

Research Paper

Numerical simulation of geotechnical effects on local scour in inclined pier group with Flow-3D software

Ramtin Sobhkhiz Foumani ¹, Alireza Mardookhpour ^{2*}

1. PhD Student of Civil Engineering Department, University of Qom, Qom, Iran

2. Assistance Professor of Civil Engineering Department, Lahijan Branch, Islamic Azad University, Lahijan, Iran

Received:2019/03/02

Revised:2021/03/10

Accepted:2021/04/05

Online: 2021/09/01

Use your device to scan and read the article online



DOI:

10.30495/wej.2021.20404.2114

Keywords:

Scouring, Pile cap leveling, Pile geometry shape, Inclined pier group, Flow-3D Software

Abstract

Introduction: When the bridge piers are located in front of the water flow, vortices are formed against it and due to their activity, the materials of the river bed are eroded around the bridge piers and the scouring hole is created. If the foundation depth and bridge pier piles are insufficient, the bridge will fail.

Methods: In this research, due to the importance of identifying the mechanisms affecting the scouring on this types of bridge piers, the effect of the geometric shape of the piles that installed under the inclined piers and also the effect of the pile cap leveling in the sedimentary bed have been investigated and the properties of the scouring around the inclined pier group was studied numerically and using the FLOW-3D software..

Findings: The study of total shear stress in the flow bed at different leveling of the pile caps shows that of the highest shear stress was created when the pile cap position is at the same level with the river bed and by installing the pile cap at a lower level than the river bed, the maximum shear stress decreases. This may be due to the fact that in this case the distance between the pier group increases and the presence of the second pier decreases the flow rate in the pier group and different pier in the one pier group act as the two Independent piers in the formation of flow pattern. By comparing the final longitudinal sections of the scouring at different leveling of the pile cap, it is concluded that the largest reduction in scouring depth occurs in aerofoil-shaped pile caps and pile caps with the sharper nose and better aerodynamic shapes are good options to control the horseshoe vortices and will reduce the scouring depth around the inclined pier group.

Citation: Ramtin Sobhkhiz Foumani, Alireza Mardookhpour. Numerical simulation of geotechnical effects on local scour in inclined pier group with Flow-3D software. Water Resources Engineering Journal. Water Resources Engineering Journal.2022; 15(52): 129-144

***Corresponding author:** Alireza Mardookhpour

Address: Civil Engineering Department, Lahijan Branch, Islamic Azad University, Lahijan, Iran

Tell: +989121992399

Email: Alireza.mardookhpour@liau.com

Extended Abstract

Introduction

In fact, scouring is a natural process that is created by the erosion caused by the flow of water on the river bed and also formed near the bridges' piers and supports. Scouring around the head of the piles and the pier of the bridges is one of the major problems of structures such as bridges whose piles are in the water of rivers with erosive flows. The erosion around the bridge piers causes the complete or local failure of some of the bridges. Once a river is in equilibrium state, the amount of input and output sediment is equal to each other. Naturally, a river, in order to achieve such an equilibrium state, shows the behaviors that ultimately leads to reach a physical equilibrium. Of course, annual floods are one of the most important factors in the destruction of this system and cause annual erosion in the river path.

Materials and Methods

In this paper, the numerical simulation analysis of the effect of different geometries of piles with fixed foundation and inclined pier group on local scouring is performed. The first step for simulating the flow is to calculate the equations associated with the scouring phenomenon. Solving flow problems including the continuity equation and the three momentum equations in the direction of three axes of coordinates (Navier Stokes equations) are the basis of all numerical methods of modeling. In this section of this study, a general description of these equations will be presented. In this research, flow and scouring modeling around the inclined pier of the bridge is performed on the group of pile with different geometric shapes. One of the most important parts of the numerical researches is to measure the precision of the simulation model. In this study, to determine the precision of the model, the scouring depth around the inclined pier of the bridge, which is located on the cubic foundation, has been compared in two cases; One was the simulation by the Flow-3D software, and the other was the empirical tests that conducted by Esmaili Varaki et al research.

Findings

The investigation of total shear stress in the flow bed at different leveling of the pile caps shows that of the highest shear stress was created when the pile cap position is at the same level with the river bed ($Z/T_p = -1$), and by placing the pile cap at a lower level than the river bed ($Z/T_p = -2$), the maximum shear stress decreases. This may be due to the fact that in this case the distance between the pier group increases and the presence of the second pier decreases the flow rate in the pier group and different pier in the one pier group act as the two Independent piers in the formation of flow pattern. Also Decreasing of shear stress occurs when the pile cap is located at a level above the bed. The reason for decreasing shear stress in these conditions ($Z/T_p = 0$), is that the pile cap thickness acts like a ring and prevents the direct collision of the vortices with the sedimentary bed. Also The study of the longitudinal sections of the scouring around the inclined pier group shows that the aerofoil-shaped pile has a better effect on reducing scouring than other geometric shapes. So that the maximum scouring depth around the inclined pier group using a aerofoil shaped pile is 36.3 cm, while the maximum scouring depth for cylindrical (circular), rectangular and rounded rectangular piles is equal to 18/4, 91/3, 59/3 centimeters, respectively. The greater effect of the aerofoil pile is related to its geometric shape, which reduces the lifting vortices.

Discussion

The column chart of percentage of the maximum reduction of the scouring depth shows that with changing the geometric shape of the pile caps from a cylindrical shape to the aerofoil-shaped, rectangular and rounded rectangular shapes, the scouring hole dimensions and the maximum scouring depth decreases and the using this type of piles reduce the maximum scouring depth to 19.61, 14.11 and 6.45% percentages, respectively. It is noteworthy that the more aerodynamic properties of the nose of the pile cap are better and the pile caps with the sharper nose are good options to control the horseshoe vortices and will

reduce the scouring depth around the inclined pier group. Also The study of the scouring depth development around the pile group with time in different pile cap geometries and pile cap leveling of $Z/T_p = 0, -1, -2$, shows that the highest amount of scouring in each of the three leveling of the pile cap occurs in less than 30% of the total time required to reach the equilibrium state. After that time, the development rate of scouring is reduced and reaches to constant value. Also The greatest amount of scouring occurs when the pile cap is at the same level with the river bed ($Z / T_p = -1$). In this condition, the empty space below the pile cap is gradually increase and some of the water flow penetrates it, causing erosion and scouring around the pile groups. One of the important points is that in this case, the geometric shape of the pile group is effective in reducing erosion and scouring that occurs under the pile cap. Under the same conditions of the pile cap leveling, the aerofoil-shaped pile caps have the lowest size of scouring hole and erosion amount.

Conclusion

By comparing the final longitudinal sections of the scouring at different leveling of the pile caps, it is concluded that the largest reduction in scouring depth occurs in aerofoil-shaped pile caps and pile caps with the sharper nose and better aerodynamic shapes are good options to control the horseshoe vortices and will reduce the scouring depth. Also, when the pile cap is at the same level with the bed, the penetration power of the flow into the space below of the pile cap has been increased, which increases the power of the flow erosion and the maximum scouring depth occurs at this level.

Ethical Considerations compliance with ethical guidelines

The cooperation of the participants in the present study was voluntary and accompanied by their consent.

Funding

No funding.

Authors' contributions

Design and conceptualization: Ramtin Sobhkhiz Foumani, Alireza Mardookhpour
Methodology and data analysis: Ramtin Sobhkhiz Foumani, Alireza Mardookhpour
Supervision and final writing: Ramtin Sobhkhiz Foumani.

Conflicts of interest

The authors declared no conflict of interest.

مقاله پژوهشی

شبیه سازی عددی اثرات ژئوتکنیکی بر آبشستگی موضعی در اطراف گروه پایه کج با استفاده از نرم افزار Flow-3D

رامتین صبح خیز فومنی^۱، علیرضا مردوخ پور^{۲*}

۱. دانشجوی دکتری گروه عمران، دانشگاه قم، قم، ایران

۲. استادیار گروه عمران، دانشگاه آزاد اسلامی واحد لاهیجان، لاهیجان، ایران

چکیده

مقدمه: با قرارگیری پایه پل در مقابل جریان، گردابه‌هایی در مقابل آن شکل گرفته که در نتیجه فعالیت آن‌ها مواد بستر پیرامون پایه فرسایش یافته و چاله آبشستگی شکل می‌گیرد و در صورت کافی نبودن عمق پی و شمع‌های پایه پل، شکست پل را به دنبال خواهد داشت. با پیشرفت فناوری طراحی و ساخت سازه‌ها، شاهد ساخت پل‌ها با اشکال مدرنی بوده که از جمله آن‌ها می‌توان به پل‌های با گروه پایه‌های کج اشاره کرد.

