

**EXTENDED ABSTRACT**

## **Comparison of Linear and Triangular Arrangements of Submerged Sacrificial Piles on Local Scour Depth around Cylindrical Bridge Piers**

S. M. A. Zomorodian<sup>1\*</sup>, H. Ghaffari<sup>2</sup> and Z. Ghasemi<sup>3</sup>

1\* - Corresponding Author, Associate Professor of Water Engineering, Shiraz University, Iran. ([mzomorod@shirazu.ac.ir](mailto:mzomorod@shirazu.ac.ir)).

2- MSc Student of Hydraulic Structure, Water Engineering Department, Shiraz University, Iran.

3- MSc of Student Hydraulic Structure, Water Engineering Department, Shiraz University, Iran.

Received: 8 August 2016

Revised: 20 April 2018

Accepted: 22 April 2018

**Keyword:** Local scour, Bridge pier, Submerged sacrificial piles. **DOI:** 10.22055/jise.2018.18874.1363.

### **Introduction**

The control of local scour around the piers and bridge abutments has been recognized as an issue of considerable importance due to the structural damage of bridges. Many methods have been already proposed by several researchers to tackle this problem, including methods that change the pattern of flow around the piers, such as sacrificial piles (Melville and Hadfield, 1999; Chabert and Engeldinger, 1956), Submerged vanes (Lauchlan, 1999; Grimaldi et al., 2009a), Slot (Chiew, 1992; Grimaldi et al., 2009b), and collars (Zarrati et al., 2006; Alabi, 2006). In addition to the above methods, other methods have been developed to protect the bed against the scour, including the use of riprap around the pier (Parola, 1993; Graziano et al., 1990), sandy bags, gabions, and geotextiles. The sacrificial piles are, indeed, the piers with smaller diameters than the bridge piers, which divert the flow from the bridge pier leading to the reduction of the scour potential. The efficiency of the sacrificial piles in controlling the scour depends on the number and diameter of the piles, the degree of submergence, the arrangement, their relative placement against the piers, the distance between the piles, the distance between the piles and the piers as well as their angles to the flow (Melville and Hadfield, 1999). According to these methods, many studies have been carried out on the effect of the sacrificial piles in reducing the bridge piers scour. However, the use of submerged piles with different degrees of submergence has been less considered. Since the length of sacrificial piles has an effect on the degree of submergence, the length of the sacrificial piles is effective in scouring, as well. In effect, the present study focuses on the scouring around bridge piers by using 2 different arrangements with and without using the sacrificial pile groups at the upstream of the pier.

### **Methodology**

Experiments were conducted in a 0.4 m wide, 0.5 m deep, and 15 m long, concrete flume with the slope of 0.001. The working section, in which piers were located, was 2 m long with a recess on the bed 0.16 m deep and was situated 8 m downstream from the entrance of the flume. The recess was filled with uniform sediment with a diameter of 0.75 mm, and the geometric standard deviation of particles was  $\sigma_g = 1.25$ . Cylindrical Perspex pipes with diameter of 30 mm were used as pier models. Pier diameters were selected so that the effect of flume sidewalls and sediment size on the depth of scour hole became negligible (Raudkivi and Ettema, 1983). The tests showed that with a flow depth of 0.12 m and a flow rate of  $0.015 \text{ m}^3 / \text{s}$ , the bed material would be at incipient motion condition. The ratio of shear velocity in these experiments to the critical shear velocity calculated from Shields'

diagram was about 0.91. A laser meter with 1 mm accuracy was used to measure the depth of the scour. The sacrificial pile group was used around the bridge pier by using 2 different conditions with and without submergence at the upstream of the pier. The arrangement of the pile groups is 5 in triangular and 3 in linear patterns. The sacrificial pile groups were studied in different  $L/y$  equal to 0.4, 0.6, 0.8 and 1. The distance of the piles from the pier equals  $2D$  and the distance between the piles equals  $D$ . Besides, the diameter of the piles was equal to  $D/6$  and 0.5 cm. In a triangular arrangement, five piles were placed in the form of a triangle with an angle of 30 degrees in front of the pier. In this model, the distance between the piles equals the pier diameter and the distance between the center of the piles from the pier equals  $2.5D$  and the angle of flow with the center of the piles equals zero. The experiments were carried out until the rate of scouring was negligible. In order to obtain the equilibrium time, a test was performed for 300 minutes in the specified conditions without the presence of the sacrificial pile on a single pier and the scouring changes were recorded. The recorded data showed that more than 90% of the scouring depth occurred in the first three hours of the experiment, and then the scouring changes were considered negligible compared to the time. Therefore, the tests were performed at the duration of three hours.

## Results and Discusspn

### Scouring non submergence sacrificial pile group

The results showed that in both arrangements (pile groups of 5 in triangular and 3 in linear pattern), the sacrificial piles deviated from the flow approaching the pier, reduced the intensity of the flow and, therefore, reduced the scour around the pier. Moreover, the triangular arrangement of the piles deviated the flow to a greater extent, and the scour depth was, thus, much lower than the linear arrangement. In the triangular arrangement of the sacrificial piles, the scour value decreased by 49%, while in the case of linear piles the scour reduction rate was 33.8%.

### Scouring in a Submerged Sacrificial Piles with triangular arrangement

It is observed that increasing the ratio of  $L/y$  with a more deviation of the flow around the pier had a significant effect on decreasing the pier scour. Thus, the  $L/y$  equals 8.0 when scouring decreased to a greater extent (44.6 percent).

### Scouring in a Submerged Sacrificial Piles with linear pattern

The linear arrangement of the submerged sacrificial piles also reduced scouring in the main pier. However, compared with the triangular arrangement, the amount of scour reduction decreased due to the less deviation of the flow. In effect, the efficiency of the linear arrangement in reducing pier scour depends on the local scour around the piles and the amount of sediment trapped by the scouring hole around the main pier. The submerged sacrificial piles reduced the scouring around the pier, but compared with the non-submerged sacrificial piles, scouring reduced to a lesser extent. Besides, by increasing the  $L/y$  ratio of the linear sacrificial piles, the scour depth decreased around the pier. By increasing the  $L/y$  ratio, more and more vortexes resulted in more turbulence in the area of the sacrificial piles, leading to more local scour around the piles. Accordingly, the scoured sediment entry to the scoured hole around the main pier resulted in the reduction of the scour in the pier.

## Conclusions

- 1- The sacrificial piles with deviation of the flow around the piers, especially in front of the piers, reduced scouring. With the use of a non-submergence sacrificial piles group with triangular pattern, scouring reduced to a greater degree (49 %) in comparison with the linear arrangement (33.8%).
- 2- Non-submerged sacrificial piles were more effective in reducing scouring than the submerged sacrificial piles in both triangular and linear arrangements.
- 3- Using the submerged sacrificial piles group decreased the scour around the piers. In the triangular arrangement, the scouring reduced to a greater degree which increased  $L/y$ . At  $L/y$  0.8, the highest

scour reduction was equal to 44.6%, and there was no big difference between  $L/y$  of 1 and  $L/y$  of 0.8. The scour reduction in linear arrangements with  $L/y$  of 1 was 30.8%. Therefore, the group of submerged sacrificial piles with triangular arrangement was found to have a more protective effect on the control of scouring than the linear arrangements.

