایش شمعه از 2×2 به 2×3 و در نتیجه این تغییرات D_e/D تغییر محسوسی نمی‌کند و مقدار زمان تعادل آبشستگی به میزان ۱۶ درصد افزایش می‌یابد. علاوه بر این در این شرایط مقدار d_{se}/D تغییر محسوسی نمی‌کند. در ضخامت سرشمع مذکور با افزایش d_p/D به ۰/۹، تغییر آرایش شمعه از 2×2 به 2×3 ، تاثیر محسوسی بر مقدار زمان تعادل آبشستگی، D_e/D و d_{se}/D ندارد.

آرایش شمعه از 2×2 به 2×3 ، D_e/D و زمان تعادل آبشستگی تغییر محسوسی پیدا نکرده ولی مقدار d_{se}/D از ۲/۶۸ به ۲/۸ افزایش می‌یابد. بنابراین در این تراز کارگذاری سرشمع، به جهت عبور بیشتر جریان نزدیک شونده از فضای زیر سرشمع و افزایش سرعت جریان در اطراف شمعه‌ها، اثر سپردگی شمعه‌های جلویی برای شمعه‌های میانی و عقبی کاهش یافته و عمق آبشستگی افزایش بیشتری می‌یابد.

در شکل (۸)، توسعه زمانی عمق حداکثر آبشستگی برای شرایط مختلف هندسه شمعه‌ها در تراز کارگذاری سرشمع $Z/D=3$ آورده شده است. مقایسه نتایج نشان داد که برای T_{pc}/D برابر با ۱/۴، در آرایش شمعه 2×2 ، با افزایش d_p/D از ۰/۶ به ۰/۹ و در نتیجه افزایش D_e/D از ۱/۱۲ به ۱/۶۳، مقدار زمان تعادل آبشستگی ۱۵ درصد افزایش می‌یابد. علاوه بر این در شرایط مذکور مقدار d_{se}/D از ۲/۳۷ به ۲/۹۷ افزایش می‌یابد. همچنین برای T_{pc}/D مذکور، با تغییر آرایش شمعه‌ها به 2×3 ، افزایش d_p/D از ۰/۶ به ۰/۹ و در نتیجه افزایش D_e/D از ۱/۱۴ به ۱/۶۵، مقدار زمان تعادل آبشستگی را به میزان ۱۰ درصد افزایش می‌دهد. همچنین در شرایط مذکور مقدار d_{se}/D از ۲/۴ به ۲/۹۷ افزایش می‌یابد.

مقایسه نتایج نشان داد که با کاهش T_{pc}/D به ۰/۹، در آرایش شمعه 2×2 ، افزایش d_p/D از ۰/۶ به ۰/۹ و در نتیجه افزایش D_e/D از ۱/۱ به ۱/۵۷، مقدار زمان تعادل آبشستگی به میزان ۱۶ درصد و مقدار d_{se}/D از ۲/۳۷ به ۲/۹۷ افزایش می‌یابد. بررسی نتایج حاکی از آن است که برای T_{pc}/D مذکور، با تغییر آرایش شمعه‌ها به 2×3 ، افزایش d_p/D از ۰/۶ به ۰/۹ و در نتیجه افزایش D_e/D از ۱/۱ به ۱/۵۷، اگرچه مقدار زمان تعادل آبشستگی تغییر محسوسی نمی‌کند ولی مقدار d_{se}/D از ۲/۳۷ به ۲/۴۲ افزایش می‌یابد.