روش: با توجه به اهمیت شناخت مکانیزم‌های موثر بر آبشستگی این نوع از پایه‌های پل، در پژوهش حاضر به بررسی تاثیر شکل هندسی شمع‌های قرار گرفته در زیر پایه‌های کج و رقوم کارگذاری سرشمع در بستر رسوبی بر روی مشخصات آبشستگی اطراف گروه پایه کج به صورت عددی و با نرم‌افزار FLOW-3D پرداخته شد.

یافته‌ها: در گام اول از طریق مقایسه و صحت سنجی نتایج عددی نمودار توسعه زمانی حداکثر عمق آبشستگی در زمان‌های مختلف و در اطراف گروه پایه کج با نتایج آزمایشگاهی اسمعیلی‌ورکی و همکاران (۱۳۹۲) بیشترین درصد خطای نسبی و مقدار RMSE به ترتیب به مقدار ۹/۲۵ درصد و ۰/۰۹۱ محاسبه گردید و مشاهده گردید که تطابق نسبتاً خوبی بین مقادیر حل عددی و آزمایشگاهی برقرار بود. در گام بعدی با بررسی الگوی جریان اطراف گروه پایه‌ها مشخص گردید با تغییر تراز کارگذاری سرشمع در بستر رسوبی گردابه‌های تشکیل شده در بین پایه اول و دوم گروه پایه متفاوت بوده و هر چه تراز کارگذاری نزدیک به بستر و یا بالاتر از آن قرار گیرد گردابه‌ها تشکیل شده با قدرت بیشتری بر روی بستر اطراف گروه پایه کج تاثیر می‌گذارد. با بررسی تنش برشی کل ایجاد شده در بستر جریان در ترازهای مختلف سرشمع مشاهده گردید که بیشترین تنش برشی در حالت کارگذاری سرشمع در تراز بستر رخ می‌دهد و با قرار گیری تراز کارگذاری سرشمع به تراز پایین‌تر از بستر، بیشینه تنش برشی کاهش می‌یابد. علت این امر می‌تواند ناشی از افزایش فاصله بین گروه پایه‌ها باشد بطوریکه وجود پایه دوم باعث کاهش الگوی جریان تشکیل شده در گروه پایه شده و عملکرد گروه پایه بصورت دو پایه مستقل در تشکیل الگوی جریان رفتار می‌کنند.

نتیجه‌گیری: بررسی پروفیل طولی آبشستگی اطراف گروه پایه کج مشاهده گردید که شمع دوکی شکل نسبت به سایر شکل شمع‌ها اثر بهتری در کاهش آبشستگی از خود نشان می‌دهد. بطوریکه حداکثر عمق آبشستگی ایجاد شده در اطراف گروه پایه کج با حضور شکل دوکی شمع، مستطیلی و مستطیلی گرد گوشه حداکثر عمق آبشستگی ۱۹/۶۱، ۱۴/۱۱ و ۶/۴۵ درصد نسبت به شکل استوانه‌ای شمع کاهش پیدا می‌کند. نکته قابل ذکر این که هر چه دماغه شمع آئرودینامیکی و تیز باشد کنترل گردابه‌های نعل اسبی بهتر عمل می‌کند و این امر باعث کاهش عمق آبشستگی در اطراف گروه پایه کج می‌گردد.

تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۱۱/۱۲

تاریخ اولین بازنگری: ۱۳۹۹/۱۲/۲۰

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۱/۰۶

تاریخ آنلاین: ۱۴۰۰/۰۶/۱۰

از دستگاه خود برای اسکن و خواندن مقاله به صورت آنلاین استفاده کنید



DOI:

10.30495/wej.2021.20404.2114

واژه‌های کلیدی:

آبشستگی، رقوم کارگذاری سرشمع، شکل هندسی شمع، گروه پایه کج، Flow-3D

* نویسنده مسئول: علیرضا مردوخ پور

نشانی: گروه عمران، دانشگاه آزاد اسلامی واحد لاهیجان، لاهیجان، ایران

تلفن: ۰۹۱۲۱۹۹۲۳۹۹

پست الکترونیکی: alireza.mardookhpour@liau.ac.ir

مقدمه

آبهستگی در واقع یک فرآیند طبیعی است که به وسیله عملکرد فرسایشی جریان آب روی بستر رودخانه ایجاد میشود که همچنین در ناحیه مجاور پایه های پل و تکیه گاهها نیز اتفاق میافتد. یکی از عمده ترین مشکلات سازه های نظیر پلها که شمع آنها در داخل آب رودخانه قابل فرسایش قرار میگیرند، آبهستگی ایجاد شده در اطراف سر شمع و پایه پلهاست. شکست کامل یا موضعی برخی از پلها به علت فرسایش اطراف پایه ها اتفاق میافتد. تعادل رودخانه زمانی است که میزان رسوب ورودی و خروجی در هر بازه از آن با یکدیگر مساوی باشند. رودخانه به طور طبیعی برای رسیدن به چنین حالتی رفتارهایی از خود نشان میدهد که در نهایت منجر به تعادل فیزیکی آن میگردد. (۱) با این وجود سیلابهای سالانه عامل مهمی در برهم زدن این سیستم بوده و سالانه مقدار زیادی از فرسایش در مسیر رودخانه را باعث میشوند. مطالعات نشان می دهد، آبهستگی موضعی اطراف شمع ها علت اصلی تخریب آن ها می باشد. در حقیقت الگوی جریان، فرسایش و رسوب گذاری اطراف شمع را تحت تأثیر قرار می دهد. بنابراین تعیین هندسه شمع و فونداسیون در آبهستگی از موارد مهم طراحی هیدرولیکی پلهاست. بنا به دلایل اقتصادی و ژئوتکنیکی، در طراحی پایه های پل از گروه پایه کج استفاده می شود (۲)

اولین مطالعات پایه ای در خصوص آبهستگی در اوایل قرن بیستم در آزمایشگاه زونر توسط انگلس در آلمان انجام شد. پس از آن آزمایش و مطالعات قابل توجهی در آزمایشگاه چاگو توسط چاپرت و انگلینگر به انجام رسید که نتایج آن بیانگر تغییرات میزان آبهستگی در انواع مختلف آب شفاف و سیلاب با بستر محرک بود (۳)

به جهت اهمیت مساله آبهستگی اطراف پایه پل تحقیقاتی در رابطه با پارامترهای اثرگذار بر آبهستگی انجام داده شده و با تأثیر پارامترهای هندسی نظیر قطر پایه و یکنواختی سطح مقطع نشان داده شده که برای پایه با سطح مقطع یکنواخت، بیشینه عمق آبهستگی تا ۲/۴ برابر قطر پایه خواهد رسید و در حالتی که سطح مقطع متفاوت باشد، نظیر شرایطی که پایه روی فونداسیون قرار گرفته است، بسته به تراز کارگذاری فونداسیون مقدار آبهستگی متفاوت می باشد. (۴)

با انجام آزمایش ثابت شده است که آبهستگی دو پایه ممکن است روی هم قرار گرفته و تراز بستر در پشت پایه جلویی پایین افتد. در نتیجه جریان به راحتی ذرات را از چاله آبهستگی پایه جلویی حرکت داده و عمق آبهستگی در جلو پایه عمیق تر می گردد. (۵)

هاشمی و همکاران (۲۰۱۹) مطالعاتی در قالب نتایج عددی نشان داده شده که روش های CFD با به تصویرپردازی قدرتمند جریان، توانایی نمایش جریان هنگام آبهستگی موضعی را دارد و این به تشخیص مکانیزم آبهستگی و توسعه آن با زمان، کمک بسیاری می کند. نتایج نشان داد که ماکزیم عمق چاله آبهستگی که یک پارامتر بسیار مهم در پیشگویی برای انجام طراحی پایه های پل بکار روند اما موقعیت

ماکزیم عمق چاله آبهستگی و شکل آن متفاوت از نتایج آزمایشگاهی می باشد (۶)

رجبی زاده و همکاران (۱۳۹۸) در پژوهشی تأثیر اندازه و ارتفاع نصب طوق بر آبهستگی پایه پل و تعیین بهترین شرایط عملکرد طوق در دو حالت جریان ماندگار و غیرماندگار مورد بررسی قرار گرفت. پس از محاسبه درصد کاهش آبهستگی در همه ی حالات آزمایش و مقایسه آنها، بررسی نمودار توسعه زمانی حفره آبهستگی و مقایسه ی حداکثر عمق آبهستگی ایجاد شده در حالات مختلف، مشخص شد که افزایش اندازه طوق و کاهش ارتفاع نصب طوق نسبت به سطح بستر سبب کاهش بیشتر عمق آبهستگی پایه پل می شود که این روند تغییرات در حالت جریان غیرماندگار مشهودتر بود (۷)