### Acknowledgement

This study was conducted with the support of Shiraz University, so the authors would like to thank the University for providing this research opportunity.

### References

- 1- Alabi, P.D., 2006. *Time development of local scour at a bridge pier fitted with a collar*. Master Degree Thesis. University of Saskatchewan, Saskatoon, Saskatchewan, CA.
- 2- Chabert, J. and Engeldinger, P., 1956. *Etude des affouillements autour des piles des ponts*. Study on scour around bridge piers, Laboratoire National d'Hydraulique, Chatou, France (in French)
- 3- Chiew, Y.M., 1992. Scour protection at bridge piers. *Journal of Hydraulic Engineering*, 118(9), pp. 1260–1269.
- 4- Graziano, F. G., Jones, J. S. and Parola, A. C., 1990. Design of riprap to protect bridge Piers from local scour. *Journal of Highway Research and Development, Public Roads*, 54(2), pp. 193–199.
- 5- Grimaldi, C., Gaudio, R., Calomino, F. and Cardoso, A.H., 2009a. Control of scour at bridge piers by a downstream bed sill. *Journal of Hydraulic Engineering*, 135(1), pp. 13–21.
- 6- Grimaldi, C., Gaudio, R., Calomino, F. and Cardoso, A.H., 2009b. Countermeasures against local scouring at bridge piers: Slot and combined system of slot and bed sill. *Journal of Hydraulic Engineering*, 135(5), pp. 425–431.
- 7- Lauchlan, C.S., 1999. *Pier scour countermeasures*. PhD Thesis, University of Auckland, Auckland, NZ.
- 8- Melville, B. W. and Hadfield, A. C., 1999. Use of sacrificial piles as pier scour countermeasures. *Journal of hydraulic engineering, ASCE*, 125(11).
- 9- Parola, A. C., 1993. Stability of riprap at bridge piers. *Journal of Hydraulic Engineering*, 119 (10), pp. 1080–1093.
- 10- Raudkivi, A.J. and Ettema, R., 1983. Clear-water scour at cylindrical piers. *Journal of Hydraulic Engineering*, 109(3), pp. 338–350.
- 11- Zarrati, A.R., Nazariha, M. and Mashahir, M.B., 2006. Reduction of local scour in the vicinity of bridge pier groups using collars and riprap. *Journal of Hydraulic Engineering*, 132(2), pp. 154–162.





## مقایسه دو آرایش مثلثی و خطی شمع‌های فداشونده مستغرق بر عمق آبستگي اطراف پایه پل استوانه‌ای

سید محمدعلی زمردیان<sup>۱\*</sup>، حمیده غفاری<sup>۲</sup> و زهرا قاسمی<sup>۳</sup>

\*۱- نویسنده مسئول، دانشیار بخش مهندسی آب، دانشگاه شیراز، mzomorod@shirazu.ac.ir

۲- کارشناس ارشد سازه‌های آبی، بخش مهندسی آب، دانشگاه شیراز.

۳- کارشناس ارشد سازه‌های آبی، بخش مهندسی آب، دانشگاه شیراز.

پذیرش: ۱۳۹۷/۲/۲

بازنگری: ۱۳۹۷/۱/۳۱

دریافت: ۱۳۹۵/۵/۱۸

### چکیده

کنترل آبستگي موضعی اطراف پایه‌ها و نیم پایه‌های پل‌ها به دلیل خسارات وارده به پل‌ها از اهمیت زیادی برخوردار است. در همین ارتباط در این پژوهش با بکارگیری گروه شمع‌های فدا شونده در دو آرایش مثلثی پنج تایی و همچنین خطی سه تایی به صورت غیر مستغرق و مستغرق با چهار نسبت  $L/y$  برابر با  $0/4$ ،  $0/6$ ،  $0/8$  و یک به بررسی آبستگي موضعی پایه پل پرداخته شده است. نتایج حاصل از ۱۲ آزمایش انجام شده نشان می‌دهد که با افزایش نسبت  $L/y$  در هر دو آرایش مثلثی و خطی عمق آبستگي کاهش می‌یابد به گونه‌ای که در آرایش مثلثی در نسبت  $L/y$  برابر  $0/8$  بیشترین کاهش در عمق آبستگي به میزان  $44/6\%$  درصد مشاهده شد که این کاهش عمق در آرایش خطی در نسبت  $L/y$  برابر یک به میزان  $30/8\%$  درصد می‌باشد همچنین شمع‌های فداشونده غیر مستغرق تأثیر بیشتری در کاهش آبستگي نسبت به شمع‌های مستغرق نشان دادند که این میزان کاهش در آرایش مثلثی بیشتر و به میزان  $49/2\%$  درصد مشاهده شد.

کلیدواژه‌ها: آبستگي موضعی، پایه پل، شمع فداشونده مستغرق.

### مقدمه

کم کردن پتانسیل فرساینده‌گی جریان، از پایه در برابر آبستگي محافظت می‌کنند. شمع‌های فدا شونده همچنین می‌توانند عاملی برای آبستگي بستر در اطراف خود باشند. بنابراین با ورود رسوبات شسته شده به درون گودال آبستگي اطراف پایه پل و کم شدن عمق گودال آبستگي در این ناحیه، کارایی آن‌ها در کنترل آبستگي موضعی اطراف پایه پل افزایش می‌یابد. میزان کارایی شمع‌های فدا شونده در کنترل آبستگي بستگی به تعداد و قطر شمع‌ها، درجه استعراق، آرایش و نحوه قرارگیری آن‌ها در برابر پایه، فاصله بین شمع‌ها و همچنین با پایه و زاویه قرارگیری آن‌ها در برابر جریان دارد (Melville and Hadfield, 1999). Chabert و Engeldinger (1956) از اولین کسانی بودند که مطالعه‌های گسترده‌ای را در ارتباط با شمع‌های فدا شونده انجام دادند. آن‌ها با بررسی تعداد و موقعیت شمع‌های با آرایش مثلثی در برابر پایه نشان دادند که بیشینه عمق آبستگي به میزان ۵۰ درصد کاهش پیدا می‌کند. همچنین اثر شمع‌های فدا شونده در دو شکل پایه دایره‌ای و مستطیلی توسط Melville و Hadfield (1999) در شرایط آب زلال و بستر زنده بررسی شده است. نتایج آن‌ها نشان داد که تعداد بیشتر شمع‌ها تأثیر بیشتری در محافظت از پایه دارد که با افزایش فاصله بین شمع‌ها این اثر کاهش می‌یابد. چیدمان شمع‌ها در پژوهش آن‌ها به صورت مثلثی و به گونه‌ای که رأس مثلث به سمت بالادست و در جلوی پایه قرار می‌گیرد