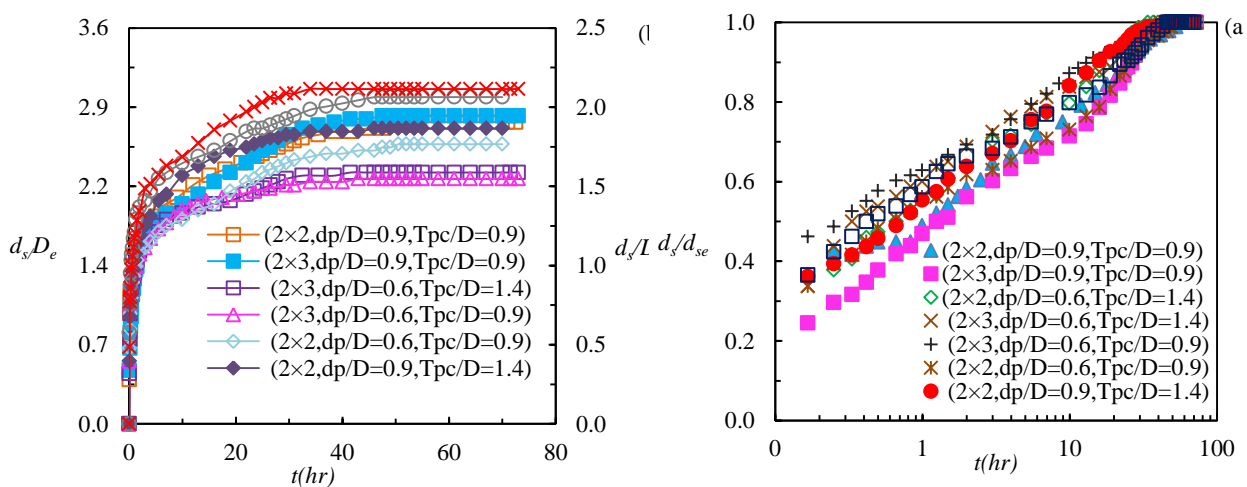


Fig. 7- Temporal development of the instant scour depth for pile group geometries at the relative pile cap elevation $Z/D=2$ to a) maximum scour depth b) effective diameter of complex pier
 شکل ۷- توسعه زمانی عمق لحظه‌ای آبشستگی برای هندسه‌های مختلف گروه شمعه در تراز نسبی کارگذاری سرشمع
 (a) $Z/D=2$ عمق نهایی آبشستگی (b) قطر مؤثر پایه مرکب و عرض پایه پل

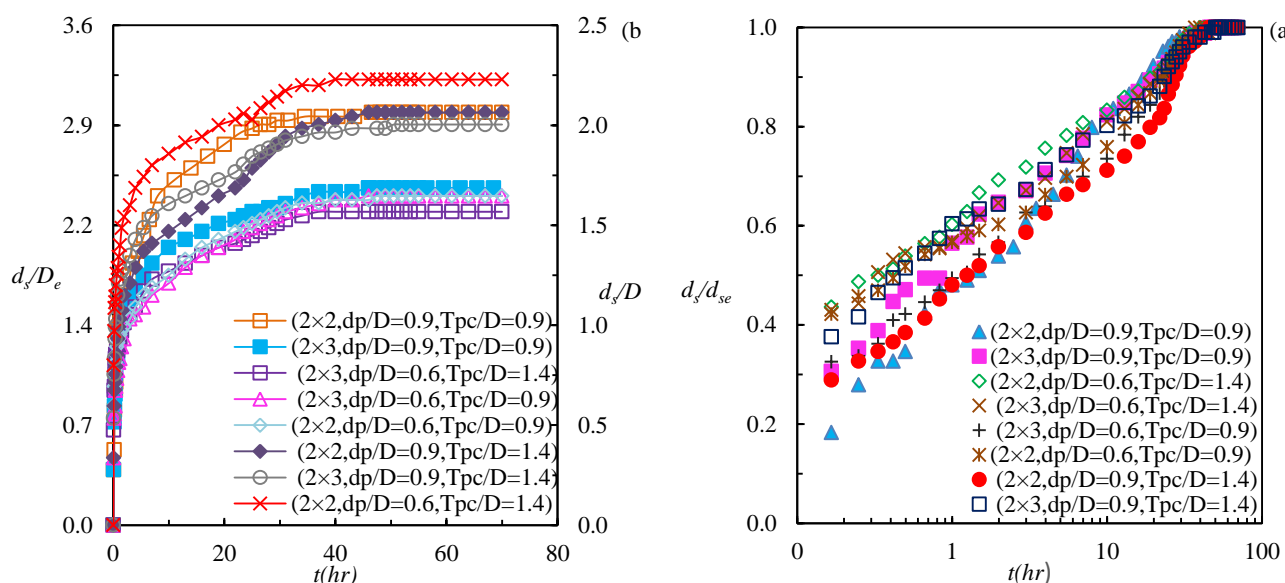


Fig. 8- Temporal development of the instant scour depth for pile group geometries at the relative pile cap elevation $Z/D=3$ to a) maximum scour depth b) effective diameter of complex pier

شکل ۸- توسعه زمانی عمق لحظه‌ای آب‌شستگی برای هندسه‌های مختلف گروه‌شمع در تراز نسبی کارگذاری سرشمع
 (a) $Z/D=3$ عمق نهایی آب‌شستگی (b) قطر مؤثر پایه مرکب و عرض پایه پل