اقبال نیک و همکاران (۱۳۹۸) در پژوهش، اثر چیدمان متفاوت پایه پل عمودی و کج در گرهای وه پایه تایی، در کنار تأثیر شرایط جریان و موقعیت قرارگیری گروه پایه در قوس ۸۱۱ درجه تند در آزمایشگاه بررسی شد. نتایج نشان می دهد که عمق آبهستگی و تراز رسوبگذاری در موقعیت ۶۰ درجه و شرایط بستر زنده رخ میدهد. این مقادیر به ترتیب معادل ۴/۲ و ۳/۲ برابر قطر پایه اندازه گیری شد. در هر سه موقعیت استقرار گروه پایه بیشینه ها در قوس، عمق آبهستگی ناشی از قرارگیری گروه پایه همگرا-عمودی است. در حالی که بیشینه تراز رسوبگذاری در حالت استقرار گروه پایه واگرا-عمودی ایجاد شده است (۸)

کریمی و همکاران (۱۳۹۹) در پژوهشی دیگر به تأثیر آرایشهای مختلف قرارگیری (تک ردیفه موازی، دو ردیفه موازی و دو ردیفه زیگزاک) صفحات مستغرق تخت با نسبت طول به ارتفاع در زاویه قرارگیری ۲۰ درجه نسبت به جهت جریان، بر کاهش آبهستگی گروه پایه و تکیه گاه پل در حضور اجسام شناور مستطیل شکل به صورت آزمایشگاهی مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج حاکی از آن بود که آرایش دو ردیفه سه تایی به صورت زیگزاک بیشترین تأثیر را در کاهش آبهستگی و حفاظت پایه-ها و تکیه گاه داشته است. در این حالت فاصله صفحات از تکیه گاه و فاصله ردیفها با فاصله نسبی ۰/۵ و ۱ می باشد (۹)

کشاورزی و همکاران (۲۰۱۸) حداکثر عمق آبهستگی در بالادست، جلو و پشت پایه را برای پایههای ۲ تایی در یک امتداد بررسی کردند. آنها اظهار کردند که حداکثر عمق آبهستگی در بالادست پایه جلویی هنگامی رخ میدهد که فاصله بین ۲.۵ برابر قطر آن می باشد (۱۰)

اوسروش و همکاران (۲۰۱۸) به صورت آزمایشگاهی آبهستگی پایه پل به شکل بینی نوک تیز با نصب صفحات مستغرق افقی در ارتفاعهای مختلف پایه را مورد ارزیابی قرار دادند. همچنین بیان کردند که با نزدیکتر شدن صفحات مستغرق افقی به بستر، عمق آبهستگی کاهش می یابد. در نهایت، از اندازه گیریهای آزمایشگاهی چهار معادله برای برآورد عمق آبهستگی پیشنهاد شد (۱۱)

سطوح حجم کنترل است. چنانچه این معادله را به فرم انتگرالی و بر روی سطوح کنترل مورد نظر بیان نماییم، به رابطه‌ی (۲) خواهیم رسید:

$$\frac{\partial(\int \rho dV)}{\partial t} = -\int_A \rho(\vec{V}_{rel} \cdot d\vec{A}) \quad (2)$$

که در آن بردار سرعت نسبی \vec{V}_{rel} بیانگر اختلاف سرعت سیال و بردار سرعت حجم کنترل می‌باشد به طوری که چنانچه حجم کنترل متحرک بوده و مثلاً سرعتی برابر با سرعت سیال داشته باشد، هیچگونه جرمی وارد آن یا از آن خارج نمی‌شود. حال ضروری است برای تبدیل انتگرال بر روی سطوح رابطه‌ی (۲)، به انتگرال بر روی حجم از تئوری دیورژانس^۲ استفاده نماییم. براساس تئوری دیورژانس، برای هر کمیت برداری مانند \vec{X} می‌توان رابطه‌ی (۳) را به عنوان تبدیل کننده‌ی انتگرال سطح به انتگرال حجم بیان نمود. (۱۵)

$$\int_A \vec{X} \cdot d\vec{A} = \int_V \text{div}(\vec{X}) dV \quad (3)$$

معادله‌ی پیوستگی برای یک جریان تراکم‌ناپذیر بصورت زیر بدست می‌آید:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (4)$$

معرفی مدل‌های مورد بررسی تحقیق حاضر

در تحقیق حاضر مدل‌سازی جریان و آبشستگی اطراف پایه پل کج قرار گرفته بر روی گروه شمع‌ها با اشکال هندسی متفاوت انجام گرفته است. با توجه به اینکه یکی از مهم‌ترین بخش‌های تحقیقات حل عددی، صحت‌سنجی مدل شبیه‌سازی شده می‌باشد و در این تحقیق نیز در بخش صحت‌سنجی مدل، از طریق مقایسه عمق آبشستگی اطراف پایه پل کج قرار گرفته بر روی فونداسیون مکعبی شکل نتایج شبیه‌سازی حاصل از نرم‌افزار Flow-3D و آزمایش‌های انجام شده توسط اسمعیلی‌ورکی و همکاران (۱۶) در آزمایشگاه هیدرولیک دانشگاه گیلان استفاده شده است.

با توجه به این که مدل آزمایشگاهی در مقیاس ۱/۱۹۰ نمونه واقعی پل هشتم اهواز انجام گرفته شده است، بدین ترتیب در تحقیق حاضر جریان در کانالی بطول ۶ متر، عرض ۰/۹۲ متر و ارتفاع ۰/۶ متر شبیه‌سازی و مطالعه شده است. شکل (۲) مشخصات کانال شبیه‌سازی شده به همراه مشخصات هندسی مدل‌های پایه پل قرار گرفته بر روی گروه شمع با اشکال هندسی متفاوت و جدول (۱) پارامترهای هیدرولیکی جریان در نظر گرفته شده تحقیق حاضر را نشان می‌دهد.

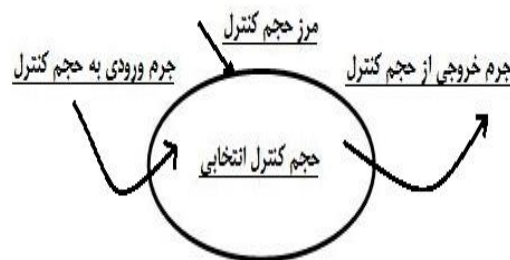
طاهری و قمشی (۲۰۱۹) بررسی اثر موقعیت قرارگیری طوقه‌های مشبک بر عمق آبشستگی پایه پل دوکی شکل را مورد بررسی قرار دادند. در این تحقیق طوقه‌های ساده و طوقه‌های مشبک در چهار موقعیت قرار داده شدند. نتایج نشان داد که تراز سطح بستر و زیر بستر بهترین موقعیت برای نصب طوقه‌ها بود. در سطح بستر طوقه ساده راندمان ۱۰۰ درصد و طوقه ۷۰ درصد مشبک، راندمان ۹۲ درصد در کاهش عمق آبشستگی داشت. در زیر بستر نیز عملکرد همه طوقه‌ها مشابه هم بودند و باعث کاهش ۸۸ درصد عمق آبشستگی شدند. (۱۲)

مسایل هیدرولیکی و رسوبی همواره در بحث رودخانه‌ها و شمع و پایه‌ها مطرح بوده است و ضرورت بحث آبشستگی و ارتقا اطلاعات درمورد شناخت خواص هیدرولیکی و رسوبی در ازای اشکال مختلف وجود داشته است و کمتر به آن پرداخته شده است. در تحقیق حاضر شبیه‌سازی عددی تاثیر هندسه شمع‌ها با فنداسیون ثابت با گروه پایه کج در آبشستگی موضعی مورد بررسی قرار گرفته است.

مواد و روش‌ها

اولین قدم در مسیر شبیه‌سازی جریان بدست آوردن معادلات حاکم بر این پدیده می‌باشد. پایه و اساس تمام روش‌های حل عددی برای مدل‌سازی، حل معادلات جریان شامل معادله‌ی پیوستگی و سه معادله‌ی مومنتوم در جهت محورهای سه‌گانه‌ی مختصات که به معادلات ناویر استوکس^۱ معروفند، می‌باشد. در این بخش از تحقیق حاضر سعی می‌شود این معادلات بصورت کلی بیان شود. معادله‌ی پیوستگی به عنوان یکی از معادلات اساسی مکانیک سیالات، بیانی از قانون بقای جرم بوده و نشان می‌دهد تغییر جرم سیال محتوی یک حجم کنترل طی یک بازه‌ی زمانی مشخص، برابر با اختلاف مجموع جرم‌های ورودی و خروجی حجم کنترل می‌باشد. (۱۳) با فرض یک حجم کنترل انتخابی مطابق شکل (۱) برای نوشتن معادله‌ی پیوستگی خواهیم داشت (۱۴)

$$\dot{m}_{stored} = \sum \dot{m}_{in} - \sum \dot{m}_{out} \quad (1)$$



شکل ۱- حجم کنترل انتخابی و سطوح مرزی آن

در رابطه‌ی (۱)، \dot{m}_{stored} بیانگر جرم ذخیره شده در داخل حجم کنترل، $\sum \dot{m}_{in}$ بیانگر مجموع جرم‌های ورودی از طریق سطوح حجم کنترل و $\sum \dot{m}_{out}$ نیز بیانگر مجموع جرم‌های خروجی از