آبستگي موضعی اطراف پایه‌های پل با وجود همه راهکارهای مقابله با آن امری اجتناب‌ناپذیر است و بررسی و بکارگیری روش‌های مقابله با این پدیده مخرب نیازمند بررسی‌های بیشتر می‌باشد. تاکنون روش‌های زیادی توسط محققین به منظور مقابله با این پدیده مخرب ارائه شده است که از جمله می‌توان به استفاده از روش‌هایی که الگوی جریان اطراف پایه‌ها را تغییر می‌دهند اشاره کرد، از جمله استفاده از شمع‌های فدا شونده Melville و Chabert (1999)؛ Engeldinger (1956)؛ صفحات مستغرق Lauchlan (1999)؛ Grimaldi et al. (2009a)؛ شکاف در پایه Chiew (1992)؛ Grimaldi et al. (2009b) و طوق Zarrati et al. (2006)؛ Alabi (2006) علاوه بر روش‌های ذکر شده روش‌هایی نیز ارائه شده‌اند که بستر را در برابر گرداب‌های ذکر شده محافظت می‌کنند که از جمله می‌توان به استفاده از سنگچین در نواحی پایه‌ها Parola (1993)؛ Graziano et al. (1990)، کیسه‌های شنی، گابیون‌بندی و ژئوتکستایل اشاره کرد. مطالعه‌های زیادی روی اثر هر کدام از این روش‌ها در کنترل آبستگي ارائه شده است که در ادامه، در پژوهش حاضر به بررسی اثر شمع‌های فدا شونده مستغرق در کنترل آبستگي پرداخته شده است. شمع‌های فدا شونده پایه‌هایی با قطر کوچک‌تر در برابر پایه پل می‌باشند که با انحراف جریان و

می‌باشد. آن‌ها هم‌چنین نشان دادند که زاویه بین شمع‌ها در رأس مثلث در کاهش عمق آبستگي تأثیرگذار است به‌گونه‌ای که با افزایش زاویه از ۳۰ درجه به ۵۳ درجه تأثیر آن در حفاظت پایه کاهش می‌یابد و هم‌چنین به این نتیجه رسیدند که در شرایط بستر زنده اثر شمع‌های فدا شونده مستغرق (L/y برابر ۴۰ درصد) در کنترل آبستگي بیشتر از شمع‌های غیر مستغرق می‌باشد. Haque et al. (2007) یک چیدمان عرضی را برای شمع‌های فدا شونده پیشنهاد دادند و بیان نمودند که به دلیل پایین بودن سرعت در پایین دست شمع‌های فدا شونده، رسوبات شسته شده در اطراف شمع‌ها وارد گودال آبستگي ایجاد شده اطراف پایه می‌شوند و به این ترتیب عمق آبستگي را کاهش می‌دهند. آن‌ها هم‌چنین به این نتیجه رسیدند که استفاده از سه شمع فدا شونده به قطر ۲۰ درصد عرض پایه که در فاصله دو برابر عرض پایه قرار داشته باشد، بیشترین کارایی را در کاهش آبستگي پایه دارد. مدل ارائه شده توسط آن‌ها در شکل (۸) نشان داده شده است. هم‌چنین در مطالعه دیگری که توسط Pirayesh et al. (2012) در کاهش آبستگي تکیه‌گاه پل با استفاده از شمع‌های فدا شونده صورت گرفته است به این نتیجه رسیده‌اند که فاصله‌ی شمع‌ها از یکدیگر و هم‌چنین فاصله شمع‌ها از تکیه‌گاه تأثیر بسزایی در عمق آبستگي دارد به طوری که با افزایش فاصله شمع‌ها تا تکیه‌گاه، از  $1/5L$  به  $2L$  طول نیم‌پایه) عمق آبستگي کاهش، و با افزایش فاصله از  $2L$  به  $3L$  عمق آبستگي افزایش پیدا می‌کند. بنا بر مطالب ذکر شده مطالعه‌های زیادی روی اثر شمع‌های فدا شونده در کاهش آبستگي پایه پل صورت گرفته است. اما استفاده از شمع‌های مستغرق با درجه استغرق‌های متفاوت کمتر مورد توجه بوده است در صورتی که طول شمع‌های فدا شونده در میزان آبستگي مؤثر می‌باشد. در این پژوهش تأثیر شمع‌های فدا شونده با درجه استغرق‌های متفاوت در میزان آبستگي شکل گرفته در اطراف پایه پل بررسی شده است که از شمع‌های فدا شونده با دو آرایش متفاوت خطی (عمود بر جریان) و مثلثی استفاده شده است. هدف پژوهش تعیین بهترین نسبت  $L/y$  شمع‌های فدا شونده در کنترل آبستگي می‌باشد.

### مواد و روش‌ها

آزمایش‌ها در یک فلوم بتنی به طول ۱۵ متر، عرض ۴۰ سانتی‌متر، عمق ۵۰ سانتی‌متر و شیب  $0/001$  در آزمایشگاه هیدرولیک رسوب دانشگاه شیراز انجام شد. در طولی معادل با دو متر رسوبات ماسه به ضخامت ۱۶ سانتی‌متر ریخته شد. به منظور اطمینان از توسعه یافتگی جریان در بالادست مقطع آزمایش سکویی به طول ۸ متر در نظر گرفته شد. از ماسه با دانه‌بندی



Fig. 1- Sketch showing arrangement of sacrificial piles in front of pier, from Haque et al. (2007)

شکل ۱- چیدمان عرضی پیشنهادی (2007) Haque et al.

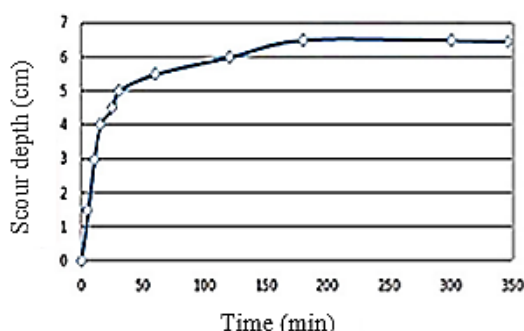


Fig.2- Time variation of scour depth in control test

شکل ۲- تغییرات عمق آبستگي با زمان در آزمایش شاهد



Fig.3- Photograph of flume used in this study

شکل ۳- نمایی از فلوم مورد استفاده

نحوهی قرارگیری شمعها در مدل خطی را نشان می‌دهد. در آرایش مثلثی، پنج شمع به صورت مثلث با زاویه رأس ۳۰ درجه، در جلوی پایه قرار داده شده است. در این مدل، فاصله شمعها برابر با قطر پایه و فاصله رأس شمعها از پایه برابر  $2/5D$  انتخاب شده است که زاویه برخورد جریان آب با رأس شمعها برابر صفر می‌باشد. قطر شمعها نیز مانند مدل خطی  $0/5$  سانتی‌متر در نظر گرفته شد. شکل (۵) نحوهی قرارگیری شمعها در جلوی پایه در مدل مثلثی را نشان می‌دهد.