از $1/97$ به $2/42$ افزایش می‌یابد. با تغییر آرایش شمع‌ها به 2×3 ، افزایش d_p/D از $0/6$ به $0/9$ باعث افزایش D_e/D از $1/07$ به $1/59$ شده و زمان تعادل آب‌شستگی به میزان 9 درصد افزایش یافته و مقدار d_{se}/D از $2/11$ به $2/54$ بیشتر می‌شود. مقایسه نتایج نشان داد که در تراز کارگذاری سرشمع مذکور، d_p/D برابر با $0/6$ و آرایش شمع‌ها 2×2 ، افزایش T_{pc}/D از $0/9$ به $1/4$ اگرچه مقدار D_e/D را تغییر محسوسی نداد ولی، مقدار زمان تعادل آب‌شستگی به میزان 12 درصد افزایش یافته و مقدار d_{se}/D از $1/97$ به $2/11$ افزایش پیدا کرد. همچنین برای d_p/D مذکور، با تغییر آرایش شمع‌ها به 2×3 ، افزایش T_{pc}/D از $0/9$ به $1/4$ مقدار D_e/D را مانند آرایش شمع‌ها 2×2 تغییر مشهودی نداده ولی، مقدار زمان تعادل آب‌شستگی به میزان 9 درصد و به تبع آن مقدار d_{se}/D از $2/11$ به $2/4$ افزایش یافت. بررسی نتایج آزمایشگاهی گویای آن است با افزایش قطر شمع با d_p/D به $0/9$ و آرایش شمع‌ها 2×2 ، افزایش T_{pc}/D از $0/9$ به $1/4$ و در نتیجه افزایش D_e/D از $1/58$ به $1/6$ ، مقدار زمان تعادل آب‌شستگی به میزان 56 درصد افزایش پیدا کرد و مقدار d_{se}/D از $2/42$ به $2/77$ افزایش یافت. با تغییر آرایش شمع‌ها به 2×3 ، افزایش T_{pc}/D از $0/9$ به $1/4$ و در نتیجه افزایش D_e/D از $1/59$ به $1/61$ و مقدار زمان تعادل آب‌شستگی 34 درصد بیشتر شده و در نتیجه آن، مقدار d_{se}/D از $2/54$ به $2/88$ افزایش پیدا کرد. به عبارت دیگر، با افزایش ضخامت نسبی سرشمع، میزان انسداد جریان توسط اجزای گروه‌پایه کج بیشتر شده و در نتیجه زمان و عمق تعادل آب‌شستگی افزایش می‌یابد.

مقایسه نتایج آزمایشگاهی نشان داد که با افزایش T_{pc}/D به $1/4$ ، برای d_p/D برابر با $0/6$ ، با تغییر آرایش شمع‌ها از 2×2 به 2×3 و در نتیجه افزایش D_e/D از $1/12$ به $1/14$ ، مقدار زمان تعادل آب‌شستگی به میزان 16 درصد و مقدار d_{se}/D از $2/37$ به $2/42$ افزایش می‌یابد. همچنین با افزایش d_p/D به $0/9$ ، تغییر آرایش شمع‌ها از 2×2 به 2×3 و در نتیجه افزایش D_e/D از $1/63$ به $1/65$ و مقدار زمان تعادل آب‌شستگی به میزان 10 درصد افزایش می‌یابد. همچنین در شرایط مذکور مقدار d_{se}/D تغییر محسوسی نمی‌کند. در شکل (۹)، توسعه زمانی عمق حداکثر آب‌شستگی برای شرایط مختلف هندسه شمع‌ها در تراز کارگذاری سرشمع $Z/D=4$ آورده شده است. مقایسه نتایج آزمایشگاهی در تراز کارگذاری سرشمع $Z/D=4$ حاکی از آن است که برای T_{pc}/D برابر با $1/4$ ، در آرایش شمع‌ها 2×2 ، با افزایش d_p/D از $0/6$ به $0/9$ و در نتیجه افزایش D_e/D از $1/08$ به $1/6$ ، مقدار زمان تعادل آب‌شستگی 40 درصد افزایش می‌یابد. همچنین در شرایط مذکور مقدار d_{se}/D از $2/11$ به $2/77$ افزایش می‌یابد. با تغییر آرایش شمع‌ها به 2×3 در T_{pc}/D مذکور، افزایش d_p/D از $0/6$ به $0/9$ و در نتیجه افزایش D_e/D از $1/08$ به $1/61$ ، مقدار زمان تعادل آب‌شستگی 34 درصد افزایش یافته و d_{se}/D از $2/4$ به $2/88$ تغییر می‌کند. بررسی نتایج نشان داد که با کاهش T_{pc}/D به $0/9$ ، در آرایش شمع‌ها 2×2 ، افزایش d_p/D از $0/6$ به $0/9$ و در نتیجه افزایش D_e/D از $1/07$ به $1/58$ ، مقدار زمان تعادل آب‌شستگی تغییر محسوسی نمی‌کند. همچنین در شرایط مذکور مقدار d_{se}/D