² Divergence Theorem

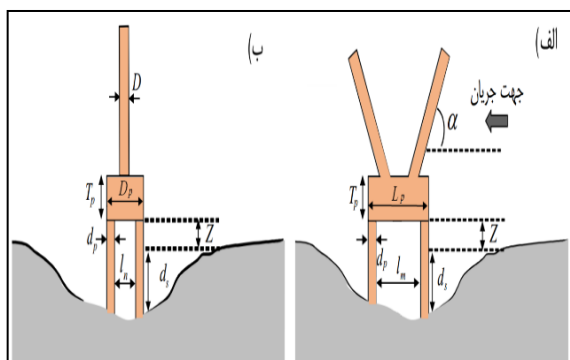
¹ Navier Stocks Equation

آنالیز ابعادی

مقدار آبستگي اطراف پایه های پل به پارامترهای متعددی بستگی دارد که هر کدام تاثیر خاص و متفاوتی بر مکانیزم آبستگي داشته و باعث افزایش یا کاهش مقدار فرسایش بستر در اطراف پایه ها می گردد. پارامترهای موثر بر آبستگي اطراف پایه های پل مجموعه ای از پارامترهای توصیف کننده مشخصات نوع سیال و رسوب بستر، هندسه پایه پل و شرایط هیدرولیکی جریان را شامل می گردد که آن ها را می توان بصورت رابطه ۵ نوشت: (۱۷)

$$f_1 = (y, d_s, D, D_p, T_p, d_p, l_m, l_n, D_{50}, Z, U, \rho, \mu, \alpha, t, t_e) \quad (5)$$

در این رابطه y عمق جریان، d_s عمق آبستگي، D عرض پایه پل، D_p عرض سرشمع، T_p ضخامت سرشمع، d_p قطر شمع، l_m فاصله شمع ها در یک ردیف، l_n فاصله شمع ها در یک ستون، D_{50} قطری که ۵۰ درصد ذرات از آن کوچکتر است، Z تراز کارگذاری سرشمع، U سرعت متوسط جریان، ρ چگالی آب، μ لزجت دینامیکی، g شتاب ثقل، α زاویه انحراف پایه ها در صفحه موازی جریان، t زمان از شروع آبستگي و t_e زمان تعادل آبستگي می باشد. در شکل (۳) پارامترهای هندسی مهم و تاثیرگذار گروه پایه کج ارائه شده است.



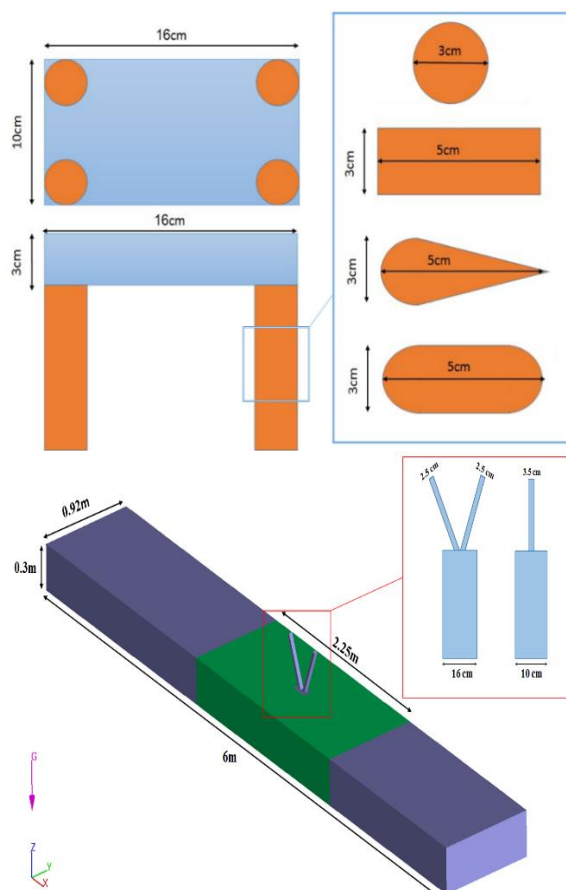
شکل ۳- تعریف پارامترهای هندسی گروه پایه کج

الف) در جهت جریان ب) در مقابل جریان

با بکارگیری نظریه باکینگهام در تحلیل ابعادی، رابطه زیر را می توان به صورت رابطه بی بعد ۶ نوشت: (۱۸)

$$f_2 = \left(\frac{y}{D}, \frac{d_s}{D}, \frac{D_p}{D}, \frac{d_p}{D}, \frac{l_m}{D}, \frac{l_n}{D}, \frac{D_{50}}{D}, \frac{Z}{T_p}, \frac{t}{T_p}, Re, Fr, \alpha \right) \quad (6)$$

که در آن Fr عدد فرود و Re عدد رینولدز می باشد. با توجه به شرایط مدل سازی عددی تحقیق حاضر، از میان پارامترهای موثر بر آبستگي پایه پل، ضخامت سرشمع و قطر شمع، عمق جریان و قطر ذره، فاصله شمع ها در ردیف و ستون و زاویه پایه های پل ثابت در نظر گرفته شده است. همچنین به جهت اینکه عدد رینولدز در تمامی مدل ها با توجه به شرایط هیدرولیکی، جریان آشفته و مقدار عدد رینولدز از ۹۱۰۰ بیشتر می باشد، لذا از تاثیر این پارامتر صرف نظر شده و رابطه ۶ بصورت زیر اصلاح می گردد.



شکل ۲- مشخصات هندسی پایه پل کج به همراه گروه شمع های قرار گرفته در زیر پایه

جدول ۱- مشخصات هندسی و پارامترهای هیدرولیکی جریان در مدل های تحقیق حاضر

مدل	سرعت نسبی (U/U _c)	عمق نسبی جریان (y/D*)	تراز نسبی قرارگیری فونداسیون (Z/T _{pc})
پایه پل کج بر روی هم سطح بستر	۰/۹۵	۱	۱
پایه پل کج بر روی فونداسیون مکعبی شکل	۰/۹۵	۱	۱، -۱، -۲
پایه پل کج بر روی گروه شمع استوانه ای	۰/۹۵	۱	۱، -۱، -۲
پایه پل کج بر روی گروه شمع مستطیلی	۰/۹۵	۱	۱، -۱، -۲
پایه پل کج بر روی گروه شمع مستطیلی گرد گوشه	۰/۹۵	۱	۱، -۱، -۲
پایه پل کج بر روی گروه شمع دوکی شکل	۰/۹۵	۱	۱، -۱، -۲

حداکثر عمق نسبی آبستگي (d_s/D) (نسبت حداکثر عمق آبستگي به عرض فنداسیون) مدل عددی حاضر با نتایج آزمایشگاهی اسمعیلی-ورکی و همکاران (۱۳۹۲) مورد مقایسه و درصد میانگین خطای مطلق^۳ ($MAPE(\%)$) و خطای جذر میانگین مربعات^۴ ($RMSE$) برای هر یک محاسبه گردید. در روابط (۸) و (۹) نحوه محاسبه خطاها ارائه شده است. (۱۹)

$$100 \times \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{X_{exp} - X_{num}}{X_{exp}} \right| \quad MAPE \quad (\%) \quad (8)$$

$$\sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (X_{exp} - X_{num})^2} \quad RMSE \quad (9)$$

در این روابط X_{exp} : مقدار دادهای آزمایشگاهی، X_{num} : مقدار دادهای عددی و n تعداد دادهها می باشد.

$$\frac{d_s}{D} = f_3 \left(\frac{Z}{T_p}, \frac{t}{t_e}, Fr \right) \quad (7)$$

آنالیز حساسیت مش بندی در شبکه محاسباتی

در شبکه بندی مدل در محیط نرم افزار Flow-3D علاوه بر تعداد مش ها، اندازهی آن ها در هر راستا نیز می تواند بر روی نتایج مدل سازی تاثیر گذار باشد. برای حالتی که مش هایی با اندازهی متغییر در یک راستا ایجاد می شود، نرم افزار بصورت خودکار تغییر اندازهی مش ها در همان راستا را تدریجی اعمال می کند ولی برای دو راستای متعامد بایستی دقت نمود نسبت شکل یک سلول از شبکهی حل، که از تقسیم بزرگترین بعد مکعب به کوچکترین بعد آن بدست می آید نباید بیشتر از ۳ باشد. برای مدل پایه کج مورد بررسی تحقیق حاضر، با شبیه سازی مدل در ۳ حالت مختلف با اندازهی مش های متفاوت و مقایسه افزایش دقت نتایج آن ها از روی داده های آزمایشگاهی در نهایت مش بندی بهینه برای مدل مذکور انتخاب شد. برای این کار طبق جدول ۲ نتایج