شمعهای فدا شونده در دو آرایش خطی و مثلثی در بالادست پایه مورد استفاده قرار می‌گرفتند. در هر دو آرایش ابتدا شمعهای فدا شونده در حالت غیر مستغرق و سپس در حالت مستغرق با چهار نسبت  $L/y$  ( $L$  طول شمعها و  $y$  عمق جریان) برابر با ۱،  $0/8$ ،  $0/6$  و  $0/4$  مورد بررسی قرار گرفتند. در آرایش خطی سه شمع فدا شونده عمود بر جهت جریان در بالادست پایه و در امتداد یک خط افقی قرار داده شدند. فاصله شمعها از پایه برابر  $2D$  و همچنین فاصله شمعها از هم برابر با  $D$  انتخاب شدند. همچنین قطر شمعها برابر  $D/6$  و معادل با  $0/5$  سانتی‌متر در نظر گرفته شد. شکل (۴)

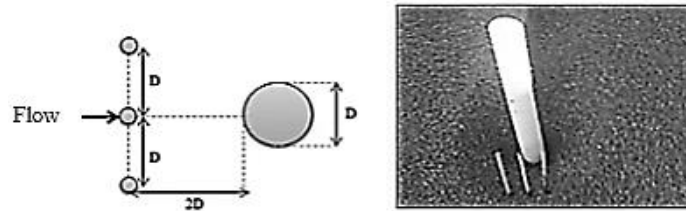


Fig.4- Sketch showing arrangement of sacrificial piles in linear pattern in front of pier

شکل ۴- نحوه قرارگیری شمع‌ها به صورت آرایش خطی در جلوی پایه پل

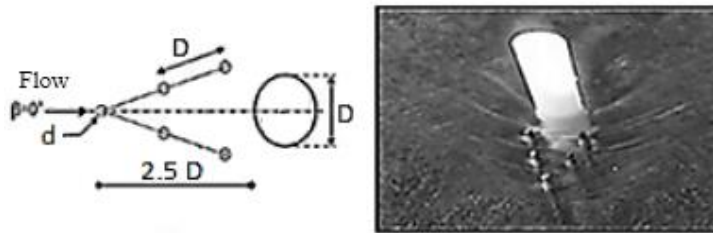


Fig.5- Sketch showing arrangement of sacrificial piles in triangular pattern in front of pier

شکل ۵- نحوه قرارگیری شمع‌ها به صورت آرایش مثلثی در جلوی پایه پل

شدت جریان در این ناحیه میزان آبستگي را کاهش می‌دهند. شمع‌های با آرایش مثلثی جریان را به میزان بیشتری انحراف می‌دهند و به همین دلیل عمق آبستگي نسبت به آرایش خطی به میزان بیشتری کاهش پیدا کرده است. به گونه‌ای که در آرایش مثلثی گروه شمع‌های فداشونده، میزان آبستگي با ۴۹ درصد کاهش به مقدار ۳/۳ سانتی‌متر در جلوی پایه رسیده است که در حالت گروه شمع خطی میزان کاهش آبستگي برابر با ۳۳/۸ درصد اتفاق افتاده است که حداکثر آبستگي برابر با ۴/۳ سانتی‌متر مشاهده شد. Haque et al. (2007) بیان نمودند که در آرایش خطی رسوبات شسته شده ناشی از آبستگي موضعی در اطراف شمع‌های فدا شونده با ورود به گودال آبستگي در اطراف پایه اصلی از توسعه بیشتر آن جلوگیری می‌کند و به این ترتیب میزان آبستگي را در اطراف پایه کاهش می‌دهند و کاهش ۵۰ درصدی در عمق آبستگي پایه، در حالت استفاده از سه شمع فدا شونده با آرایش خطی و با فاصله دو برابر عرض پایه، مشاهده کردند که در مقایسه با پژوهش حاضر از شمع‌های فدا شونده به قطر بیشتر (D/5) و پارامترهای هیدرولیکی و هندسی متفاوت استفاده کرده‌اند که دلیل بر تفاوت در میزان کاهش آبستگي با پژوهش حاضر می‌باشد. در کاربرد آرایش مثلثی نیز می‌توان به کارهای Melville و Hadfield (1999) اشاره کرد که کاهش ۵۶ درصدی در میزان آبستگي پایه در کاربرد پنج شمع با آرایش مثلثی و زاویه رأس ۳۰ درجه گزارش شده است. Chabbert و Engildingner (1956) این مقدار کاهش آبستگي در آرایش مثلثی را ۵۰ درصد گزارش داده‌اند.

## نتایج و بحث

آزمایش‌ها ابتدا روی پایه به قطر سه سانتی‌متر بدون شمع فداشونده به عنوان شاهد انجام گرفت و در مدت زمان سه ساعت از شروع آزمایش حداکثر عمق آبستگي به میزان ۶/۵ سانتی‌متر مشاهده شد. روند آبستگي به این صورت بود که در شروع آزمایش، آبستگي با نرخ بیشتری توسعه پیدا می‌کرد و با مرور زمان سرعت آن کاهش پیدا می‌کرد و مشاهده شد که آبستگي در جلوی پایه و به صورت متقارن نسبت به محور پایه شروع می‌شود و مواد رسوبی از جلو و اطراف پایه شسته شده و به صورت پشته در پشت پایه جمع می‌شوند و با شروع آبستگي در پشت پایه این رسوبات به تدریج به طرف پایین‌دست انتقال پیدا می‌کنند. گودال آبستگي ایجاد شده در این حالت از نظر هندسی دارای گستردگی عرضی ۲۲ سانتی‌متر، امتداد طولی ۳۶ سانتی‌متر و حداکثر عمق ۶/۵ سانتی‌متر ایجاد شد. در شکل (۶) پروفیل گودال آبستگي در این حالت نشان داده شده است و در شکل (۷) نیم‌رخ طولی آن در خط مرکزی کانال مشاهده می‌شود.

## آبستگي در حالت گروه شمع غیر مستغرق

به منظور بررسی میزان آبستگي پایه در حضور شمع‌های فدا شونده غیر مستغرق، از دو آرایش گروه شمع سه‌تایی در راستای یک خط مستقیم عمود بر جریان و هم‌چنین گروه شمع پنج‌تایی در راستای یک مثلث در جلوی پایه استفاده شد که مشخصات آن‌ها در قبل و در شکل‌های (۴) و (۵) ذکر شده است. مشاهده شد که در هر دو آرایش، شمع‌های فدا شونده باعث کاهش آبستگي در اطراف پایه می‌شوند و با انحراف جریان آب نزدیک شونده به پایه و کاهش

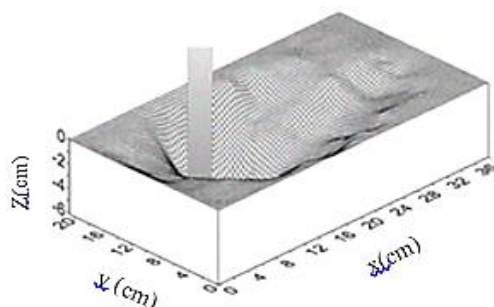


Fig. 6- The scour hole around pier in control test  
شکل ۶- گودال آبستگی اطراف پایه در آزمایش شاهد