استخراج معادله در قالب معادله دو، چهار و پنج پارامتری بررسی شد. به منظور استخراج ضرایب این معادله‌ها، داده‌های حاصل از اندازه‌گیری آزمایشگاهی در دو قالب ۷۰ درصد برای استخراج و ۳۰ درصد برای صحت‌سنجی در نرم افزار (Statistical Analysis System) مورد استفاده قرار گرفت. به منظور بررسی عملکرد معادله‌های رگرسیونی استخراج شده، شاخص‌های آماری ضریب کارایی Nash-Sutcliffe، ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) و میانگین درصد مطلق خطا (MAPE) که در روابط (۱۰) تا (۱۲) ارائه شده، مورد استفاده قرار گرفت (Nash and Sutcliffe 1970 & Krause et al., 2005).

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n [(t)_{meas} - (t)_{est}]^2}{\sum_{i=1}^n [(t)_{meas} - \overline{(t)_{meas}}]^2} \quad (10)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n [(t)_{meas} - (t)_{est}]^2} \quad (11)$$

$$MAPE = \frac{100}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{(t)_{meas} - (t)_{est}}{(t)_{meas}} \right| \quad (12)$$

که در آن $(t)_{meas}$: زمان تعادل آب‌شستگی اندازه‌گیری شده بر حسب ساعت، $(t)_{est}$: زمان تعادل آب‌شستگی محاسبه شده، $(t)_{meas}$: میانگین زمان تعادل آب‌شستگی و n : تعداد داده‌ها است. در جدول (۳) ضرایب و توان‌های معادلات استخراج شده آورده شد. نتایج نشان دادند که رابطه ۲ پارامتر به ازای میانگین مقادیر NSE ، $RMSE$ و R^2 و $MAPE$ به ترتیب برابر با ۰/۹۹، ۰/۱۲، ۰/۹۹ و ۰/۹۹ و ۴/۶۷ نامناسبترین عملکرد و رابطه (۵) پارامتر به ازای میانگین مقادیر NSE ، $RMSE$ و R^2 و $MAPE$ به ترتیب برابر با ۰/۰۴، ۰/۹۹، ۱ و ۰/۰۱۵ بهترین عملکرد را برای تخمین زمان تعادل آب‌شستگی اطراف پایه پل ارائه کرد.

در شکل (۱۰) مقایسه مقادیر برآورده شده توسط رابطه رگرسیونی با داده‌های آزمایشگاهی به همراه مقادیر برآورد شده با استفاده از روابط جدول (۲) نشان داده شد. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، زمان تعادل آب‌شستگی محاسبه شده با استفاده از این روابط بیشتر از مقادیر اندازه‌گیری شده است.

مقایسه نتایج آزمایشگاهی در تراز مذکور حاکی از آن است که برای گروه پایه با D_{pc}/D برابر با ۰/۹، d_p/D برابر با ۰/۶، با تغییر آرایش شمع‌ها از 2×2 به 2×3 ، اگرچه مقدار D_e/D تغییر محسوسی نداشته ولی زمان تعادل آب‌شستگی به میزان ۲۲ درصد افزایش یافته و مقدار d_{se}/D از ۱/۹۷ به ۲/۱۱ افزایش پیدا می‌کند. با افزایش d_p/D به ۰/۹، با تغییر آرایش شمع‌ها از 2×2 به 2×3 و در نتیجه افزایش D_e/D از ۱/۵۸ به ۱/۵۹، مقدار زمان تعادل آب‌شستگی به میزان ۳۲ درصد افزایش یافته و مقدار d_{se}/D از ۲/۴۲ به ۲/۵۴ تغییر پیدا می‌کند. با افزایش T_{pc}/D به ۱/۴ و برای d_p/D برابر با ۰/۶، تغییر آرایش شمع‌ها از 2×2 به 2×3 ، هرچند D_e/D تغییر محسوسی نداشت ولی، زمان تعادل آب‌شستگی به میزان ۱۸ درصد و مقدار d_{se}/D از ۲/۱۱ به ۲/۴ افزایش می‌یابد. مقایسه نتایج نشان داد که با افزایش d_p/D به ۰/۹، تغییر آرایش شمع‌ها از 2×2 به 2×3 ، نیز تغییر محسوسی در D_e/D نداشته ولی زمان تعادل آب‌شستگی به میزان ۱۳ درصد و مقدار d_{se}/D از ۲/۷۷ به ۲/۸۸ افزایش پیدا کرد. بنابراین در این تراز با افزایش تعداد شمع‌ها، اگرچه قطر معادل گروه پایه تغییر محسوسی ندارد ولی به جهت افزایش جریان عبوری از زیر سرشمع، نقش اثر فشردگی جریان و تاثیر آن بر قدرت گردابه‌های تشکیل شده در اطراف شمع‌ها بیشتر شده و به تبع آن زمان و عمق تعادل آب‌شستگی نیز افزایش می‌یابد.