جدول ۲- آنالیز حساسیت مش بندی در شبکه محاسباتی تحقیق حاضر

حالت	تعداد مش	نسبت ابعاد حداکثر یا نسبت شکل	حداکثر عمق نسبی آبستگي (d_s/D) توسط اسمعیلی ورکی و همکاران (۱۳۹۲)	حداکثر عمق نسبی آبستگي (d_s/D) در نتایج عددی FLOW-3D	درصد میانگین خطای مطلق MAPE (%)	خطای جذر میانگین مربعات RMSE
۱	۸۹۱۲۶۰	۱/۸۶	۰/۹۹۰	۰/۶۹۴	۲۹/۸۹	۰/۲۹۶
۲	۱۲۸۱۵۶	۱/۴۳	۰/۹۹۰	۰/۷۹۱	۲۰/۱۰	۰/۱۹۹
۳	۱۸۶۰۰۰	۱/۰۱	۰/۹۹۰	۰/۸۹۸	۹/۲۵	۰/۰۹۲
۴	بیشتر از ۱۸۶۰۰۰			نیازمند سیستم با پردازش بالا و صرف زمان بیشتر برای شبیه سازی		

مقایسه نتایج عددی با نتایج آزمایشگاهی

یکی از راه های صحت سنجی و مقایسه نتایج و همچنین تعیین محدوده درصد خطا بین داده های حاصل از نرم افزار FLOW-3D با داده های آزمایشگاهی استفاده از رابطه (۱۰) می باشد.

$$E = \frac{((d_s / D)_N - (d_s / D)_E)}{(d_s / D)_E} \times 100 \quad (10)$$

در رابطه ی فوق E نشانگر درصد خطای نسبی، $(d_s / D)_N$ حداکثر عمق نسبی آبستگي در حل عددی و $(d_s / D)_E$ حداکثر عمق نسبی آبستگي اندازه گیری شده می باشد. در این تحقیق در بخش صحت سنجی مدل، از طریق مقایسه نمودار توسعه زمانی آبستگي در زمان های مختلف اطراف گروه پایه کج حاصل از نتایج شبیه سازی نرم-افزار FLOW-3D و آزمایش های انجام شده توسط اسمعیلی ورکی

با توجه به خطاهای بدست آمده، حالت ۳ به عنوان مش بهینه با تعداد ۱۸۶۰۰۰۰ تعداد سلول محاسباتی انتخاب گردید. مش های ایجاد شده در هر راستای کانال بصورت یکنواخت با اندازهی ۰/۹۹، ۰/۱ و ۰/۱ به ترتیب در راستای طولی، عرضی و ارتفاع انتخاب شده اند تا با ارائه بیشترین دقت محاسباتی، بهینه ترین زمان شبیه سازی را ایجاد نمایند. همچنین بیشترین نسبت شکل شبکه بندی در این مدل ۱/۰۱ بدست آمده که کوچکتر از ۳ می باشد بنابراین از این نظر هم شبکه بندی استفاده شده مناسب است. به منظور عدم تاثیر پذیری نتایج مدل از تعداد و اندازهی مش ها، شبکه بندی مدل های بررسی شده یکسان در نظر گرفته شده است.

⁴ Root Mean Square Error

³ Mean Absolute Percentage Error

جدول ۳ - مقادیر خطای نسبی و RMSE حداکثر عمق نسبی آبشستگی حاصل از نتایج شبیه سازی و آزمایشگاهی

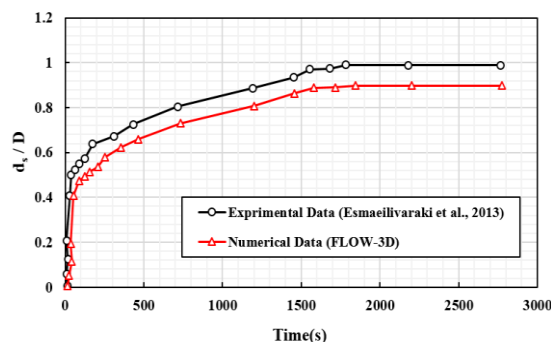
RMSE	حداکثر عمق		زمان (دقیقه)
	درصد خطای نسبی	نسبی آبشستگی در نتایج آزمایشگاهی	
۰/۰۰۸	۷/۲۰	۰/۱۲۳	۱۷
۰/۰۲۶	۵/۳۴	۰/۵۰۰	۳۷
۰/۰۳۵	۶/۴۹	۰/۵۴۸	۸۹
۰/۰۵۸	۹/۱۱	۰/۶۳۷	۱۷۵
۰/۰۴۸	۷/۲۶	۰/۶۷۲	۳۱۲
۰/۰۷۴	۹/۲۲	۰/۸۰۳	۷۱۵
۰/۰۸۰	۸/۳۳	۰/۹۶۹	۱۵۵۳
۰/۰۹۱	۹/۲۵	۰/۹۹۰	۱۷۸۴
۰/۰۹۰	۹/۱۲	۰/۹۸۸	۲۷۶۷

مشاهده می گردد که بیشترین درصد خطای نسبی و مقدار RMSE برای دقیقه ۱۷۸۴ به ترتیب به مقدار ۹/۲۵ درصد و ۰/۰۹۱ می باشد. این حال می توان نتیجه گرفت که تطابق نسبتاً خوبی بین مقادیر حل عددی و آزمایشگاهی وجود داشته و می توان سایر شرایط مد نظر را برای مدل اجرا نمود و نتایج مورد نیاز را تجزیه و تحلیل نمود.

الگوی جریان اطراف گروه پایه کج

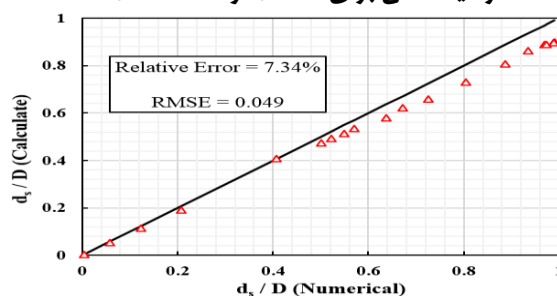
الگوی جریان اطراف گروه پایه ها نسبت به تک پایه بسیار متفاوت است. در گروه پایه ها، پایه بالادستی با برهم زدن جریان مانند یک ژنراتور تولید کننده آشفتگی و پایه پایین دست مانند یک وسیله کاهش مقاومت عمل می کند (جعفری و همکاران، ۱۳۹۵). نتایج حاصل از میدان جریان در صفحه x-y در اطراف گروه پایه کج در شرایط قرارگیری سرشمع بالاتر از بستر ($Z/T_p=0$)، هم تراز بستر ($Z/T_p=-1$)، پایین تر از بستر ($Z/T_p=-2$) به ترتیب در زیر نشان داده شده است.

و همکاران (۱۶) در رقوم کارگذاری فونداسیون $Z/D=0$ (نسبت فاصله بستر جریان تا روی فنداسیون به عرض فنداسیون) استفاده شده است. شکل (۴) و (۵) به ترتیب مقایسه نمودار توسعه زمانی آبشستگی اطراف فنداسیون پایه کج در رقوم کارگذاری فونداسیون $U/U_c=0.95$ و $Z/D=0$ حاصل از نتایج عددی و آزمایشگاهی و درصد خطای نسبی حاصل از مقایسه نتایج شبیه سازی و آزمایشگاهی را نشان می دهد.