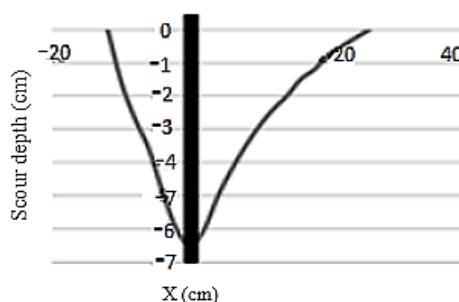


Fig.7- Longitudinal profile of the scour hole around pier (without sacrificial pile)  
شکل ۷- نیمرخ طولی گودال آبستگی اطراف پایه (بدون شمع فدا شونده)

(۴۴/۶ درصد) کاهش پیدا کرده است که نشانگر تأثیر مثبت این حالت در انحراف جریان اطراف پایه می‌باشد. برخلاف انتظار میزان کاهش آبستگی در  $L/y$  برابر یک به میزان ناچیزی کمتر از  $L/y$  برابر  $0/8$  به دست آمده است که قابل صرف نظر کردن می‌باشد. در میزان  $L/y$  های کمتر، جریان کمتری توسط شمع‌های فدا شونده انحراف پیدا می‌کنند به گونه‌ای که در لایه‌های بالاتر انحراف جریان کمتری صورت می‌گیرد که باعث ایجاد تغییرات سرعت و در نتیجه گرادیان فشار قائم در جلوی پایه می‌شود که منجر به ایجاد تلاطم و جریان‌های ثانویه در این ناحیه می‌شود بنابراین تأثیر شمع‌های فدا شونده با  $L/y$  های کمتر بر کنترل آبستگی نسبت به  $L/y$  بیشتر، کاهش پیدا کرده است. در جدول (۱) خلاصه نتایج تغییرات عمق آبستگی در استفاده از شمع‌های فدا شونده با آرایش مثلثی آورده شده است. نکته‌ای که در جدول (۱) مشهود است این است که در حالت استفاده از شمع‌های فدا شونده مستغرق و غیر مستغرق، حداکثر عمق آبستگی به پشت پایه انتقال پیدا کرده است و در جلوی پایه اثر حفاظتی شمع‌های فدا شونده در کنترل آبستگی بیشتر می‌باشد. پروفیل طولی گودال آبستگی در خط مرکزی کانال در حالت استفاده از گروه شمع‌های فدا شونده با آرایش مثلثی در استغراق‌های ذکر شده در شکل (۱۰) نشان داده شده است.

#### آبستگی در حالت گروه شمع مستغرق با آرایش مثلثی و بررسی درجه استغراق بر میزان آبستگی

اثر شمع‌های فدا شونده در چهار نسبت  $L/y$  برابر با  $0/4$ ،  $0/6$ ،  $0/8$  و یک بر کنترل آبستگی پایه مورد بررسی قرار گرفته است. تغییرات آبستگی نسبت به زمان در همه حالت‌ها در شکل (۸) نشان داده است و همان‌گونه که مشهود است در کاربرد گروه شمع‌های فدا شونده با آرایش مثلثی در میزان استغراق‌های ذکر شده، میزان آبستگی در پایه پل با نرخ بیشتری شروع شده است که با گذشت زمان نرخ افزایش آن کاهش پیدا کرده است به گونه‌ای که باعث کاهش زمان تعادل از سه ساعت به دو ساعت شده است به این معنا که گودال آبستگی در حالت استفاده از شمع‌های فدا شونده زودتر به حالت تعادل می‌رسد. در شکل (۹) تغییرات آبستگی پایه نسبت به میزان استغراق شمع‌های فدا شونده مثلثی نشان داده شده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود شمع‌های فدا شونده مستغرق باعث کاهش آبستگی در پایه پل شده‌اند اما در مقایسه با شمع‌های فدا شونده غیر مستغرق، میزان کاهش آبستگی کمتر صورت گرفته است. با بررسی تأثیر درصد استغراق بر میزان آبستگی مشاهده می‌شود که افزایش نسبت  $L/y$  تأثیر بسزایی در کاهش عمق آبستگی پایه نشان داده است به گونه‌ای که در نسبت  $L/y$  برابر  $0/8$ ، آبستگی به میزان بیشتری



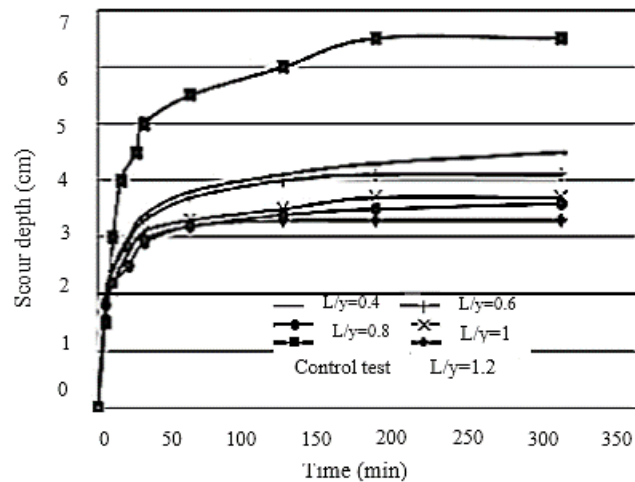


Fig.8- Temporal development of scour depth around pier in triangular arrangement of sacrificial piles

شکل ۸- توسعه زمانی آبستگی اطراف پایه در آرایش مثلثی شمعی های فدا شونده

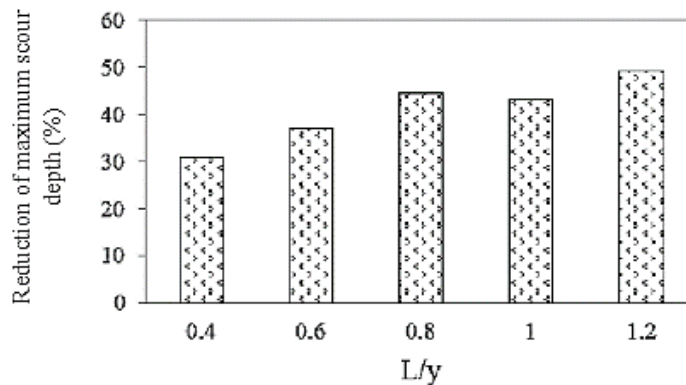


Fig.9- The reduction of maximum scour depth with using triangular arrangement sacrificial piles

شکل ۹- درصد کاهش بیشینه عمق آبستگی با استفاده از شمعی های فداشونده با آرایش مثلثی

جدول ۱- خلاصه نتایج عمق آبستگی در استفاده از شمعی های فدا شونده با آرایش مثلثی

Table 1- Summary of the results of scour depth in using of triangular arrangement sacrificial piles