ب) برآورد زمان تعادل آب‌شستگی اطراف گروه پایه مرکب

طی دهه‌های گذشته، روابط تجربی متعددی بر اساس داده‌های آزمایشگاهی برای برآورد عمق و زمان تعادل آب‌شستگی اطراف پایه پل استخراج شده است که در جدول (۲) روابط ارائه شده توسط Moreno et al. (1999) Chiew و Melville و Yang et al. (2020) آورده شده است.

به منظور استخراج معادله رگرسیونی برای برآورد زمان تعادل آب‌شستگی اطراف گروه پایه مرکب، پارامترهای مؤثر در قالب معادله (۹) مورد بررسی قرار گرفت.

$$t_e = a \left(\frac{D_e}{T_{pc}} \right)^b \left(\frac{Z}{T_{pc}} \right)^c \left(\frac{d_p}{T_{pc}} \right)^d \left(\frac{y}{D_e} \right)^e \left(\frac{d_{se}}{D_e} \right)^f \quad (9)$$

اگرچه کلیه پارامترهای هندسی نظیر ابعاد پایه، سرشمع، شمع‌ها و تراز کارگذاری آن‌ها به نوعی با محاسبه قطر معادل لحاظ می‌شود، با این وجود برای بررسی اثر حضور هریک از آن‌ها،

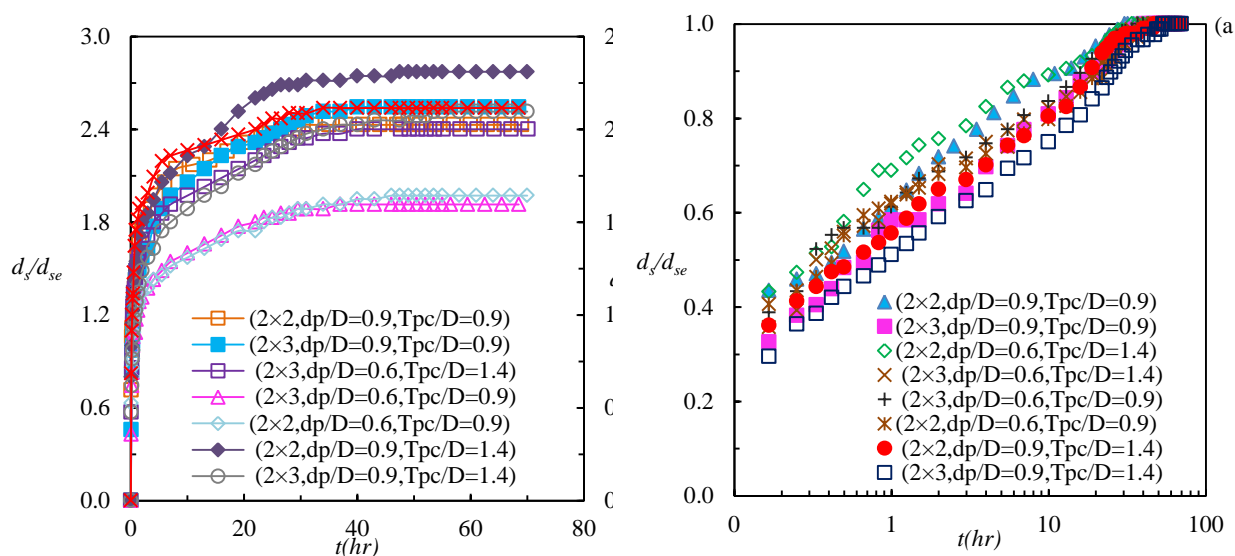


Fig. 9- Temporal development of the instant scour depth for pile group geometries at the relative pile cap elevation $Z/D=4$ to a) maximum scour depth b) effective diameter of complex pier
 شکل ۹- توسعه زمانی عمق لحظه‌ای آب‌شستگی برای هندسه‌های مختلف گروه‌شمع در تراز نسبی کارگذاری سرشمع (a) $Z/D=4$ عمق نهایی آب‌شستگی (b) قطر مؤثر پایه مرکب و عرض پایه پل