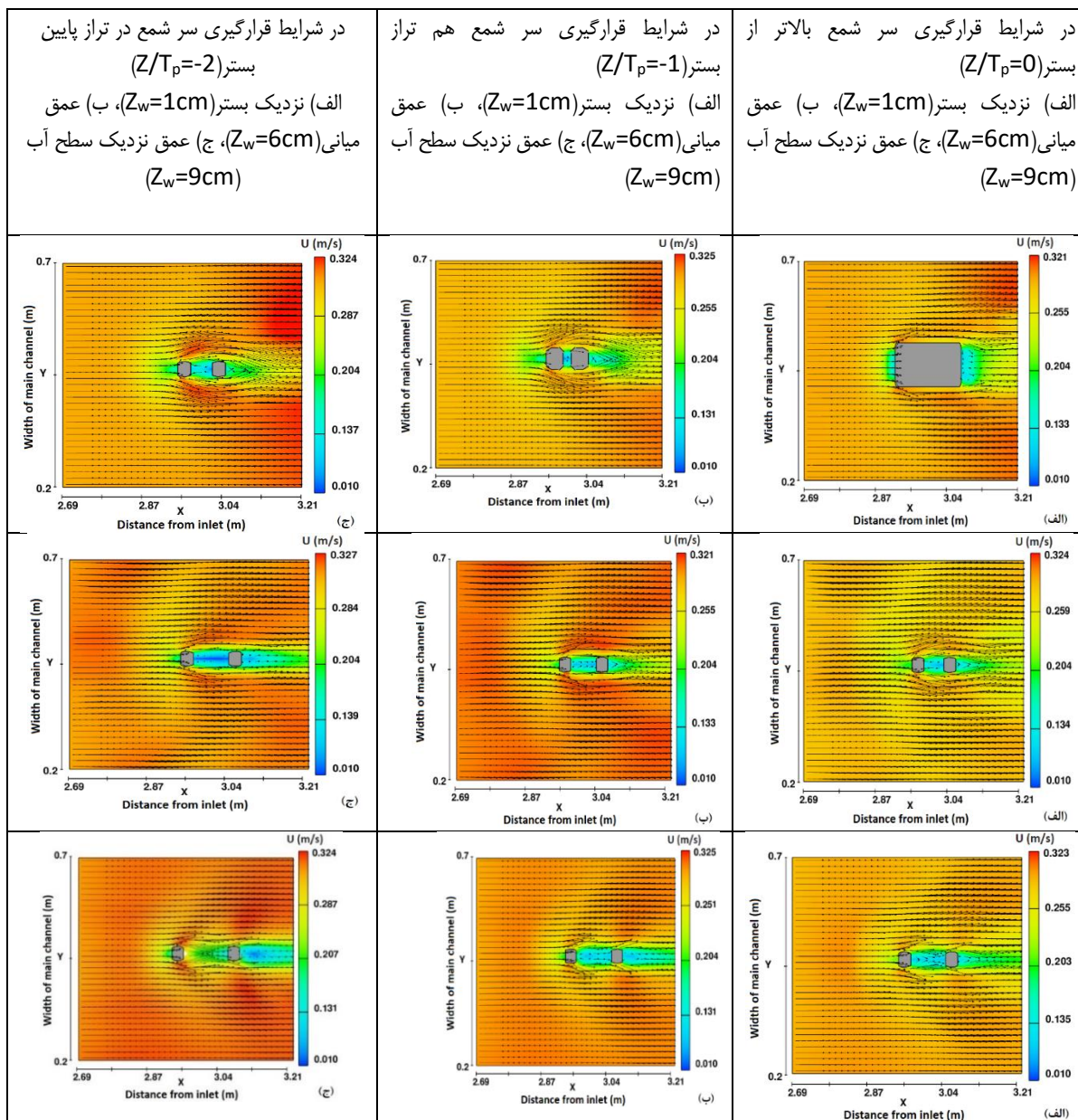
شکل ۴ - مقایسه توسعه زمانی آبشستگی نتایج عددی و

آزمایشگاهی برای $U/U_c=0.95$ و $Z/D=0$



شکل ۵ - برازش مقادیر عددی و آزمایشگاهی حداکثر عمق نسبی آبشستگی (ds/D)

مشاهده می گردد که روند توسعه زمانی آبشستگی حاصل از نتایج عددی همانند روند نتایج آزمایشگاهی اسمعیلی ورکی و همکاران (۱۳۹۲) می باشد. با مشاهده شکل (۴) مقدار میانگین خطای نسبی حداکثر عمق نسبی آبشستگی نتایج حل عددی و مقدار خطای RMSE به ترتیب ۷/۳۴ درصد و ۰/۰۴۹ می باشد. جدول (۳) مقادیر خطای نسبی و RMSE حداکثر عمق نسبی آبشستگی حاصل از نتایج شبیه سازی و آزمایشگاهی را برای زمان های مختلف نشان می دهد.



شکل ۶- میدان جریان در صفحه x-y در اطراف گروه پایه کج در شرایط قرارگیری سرشمع

ستون راست) بالاتر از بستر ($Z/T_p=0$)، ستون وسط) هم تراز بستر ($Z/T_p=-1$)، ستون چپ) پایین تر از بستر ($Z/T_p=-2$)
الف) نزدیک بستر ($Z_w=1\text{cm}$)، ب) عمق میانی ($Z_w=6\text{cm}$)، ج) عمق نزدیک سطح آب ($Z_w=9\text{cm}$)

همچنین در ستون چپ شکل ۶ مشاهده می شود در حالت قرارگیری سرشمع پایین تر از بستر، به دلیل افزایش فاصله پایه از یکدیگر جریان های چرخشی در هر سه عمق جریان در پایین دست پایه اول تمرکز بیشتری دارد بطوریکه خطوط جریان در بالادست پایه دوم تقریباً موازی با بستر می باشد. نکته دیگر اینکه در همه ترازهای کارگزاری سرشمع، مولفه طولی سرعت جریان با رسیدن به پایه اول پیرامون آن افزایش یافته است. این افزایش در این ناحیه و امتداد آن به سمت پایین دست ناشی از تنگ شدگی جریان به علت قرار گرفتن پایه و ناحیه چرخشی گردابه برخاستگی در پایین دست می باشد. بطوریکه در بین گروه پایه به دلیل تشکیل گردابه ها و جریان های پایین رونده سرعت جریان نزدیک

همانطور که که ستون راست شکل ۶ مشاهده می شود در حالت قرارگیری سرشمع بالاتر از بستر، گردابه های تشکیل شده در بین پایه اول و دوم گروه پایه در عمق های میانی نزدیک سطح آب کل فاصله بین دو پایه را در برگرفته است. در پایین دست گروه پایه گردابه های جریان از نزدیک بستر تا عمق میانی جریان گسترش یافته است.

ستون وسط شکل ۶ مشاهده می شود در حالت قرارگیری سرشمع بالاتر از بستر، از نزدیک بستر تا عمق میانی جریان، جریان های چرخشی در فاصله بین دو پایه توسعه می یابد. این در حالی است که در نزدیک سطح آب و در بالادست پایه دوم خطوط جریان موازی با بستر می شود.

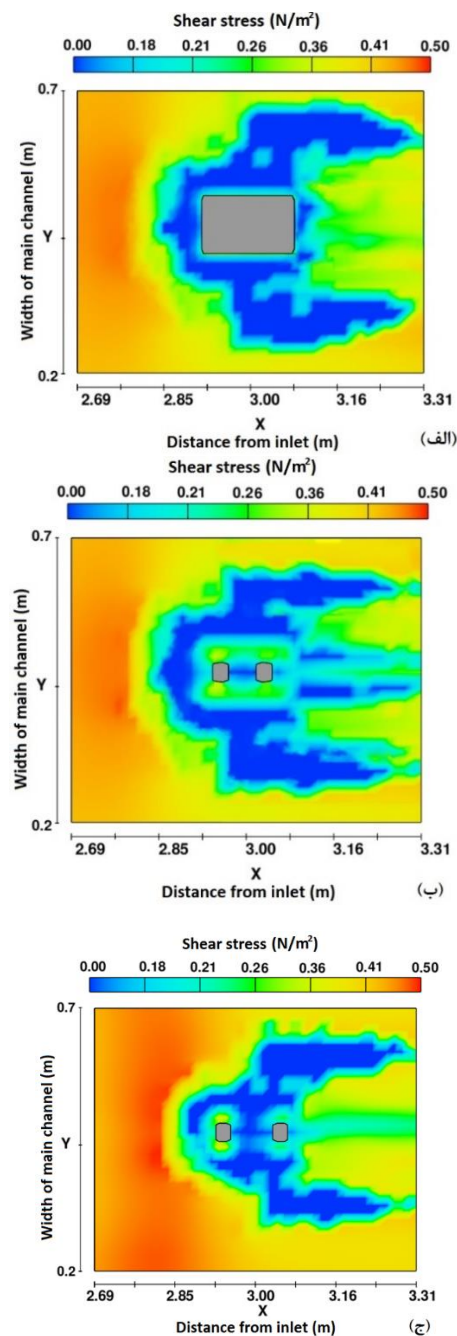
گروه پایه‌ها باشد بطوریکه وجود پایه دوم باعث کاهش الگوی جریان تشکیل شده در گروه پایه شده و عملکرد گروه پایه بصورت دو پایه مستقل در تشکیل الگوی جریان رفتار می‌کنند. کاهش تنش برشی در شرایط کارگذاری سرشمع در تراز بالاتر از بستر هم صادق می‌باشد. علت آن به دلیل است که در تراز کارگذاری سرشمع در شرایط بالاتر از بستر ($Z/T_p=0$) ضخامت سرشمع همانند طوقه عمل کرده و مانع از برخورد مستقیم گردابه‌ها به بستر رسوبی می‌گردد. بنابراین با بررسی تغییرات تنش برشی در ترازهای مختلف کارگذاری سرشمع انتظار می‌رود که مقدار حداکثر عمق آبشستگی اطراف گروه پایه کج در تراز هم سطح بستر روی دهد. اما این در حالی است که کاردان (۱۳۹۷) در پژوهش خود نواحی تنشهای برشی بحرانی نشان داد. میزان درصد کاهش تنش برشی بستر پیرامون مدل پایه دارای جفت شکاف نسبت به مدل بدون شکاف برابر ۷۶٪ است. همچنین ایجاد شکاف در پایه ها، از قدرت مخرب گردابه های پشت پایه می‌کاهد. همچنین بشارتی و حکیم زاده (۱۳۸۹) الگوی جریان و تنش برشی بستر اطراف پایه ها مورد بررسی و مقایسه قرار داده اند و نتایج نشان داده که شیبدار شدن پایه تأثیر بسزایی در کاهش آشفته‌گی جریان گذرنده و در نتیجه کاهش تنش برشی بستر در اطراف پایه را به دنبال دارد.