L/y	Maximum scour depth ± 0.40 mm (cm)	Reduction of scour depth to control test (%)	Maximum scour depth in front of pier±0.4mm (cm)	Reduction of scour depth in front of pier to control test (%)
1.2	3.3	49.2	3	53.8
1	3.7	43.1	3.3	49.2
0.8	3.6	44.6	3.2	50.8
0.6	4.1	36.9	3.5	46.1
0.4	4.5	30.8	4	38.5
Control test	6.5	-	-	-

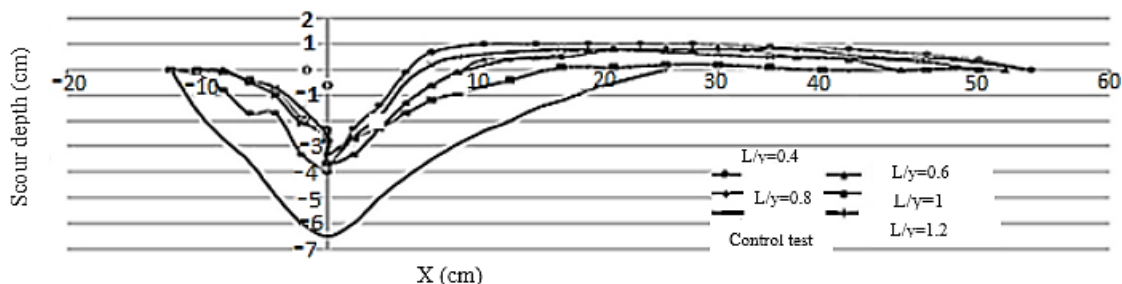


Fig.10- Longitudinal profiles of the scour holes around pier in triangular arrangement of sacrificial piles for different L/Y

شکل ۱۰- نیم‌رخ‌های چاله‌های آبخستگی در شمع‌های مستغرق با L/y های ذکر شده در آرایش مثلثی

تلاطم بیشتری در ناحیه شمع‌های فدا شونده ایجاد می‌شود که منجر به آبخستگی موضعی بیشتر در اطراف شمع‌ها می‌شود که با ورود رسوبات شسته شده به گودال آبخستگی در اطراف پایه اصلی میزان آبخستگی در این ناحیه کاهش پیدا کرده است. در کاربرد آرایش خطی نیز همانند آرایش مثلثی حداکثر میزان آبخستگی به پشت پایه انتقال داده شده است و در جلوی پایه آبخستگی کاهش یافته است که در جدول (۲) آورده شده است. پروفیل طولی گودال آبخستگی در خط مرکزی کانال در آرایش خطی در میزان استغراق‌های ذکر شده در شکل (۱۳) نشان داده شده است. Razmi et al. (2013) با بررسی تأثیر درصد استغراق گروه شمع‌های هفت تایی مستغرق با آرایش خطی در کاهش آبخستگی موضعی پایه کناری پل، به این نتیجه رسیدند که درصد استغراق تأثیر بسزایی در کاهش عمق آبخستگی دارد به گونه‌ای که در درجه استغراق ۰/۹، بیشترین کاهش در عمق آبخستگی مشاهده کردند. همچنین نشان دادند که در درجه استغراق‌های پایین (۰/۳ و ۰/۵) نه تنها کاهش آبخستگی رخ نمی‌دهد بلکه میزان آبخستگی نسبت به حالت بدون شمع افزایش می‌یابد. Haidari et al. (2011) با بررسی تأثیر گروه شمع طولی چهار، هفت و ده تایی مستغرق (L/y= 56 درصد) در کاهش آبخستگی دماغه آبسکن، کاهش ۱۲/۲ تا ۳۳/۹ درصدی در حداکثر عمق آبخستگی مشاهده کردند.

### آبخستگی در حالت گروه شمع مستغرق با آرایش خطی و بررسی میزان استغراق بر عمق آبخستگی

تغییرات عمق آبخستگی در این حالت نسبت به زمان در درجه استغراق‌های ذکر شده در شکل (۱۱) نشان داده شده است. در اینجا نیز همانند آرایش مثلثی نرخ افزایش عمق آبخستگی با زمان کاهش پیدا کرده است با این تفاوت که در این حالت زمان تعادل تغییر پیدا نکرده است. کاربرد آرایش خطی شمع‌های فدا شونده مستغرق نیز باعث کاهش آبخستگی در پایه اصلی شده است اما در مقایسه با گروه شمع‌های فدا شونده با آرایش مثلثی میزان کاهش آبخستگی کمتر صورت گرفته است و به این دلیل می‌باشد که در آرایش خطی جریان کمتری انحراف پیدا می‌کند و کارایی آن در کاهش آبخستگی پایه، بیشتر به میزان آبخستگی موضعی در اطراف شمع‌ها و میزان رسوبات گیر افتاده توسط گودال آبخستگی اطراف پایه اصلی دارد که در شکل (۱۲) مشاهده می‌شود. همچنین همان‌گونه که در این شکل مشاهده می‌شود شمع‌های فدا شونده مستغرق باعث کاهش آبخستگی در پایه پل شده‌اند اما در مقایسه با شمع‌های فدا شونده غیر مستغرق، آبخستگی را به میزان کمتری کاهش داده‌اند. همچنین با افزایش نسبت L/y گروه شمع‌های فدا شونده خطی، عمق آبخستگی در پایه اصلی کاهش پیدا کرده است. با افزایش نسبت L/y گرداب‌های رو به پایین بیشتری و در نتیجه

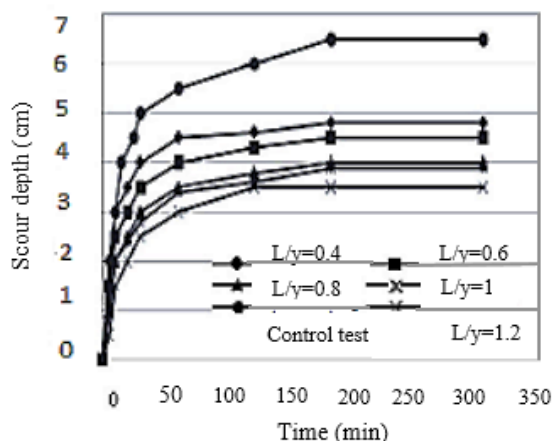


Fig.11- Temporal development of scour depth around pier with linear arrangement of sacrificial piles