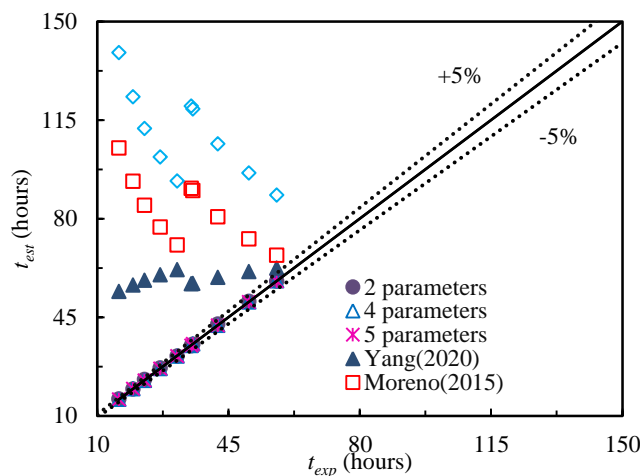


Fig. 10- Comparison of the calculated and observed equilibrium time values
 شکل ۱۰- مقایسه مقادیر زمان تعادل آب‌شستگی محاسبه شده و مشاهده شده

عمق آب‌شستگی کمتر از پنج درصد قطر پایه در بازه ۲۴ ساعت و یا Raudkivi و Ettema (1983) که معیار تغییرات عمق آب‌شستگی یک میلی‌متر در بازه زمانی سه ساعت، را معرفی کرده‌اند، اختلاف زیادی در مدت زمان تعادل عمق آب‌شستگی حاصل می‌شود. این موضوع با نگاهی به نمودارهای توسعه زمانی ارائه شده در نتایج محققین بخوبی مشهود می‌باشد. همچنین در غالب آن‌ها، تقریباً بیش از ۹۰ درصد آب‌شستگی در بازه زمانی ۱۲ تا ۲۴ ساعت از شروع آزمایش شکل گرفته و بعد از آن تغییرات عمق لحظه‌ای آب‌شستگی میل به خط مجانب دارد.

دلایل مختلفی برای تفاوت در مقدار زمان تعادل آب‌شستگی به‌دست آمده در تحقیق حاضر با مقدار برآورد شده توسط محققین مختلف وجود دارد. سهمی از آن مربوط به قطر معادل بوده که منعکس کننده کامل آنچه که در واقعیت توسط اجزاء پل مرکب شامل شمع‌ها و آرایش آن‌ها، سرشمع و پایه‌ها پل، در آب‌شستگی نقش ایفا می‌نمایند، نمی‌باشد. علاوه‌براین در عمده تحقیقات مشابه، مقیاس تغییرات عمق آب‌شستگی بعد از ۱۲ تا ۲۴ ساعت اول، در محدوده یک تا دو میلی‌متر می‌باشد. از این رو با در نظر گرفتن معیار Chiew و Melville (1999) که مقدار تغییر

جدول ۲- روابط زمان تعادل آب‌شستگی بررسی شده در تحقیق حاضر
Table 2- the time scale equations studied in present study