تأثیر شکل هندسی شمع‌ها بر پروفیل آبشستگی

اطراف گروه پایه کج

یکی از روش‌های مهار و یا کاهش پروفیل آبشستگی، می‌تواند استفاده از اشکال مختلف هندسی در شمع‌های بکار رفته در زیر گروه پایه کج باشد. در شکل (۸) پروفیل طولی آبشستگی اطراف گروه پایه کج با شکل هندسی مختلف شمع‌ها ارائه شده است. برای تفهیم بهتر نام هندسی شمع‌های زیر گروه پایه کج به اختصار بصورت Circular Rectangular pier = (R1), pier = (C1) Aerofoi pier = (A1), rectangles = (P1) نشان‌گذاری شده است.

به صفر می‌گردد. شکل (۷) تنش برشی کل ایجاد شده در بستر جریان در ترازهای مختلف سرشمع را نشان می‌دهد.



شکل ۷- تنش برشی کل در بستر جریان در ترازهای

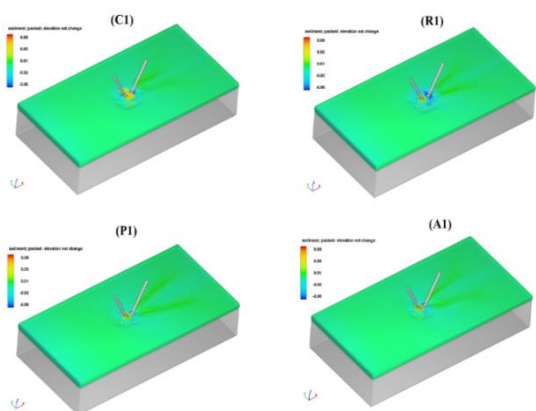
مختلف سرشمع

الف) بالاتر از بستر ($Z/T_p=0$)، ب) هم‌تراز بستر ($Z/T_p=-$

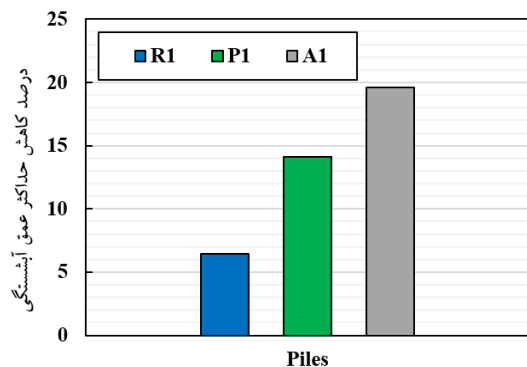
1)، ج) پایین تر از بستر ($Z/T_p=-2$)

با مقایسه تغییرات تنش در شرایط کارگذاری سرشمع در ترازهای مختلف مشاهده می‌شود که بیشترین تنش برشی در حالت کارگذاری سرشمع در تراز بستر رخ می‌دهد ($Z/T_p=-1$) و با قرارگیری تراز کارگذاری سرشمع در تراز پایین‌تر ($Z/T_p=-2$) از بستر بیشینه تنش برشی کاهش می‌یابد. علت این امر می‌تواند ناشی از افزایش فاصله بین

مشاهده می‌شود که شمع دوکی شکل نسبت به سایر شکل شمع‌ها اثر بهتری در کاهش آبهستگی از خود نشان داده است. بطوریکه حداکثر عمق آبهستگی ایجاد شده در اطراف گروه پایه کج با حضور شمع دوکی شکل ۳/۳۶ سانتی‌متر بوده این در حالی است که برای شمع‌های استوانه‌ای، مستطیلی و مستطیلی گردگوشه حداکثر عمق آبهستگی به ترتیب ۴/۱۸، ۳/۹۱، ۳/۵۹ سانتی‌متر می‌باشد. علت نقش موثرتر شکل دوکی شکل در کاهش آبهستگی می‌تواند ناشی از نوع شکل هندسی آن در کاهش گرداب‌های برخاستگی باشد. شکل (۹) و (۱۰) به ترتیب چاله آبهستگی اطراف گروه پایه کج و نمودار ستونی درصد کاهش حداکثر عمق آبهستگی با حضور شمع‌ها و شکل‌های هندسی متفاوت نسبت به شمع استوانه‌ای را نشان می‌دهد.

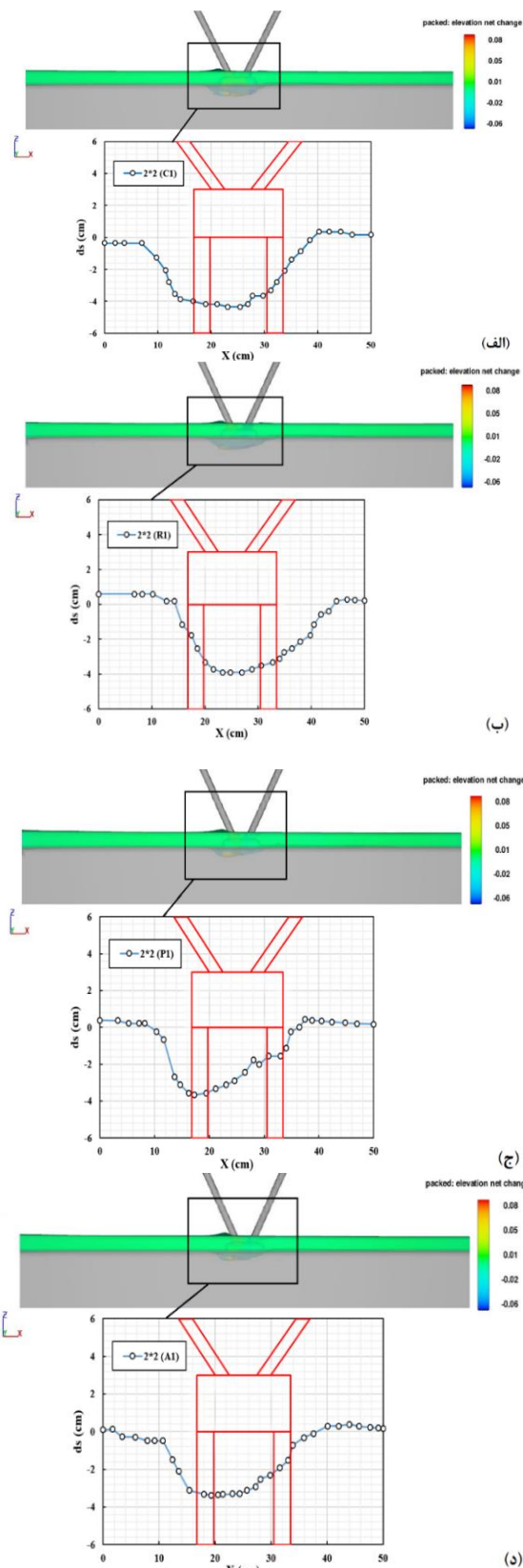


شکل ۹- چاله آبهستگی اطراف گروه پایه کج با حضور شمع‌ها با هندسه‌های مختلف



شکل ۱۰- درصد کاهش حداکثر عمق آبهستگی با حضور شمع‌ها با هندسه مختلف نسبت به شمع استوانه‌ای- ای شکل

مشاهده می‌شود که با تغییر شکل هندسی شمع‌های زیر گروه پایه کج از حالت استوانه‌ای به شکل‌های دوکی شکل، مستطیلی گردگوشه و مستطیلی باعث کاهش ابعاد چاله و حداکثر عمق آبهستگی شده بطوریکه به ترتیب موجب ۱۹/۶۱، ۱۴/۱۱ و ۶/۴۵ درصد حداکثر عمق آبهستگی کاهش پیدا کرده است. نکته قابل ذکر این که هر چه دماغه شمع آئروپنایمیک و تیز باشد کنترل گرداب‌های نعل اسبی بهتر عمل



شکل ۸- پروفیل طولی آبهستگی اطراف گروه پایه کج با شکل هندسی مختلف شمع‌ها
الف) استوانه ای (C1) ب) مستطیلی (R1) ج) مستطیلی گردگوشه (P1) د) دوکی (A1)

عمق آبستگي برای شکل هندسی حالت دوکی شکل شمعها اتفاق می افتد و هر چه دماغه شمع آئرویدینامیکی و تیز باشد در کنترل گردابه- های جریان بهتر عمل می کند و این امر باعث کاهش عمق آبستگي می گردد. همچنین در شرایط تراز کارگذاری سرشمع بصورت هم تراز با بستر به علت تاثیر بیشتر و قدرت نفوذ بیشتر جریان به فضای زیر سرشمع و به طبع آن قدرت فرسایشی بالا مقدار حداکثر عمق آبستگي در این تراز اتفاق می افتد.