شکل ۱۱- توسعه زمانی آبخستگی در گروه شمع فدا شونده با آرایش خطی

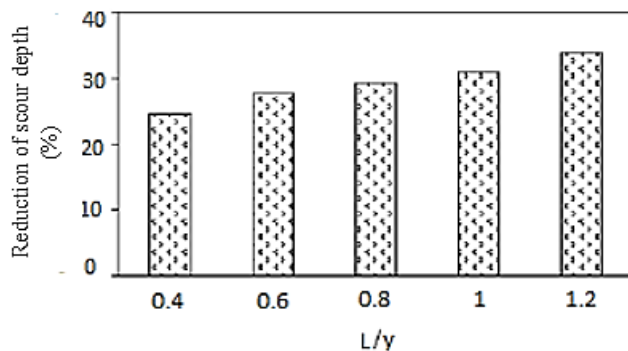


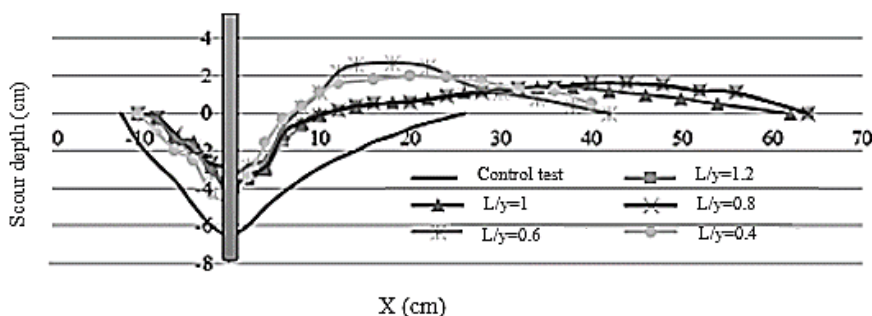
Fig.12- the reduction of maximum scour depth with using linear arrangement sacrificial piles

شکل ۱۲- درصد کاهش بیشینه عمق آبستنگی با استفاده از شمع های فداشونده با آرایش خطی

جدول ۲- خلاصه نتایج میزان آبستنگی در گروه شمع فدا شونده با آرایش خطی

Table 2- Summary of the results of scour depth with using linear arrangement of sacrificial piles

L/y	Maximum scour depth $\pm 0.40$ mm (cm)	Reduction of scour depth to control test (%)	Maximum scour depth in front of pier $\pm 0.4$ mm (cm)	Reduction of scour depth in front of pier to control test (%)
1.2	4.3	33.8	3.5	46.1
1	4.5	30.8	3.8	41.5
0.8	4.6	29.2	4	38.5
0.6	4.7	27.7	4.5	30.8
0.4	4.9	24.6	4.8	26.1
Control test	6.5	-	-	-



شکل ۱۳- نیم‌رخ‌های چاله‌های آبستنگی در شمع‌های مستغرق با L/y های ذکر شده در آرایش خطی

Fig.13- Longitudinal profiles of the scour holes around pier with linear pattern of sacrificial piles with different L/y

مدل خطی انحراف جریان کمتری نسبت به مدل مثلثی مشاهده شده است. شکل گرداب در این مدل نسبت به حالت بدون شمع فداشونده کوچک‌تر و با شدت کمتری ایجاد شده ولی نسبت به حالت مثلثی بزرگ‌تر است.

با توجه به نتایج نشان داده شده در شکل (۱۷) مشاهده می‌شود که در مجموع مدل مثلثی شمع فداشونده نسبت به مدل خطی آن بهتر عمل کرده است و با انحراف بیشتر جریان اطراف پایه، آبستنگی را به میزان بیشتری کاهش داده است.

### بررسی مکانیزم انحراف جریان در دو مدل مثلثی و خطی گروه شمع

خطوط جریان در سه مدل، پایه بدون شمع فداشونده، مدل مثلثی گروه شمع فداشونده غیر مستغرق و مدل خطی غیر مستغرق با استفاده از نرم‌افزار Flow 3D مدل ۱۰،۱ رسم شد. با توجه به شکل‌های (۱۴)، (۱۵) و (۱۶) می‌توان نتیجه گرفت که گرداب‌های ایجاد شده در پشت پایه که عامل اصلی آبستنگی بوده در مدل مثلثی از همه کوچک‌تر و با شدت کمتری رخ داده است که در این مدل مثلثی انحراف جریان از اطراف پایه نیز مشخص شده است. در

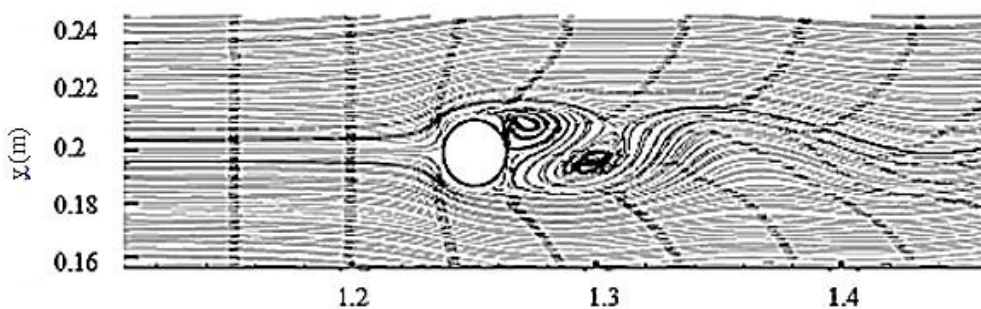


Fig. 14- flow field around pier in control test  
 شکل ۱۴- خطوط جریان اطراف پایه بدون شمع فداشونده

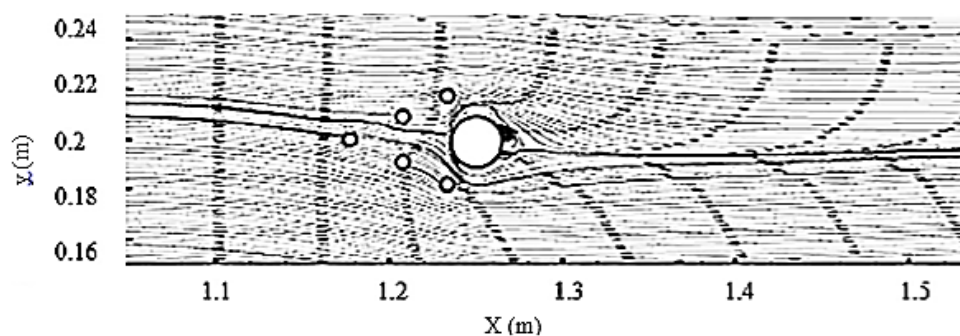


Fig. 15- flow field around pier with triangular arrangement of sacrificial piles  
 شکل ۱۵- خطوط جریان اطراف پایه در مدل مثلثی

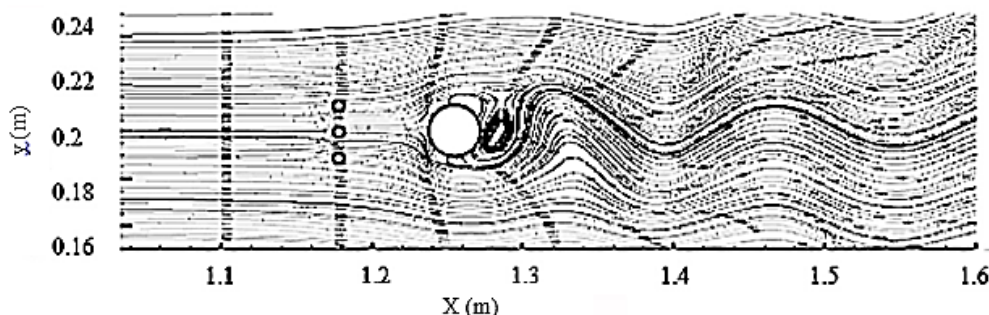


Fig. 16- flow field around pier with linear arrangement of sacrificial piles  
 شکل ۱۶- خطوط جریان اطراف پایه در مدل خطی