Descriptions	Equations	Researchers
t_e : Equilibrium time (day) D : Pier diameter V : Mean flow velocity V_C : Inception of motion velocity y : Flow depth t_{emax} : Maximum Equilibrium time for $V = V_C$ and $\frac{y}{D} > 6$	$t_e = 30.89 \left(\frac{D}{V}\right) \left(\frac{V}{V_C} - 0.4\right) \left(\frac{y}{D}\right)^{0.25} \quad \text{for } \frac{y}{D} \leq 6$ $t_e = 48.26 \left(\frac{D}{V}\right) \left(\frac{V}{V_C} - 0.4\right) \quad \text{for } \frac{y}{D} > 6$ $t_{e(max)} (days) = 28.96 \frac{D}{V}$	Melville and Chiew (1999)
t_{dms} : Experiments duration time (day) D_e : Effective complex pier diameter U : Mean flow velocity U_C : Critical flow velocity h : Flow depth	$t_{dms} = 127.8 \left(\frac{D_e}{U}\right) \left(\frac{U}{U_C} - 0.4\right) \left(\frac{h}{D_e}\right)^{0.25} e^{-1.83 \times \frac{U}{U_C}} \quad \text{for } \frac{h}{D_e} \leq 6$ $t_{dms} = 200 \left(\frac{D_e}{U}\right) \left(\frac{U}{U_C} - 0.4\right) e^{-1.83 \times \frac{U}{U_C}} \quad \text{for } \frac{h}{D_e} > 6$	Moreno and Couto (2015)
D_e : Effective complex pier diameter C_2 : 200 day/s C_3 : 127.8 day/s U : Mean flow velocity U_C : Critical flow velocity y_0 : Flow depth t_e : Equilibrium time (day) t_{90} : Time to reach 90 percent of the equilibrium scour depth	$t_e (days) = C_2 \frac{D_e}{U} \left(\frac{U}{U_C} - 0.4\right) \quad \text{for } \frac{y_0}{D_e} > 6 \text{ and } \frac{U}{U_C} > 0.4$ $t_e (days) = C_3 \frac{D_e}{U} \left(\frac{U}{U_C} - 0.4\right) \left(\frac{y_0}{D_e}\right)^{0.2} \quad \text{for } \frac{y_0}{D_e} \leq 6 \text{ and } \frac{U}{U_C} > 0.4$ $t_{90} (days) = \exp(-1.83 \frac{U}{U_C}) t_e$	Yang et al., (2020)

جدول ۳- ضرایب و عملکرد معادله‌های رگرسیونی برای برآورد زمان تعادل آب‌شستگی

Table 3- Coefficients of equations to estimate equilibrium time and related statistical indicatcs

MAPE (%)	R ²	NSE	RMSE	f	e	d	c	b	a	Number of parameter
4.67	0.99	0.99	0.12	0	2.32	0	0	1.05	0.68	2
0.21	1.0	0.99	0.03	0	2.32	0.08	-0.004	0.97	0.72	4
0.015	1.0	0.99	0.04	-0.01	2.33	0.09	0.006	0.96	0.72	5

نتیجه‌گیری

افزایش می‌یابد. مقایسه نتایج نشان داد که در ترازهای کارگذاری سرشمع نزدیک به بستر یعنی $Z/D=1$ و $Z/D=2$ با افزایش (T_{pe}/D) از ۰/۹ تا ۱/۴، زمان تعادل آب‌شستگی را به‌طور متوسط در محدوده هشت تا ۱۸ درصد کاهش می‌دهد ولی با افزایش تراز کارگذاری سرشمع و اثرگذاری بیشتر شمع‌ها بر مقدار آب‌شستگی در تراز کارگذاری سرشمع $Z/D=3$ و $Z/D=4$ ، با افزایش ضخامت نسبی سرشمع (T_{pe}/D) از ۰/۹ تا ۱/۴، زمان تعادل

در تحقیق حاضر تاثیر پارامترهای مختلف پایه پل مرکب (ضخامت نسبی سرشمع، قطر نسبی شمع، آرایش شمع‌ها و تراز نسبی کارگذاری سرشمع) بر زمان تعادل آب‌شستگی اطراف گروه پایه مرکب مورد بررسی قرار گرفت. نتایج حاکی از آن است که در کلیه ترازهای کارگذاری سرشمع، با افزایش (d_p/D) از ۰/۱۶ به ۰/۹، زمان تعادل آب‌شستگی به‌طور متوسط بین ۱۴ و ۲۶ درصد

روابط رگرسیونی مرکب از دو، چهار و پنج پارامتر برای برآورد زمان تعادل آب‌شستگی اطراف گروه پایه کج مستقر بر روی سرشمع ارائه شد.

آب‌شستگی را به میزان سه و ۲۸ درصد افزایش می‌یابد. مقایسه نتایج آزمایشگاهی نشان داد کلیه ترازهای کارگذاری سرشمع، با تغییر آرایش شمع‌ها از 2×2 به 2×3 ، زمان تعادل آب‌شستگی بین چهار تا ۲۲ درصد افزایش می‌یابد. همچنین در تحقیق حاضر