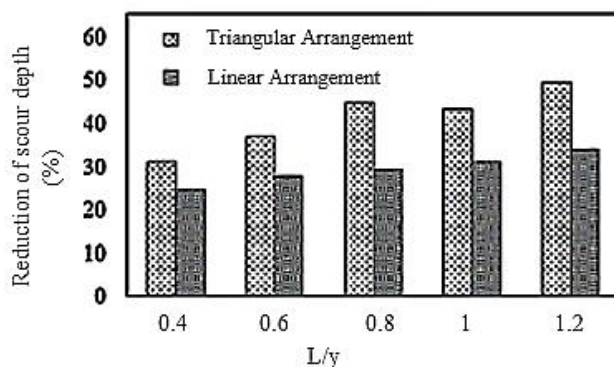


Fig. 17-Comparison of Triangular and of sacrificial piles with different submergence in scour reduction

شکل ۱۷- مقایسه دو مدل مثلثی و خطی با استغراق‌های مختلف در کاهش آبشستگی

### نتیجه گیری

۱- شمع فدا شونده با انحراف جریان از اطراف پایه به خصوص جلوی پایه باعث کاهش آبستگی می‌شوند. با استفاده از گروه شمع‌های فدا شونده غیرمستغرق با آرایش مثلثی آبستگی به میزان بیشتری کاهش پیدا می‌کند به گونه‌ای که در این حالت میزان آبستگی ۴۹ درصد کاهش داشته است که همین در حالت آرایش خطی ۳۳/۸ درصد می‌باشد.

۲- با استفاده از گروه شمع‌های فدا شونده مستغرق میزان آبستگی اطراف پایه کاهش یافته است که بسته به نوع آرایش شمع‌ها و هم‌چنین میزان استغراق آن‌ها میزان کنترل آبستگی متفاوت به دست آمده است به گونه‌ای که در آرایش مثلثی با افزایش نسبت  $L/y$  آبستگی به میزان بیشتری کاهش یافته است و در  $L/y$  برابر ۰/۸، آبستگی به میزان ۴۴/۶ درصد بیشترین کاهش را نشان داده است که در نسبت یک و ۰/۸ تفاوت چندانی

مشاهده نشده است. در آرایش خطی نیز با افزایش نسبت  $L/y$  تأثیر مثبت در کاهش آبستگی صورت گرفته است به گونه‌ای که در  $L/y$  برابر یک، ۳۰/۸ درصد کاهش در آبستگی صورت گرفته است. بنابراین گروه شمع‌های فدا شونده مستغرق با آرایش مثلثی تأثیر حفاظتی بیشتری در کنترل آبستگی نسبت به آرایش خطی دارند.

۳- شمع‌های فدا شونده غیر مستغرق تأثیر بیشتری در کاهش آبستگی نسبت به شمع‌های فدا شونده مستغرق در هر دو آرایش مثلثی و خطی نشان دادند.

### تشکر و قدردانی

این مطالعه با حمایت دانشگاه شیراز انجام شده است، بدینوسیله نویسندگان از دانشگاه به پاس فراهم نمودن امکان این تحقیق قدردانی می‌نمایند.

### References

- 1- Alabi, P.D., 2006. *Time development of local scour at a bridge pier fitted with a collar*. Master Degree Thesis. University of Saskatchewan, Saskatoon, Saskatchewan, CA.
- 2- Chabert, J. and Engeldinger, P., 1956. *Etude des affouillements autour des piles des ponts*. Study on scour around bridge piers, Laboratoire National d'Hydraulique, Chatou, France (in French)
- 3- Chiew, Y.M. and Mellville, B.W., 1987. Local scour around bridge piers. *Journal of Hydraulic Research*, 25(1), pp. 15-26.
- 4- Chiew, Y.M., 1992. Scour protection at bridge piers. *Journal of Hydraulic Engineering*, 118(9), pp. 1260-1269.
- 5- Graziano, F. G., Jones, J. S. and Parola, A. C., 1990. Design of riprap to protect bridge Piers from local scour. *Journal of Highway Research and Development, Public Roads*, 54(2), pp. 193-199.
- 6- Grimaldi, C., Gaudio, R., Calomino, F. and Cardoso, A.H., 2009a. Control of scour at bridge piers by a downstream bed sill. *Journal of Hydraulic Engineering*, 135(1), pp. 13-21.
- 7- Grimaldi, C., Gaudio, R., Calomino, F. and Cardoso, A.H., 2009b. Countermeasures against local scouring at bridge piers: Slot and combined system of slot and bed sill. *Journal of Hydraulic Engineering*, 135(5), pp. 425-431.
- 8- Haidari, M., Saneie, M., Hajikandi, H. and Behzadnia, E., 2011. Laboratory Investigating of using Submerged Sacrificial Piles on reducing scour in the spur dike. In *6th National Congress on Civil Engineering, Semnan University, Semnan, Iran*. (In Persian).
- 9- Haque, M. A., Rahman, M. M., Islam, G. M. T. and Hussain, M. A., 2007. Scour mitigation at bridge piers using sacrificial piles. *Journal of Sediment Research*, 22(1), pp. 49-59.
- 10- Lauchlan, C.S., 1999. *Pier scour countermeasures*. PhD Thesis, University of Auckland, Auckland, NZ.
- 11- Melville, B. W. and Hadfield, A. C., 1999. Use of sacrificial piles as pier scour countermeasures. *Journal of Hydraulic Engineering, ASCE*, 125(11), pp.1221-1224.
- 12- Parola, A. C., 1993. Stability of riprap at bridge piers. *Journal of Hydraulic Engineering*, 119 (10), pp. 1080-1093.

- 13- Pirayesh, A., Saneie, M. and Kolahchi, A.A., 2012. Effects of changes in pile distance from the abutment upstream on reduction of local scour. In *6th International Conference on Scour and Erosion, ICSE6-288, Paris*.
- 14- Raudkivi, A.J., 1998. *Loose Boundary Hydraulics*. A. A. Balkema, Rotterdam, the Netherland.
- 15- Raudkivi, A.J. and Ettema, R., 1983. Clear-water scour at cylindrical piers. *Journal of Hydraulic Engineering*, 109(3), pp. 338–350.
- 16- Razmi, M.M., Saneie, M. and Ershadi, S., 2013. The effect of percentage of submergence of Sacrificial Piles on reducing scour in the bridge aboutment. In *7th National Congress on Civil Engineering, Sistan and Baluchestan University, Zahedan, Iran*. (In Persion).
- 17- Zarrati, A.R., Nazariha, M. and Mashahir, M.B., 2006. Reduction of local scour in the vicinity of bridge pier groups using collars and riprap. *Journal of Hydraulic Engineering*, 132(2), pp. 154–162