References

- 1- Chabert, J. and Engeldinger, P., 1956. Study of the scour around the bridge piers. *Laboratoire National d'Hydraulique. Chatou, October.*
- 2- Coleman, S. E., Lauchlan, C.S. and Melville, B. W., 2003. Clear water scour development at bridge abutments. *Journal of Hydraulic Research, 41(5): 521-531.* Doi: 10.1080/00221680309499997.
- 3- Esmaeili Varaki, M., Tavazo, N. and Radice, A., 2022. Using a bed sill as a countermeasure for clear-water scour at a complex pier with inclined columns footed on capped piles. *Hydrology, 9(65): 1-19.* Doi: 10.3390/hydrology9040065.
- 4- Ferraro, D., Tafarjnoruz, A., Gaudio, R. and Cardoso, A. H., 2013. Effects of pile cap thickness on the maximum scour depth at a complex pier. *Journal of Hydraulic Engineering, 139 (5): 482-491.* Doi: 10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.0000704.
- 5- Grimaldi, C., 2005. Non-conventional countermeasures against local scouring at bridge piers. *Ph.D. Thesis, Hydraulic Engineering for Environment and Territory, Univ. of Calabria.*
- 6- Krause, P., Boyle, D. and Båse, F., 2005. Comparison of different efficiency criteria for hydrological model assessment. *Advances in Geosciences, 5: 89-97.*doi:10.5194/adgeo-5-89-2005.
- 7- Lagasse, P. F., Clopper, P.E., Pagan-Qrtiz, J. E., Zevenbergen, L. W., Arneson, L. A., Schall, J. D. and Girard. L. G., 2009. Bridge Scour and Stream Instability Countermeasures, Experience, Selection, and Design Guidance. *FHWA, Hydraulic Engineering Circular, No. 23.*
- 8- Lança, R. M., Fael, C. S., Maia, R. J., Pêgo, J. P, and Cardoso. A. H., 2013. Clear-water scour at comparatively large cylindrical piers. *Journal of Hydraulic Engineering, 139 (11): 1117-1125.*
- 9- Lee, S. O., 2006. Physical modeling of local scour around complex bridge piers. *Gooria Institute of Technology.*
- 10- Lu, J. Y., Shi, Z. Z., Hong, J. H., Lee, J. J. and Raikar, V. K., 2011. Temporal variation of scour depth at nonuniform cylindrical piers. *Journal of Hydraulic Engineering, 137(1): 45-56.*
- 11- Melville, B.W., Sutherland, A.J., 1988. Design method for local scour at bridge piers. . *Journal of Hydraulic Engineering, 114(10): 1210-1226.*
- 12- Melville, B. W. and Chiew, Y. M, 1999. Time scale for local scour at bridge piers. *Journal of Hydraulic Engineering, 125 (1): 59-65.*
- 13- Moreno, M. R. and Couto. L., 2015. Effects of relative column width and pile-cap elevation on local scour depth around complex piers. *Journal of Hydraulic Engineering, 142 (2): 04015051.*
- 14- Moreno, M. R. and L., 2016. Prediction of equilibrium local scour depth at complex bridge piers. *Journal of Hydraulic Engineering, 142(11): 04016045.*
- 15- Nash, J. E. and Sutcliffe, J. V., 1970. River flow forecasting through conceptual models part I—A discussion of principles. *Journal of Hydrology, 10(3): 282-290.* Doi:10.1016/0022-1694(70)90255-6.
- 16- Oliveto G. and Hager, W. H., 2002. Temporal evolution of clear-water pier and abutment scour. *Journal of Hydraulic Engineering, 128(9): 811-820.* Doi: 10.1061/(ASCE)0733-9429(2002)128:9(811).

- 17- 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.
- 18- Raudkivi, A. J. and Ettema, R., 1983. Clear-water scour at cylindrical piers. *Journal of Hydraulic Engineering*, 109(3): 339-350.
- 19- Richardson, E. V. and Davis, S. R., 2001. Evaluating scour at bridges. *Hydraulic Engineering Circular No. 18 (HEC-18). Rep. No. FHWA NHI 01-001, Federal Highway Administration, Washington, D.C.*
- 20- Sheppard, D. M. and Renna, R. 2005. Florida bridge scour manual. *Tallahassee, FL: Published by Florida Department of Transportation.*
- 21- Simarro, G., Fael, C. M. and Cardoso, A. H., 2011. Estimating equilibrium scour depth at cylindrical piers in experimental studies. *Journal of Hydraulic Engineering*, 137 (9): 1089–1093.
- 22- Yang, Y., Melville, B.W. Macky, G. H. and Shamseldin, A. Y., 2019. Local scour at complex bridge piers in close proximity under clear-water and live-bed flow regime. *Water.*, 11: 1530. doi.org/10.3390/w11081530.
- 23- Yang, Y., Melville, B.W. Macky, G. H. and Shamseldin, A. Y., 2020. Temporal evolution of clear water local scour at aligned and skewed complex bridge piers. *Journal of Hydraulic Engineering*, 146(4): 04020026.