نتیجه گیری

آبستگي اطراف پایه های پل یکی از مباحث مهم در هیدرولیک رسوب و مهندسی رودخانه به شماره می رود. در اثر آبستگي حفره ای در اطراف پایه پل شکل می گیرد که به تدریج با توسعه آن باعث ناپایداری سازه و در نهایت تخریب آن در مواقع سیلاب می گردد. یکی از اقدامات مقابله با آبستگي و تخریب پایه های پل کاهش قدرت گردابه ها در مجاورت پایه و یا شمع های زیر آن، ایجاد و اصلاح هندسه آن ها می- باشد. در این تحقیق سعی گردید تاثیر شکل هندسی شمع های قرار گرفته در زیر پایه های کج و رقوم کارگذاری سرشمع در بستر رسوبي بر روی مشخصات آبستگي اطراف گروه پایه کج به صورت عددی و با نرم افزار FLOW-3D مورد تجزیه و تحلیل قرار گیرد. در این راستا نتایج و پیشنهادهایی در این زمینه ارائه شده است.

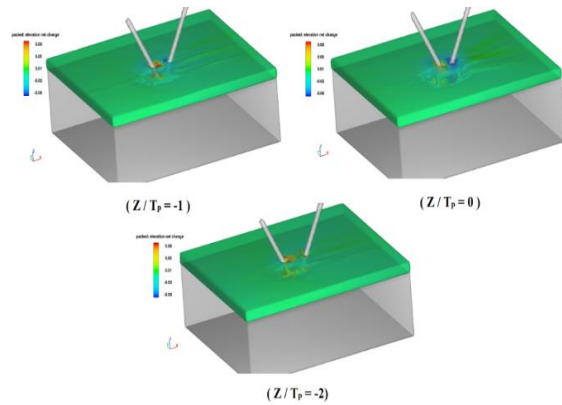
۱- بررسی الگوی جریان اطراف گروه پایه ها، در صفحه X-Y از اطراف گروه پایه کج در شرایط قرارگیری سرشمع بالاتر از بستر ($Z/T_p=0$)، هم تراز بستر ($Z/T_p=-1$)، پایین تر از بستر ($Z/T_p=-2$) انجام گردید. در حالت قرارگیری سرشمع بالاتر از بستر، گردابه های تشکیل شده در بین پایه اول و دوم گروه پایه در عمق های میانی نزدیک سطح آب کل فاصله بین دو پایه را دربر می گیرند و در پایین دست گروه پایه گردابه- های جریان از نزدیک بستر تا عمق میانی جریان گسترش می یابند.

۲- در حالت قرارگیری سرشمع بالاتر از بستر، از نزدیک بستر تا عمق میانی جریان، جریان های چرخشی در فاصله بین دو پایه توسعه می یابد. این در حالی است که در نزدیک سطح آب و در بالادست پایه دوم خطوط جریان موازی با بستر می شود

۳- در حالت قرارگیری سرشمع پایین تر از بستر، به دلیل افزایش فاصله پایه از یکدیگر جریان های چرخشی در هر سه عمق جریان در پایین دست پایه اول تمرکز بیشتری دارد بطوریکه خطوط جریان در بالادست پایه دوم تقریباً موازی با بستر می باشد. نکته دیگر اینکه در همه تراز- های کارگزاری سرشمع، مولفه طولی سرعت جریان با رسیدن به پایه اول پیرامون آن افزایش یافته است. این افزایش در این ناحیه و امتداد آن به سمت پایین دست ناشی از تنگ شدگی جریان به علت قرار گرفتن پایه و ناحیه چرخشی گردابه برخاستگی در پایین دست می باشد. بطوریکه در بین گروه پایه به دلیل تشکیل گردابه ها و جریان های پایین رونده سرعت جریان نزدیک به صفر می گردد.

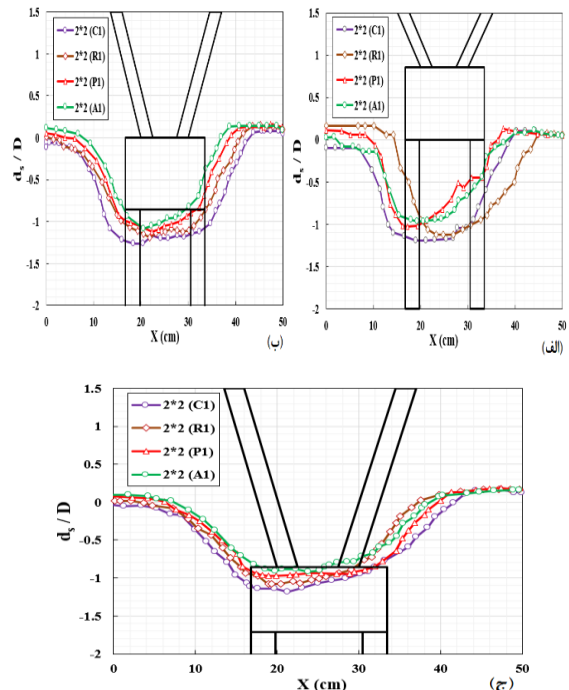
۴- با بررسی تنش برشی کل ایجاد شده در بستر جریان در ترازهای مختلف سرشمع مشاهده گردید که بیشترین تنش برشی در حالت کارگذاری سرشمع در تراز بستر رخ می دهد ($Z/T_p=-1$) و با قرار گیری تراز کارگذاری سرشمع به تراز پایین تر ($Z/T_p=-2$) از بستر بیشینه

می کند و این امر باعث کاهش عمق آبستگي در اطراف گروه پایه کج می گردد.



شکل ۱۰- گودال آبستگي اطراف گروه پایه کج با تراز کارگذاری سرشمع مختلف

در این شکل نیز واضح است که میزان آبستگي و گودال فرسایش در شرایطی که تراز کارگذاری سرشمع هم تراز با بستر و در زیر بستر قرار گرفته به ترتیب بیشترین و کمترین مقدار را به خود اختصاص داده اند. در شکل (۱۱) مقایسه نیم رخ طولی نهایی آبستگي در ترازهای مختلف کارگذاری سرشمع ارائه شده است.



شکل ۱۱- نیم رخ طولی نهایی آبستگي در ترازهای مختلف کارگذاری سرشمع

الف) بالاتر از بستر ($Z/T_p=0$)، ب) هم تراز بستر ($Z/T_p=-1$)، ج) پایین تر از بستر ($Z/T_p=-2$)

مقایسه نتایج بیشینه عمق آبستگي در تراز کارگذاری مختلف سرشمع حاکی از آن است که در شرایط کارگذاری یکسان، بیشترین کاهش

۹- برای حالتی که سرشمع بالاتر از بستر بوده ($Z/T_p=0$) ضخامت سرشمع همانند طوقه عمل کرده و مانع از برخورد مستقیم گردابه‌ها به بستر رسوبی می‌گردد و باعث می‌شود که نسبت به شرایط هم‌ترازی سرشمع با بستر، چاله و عمق آبستگي کمتری ایجاد گردد. در شرایط قرارگیری سرشمع پایین‌تر از بستر ($Z/T_p=-2$) نیز به علت فاصله‌ی زیاد فضای زیر شمع با بستر جریان و کاهش قدرت نفوذی و گردابه‌های جریان به فضای زیر سرشمع مقدار فرسایش و آبستگي در فضای زیر سرشمع نسبت به دو تراز کارگذاری سرشمع دیگر کمتر باشد.

۱۰- با مقایسه نیم‌رخ طولی نهایی آبستگي در ترازهای مختلف کارگذاری سرشمع مشاهده گردید که در شرایط کارگذاری یکسان، بیشترین کاهش عمق آبستگي برای شکل هندسی حالت دوکی شکل شمع‌ها اتفاق می‌افتد و هر چه دماغه شمع آئرویدینامیکی و تیز باشد در کنترل گردابه‌های جریان بهتر عمل می‌کند و این امر باعث کاهش عمق آبستگي می‌گردد. همچنین در شرایط تراز کارگذاری سرشمع بصورت هم‌ترازی با بستر به علت تاثیر بیشتر و قدرت نفوذ بیشتر جریان به فضای زیر سرشمع و به طبع آن قدرت فرسایشی بالا مقدار حداکثر عمق آبستگي در این تراز اتفاق می‌افتد.

ملاحظات اخلاقی پیروی از اصول اخلاق پژوهش

همکاری مشارکت‌کنندگان در تحقیق حاضر به صورت داوطلبانه و با رضایت آنان بوده است.

حامی مالی

هزینه تحقیق حاضر توسط نویسندگان مقاله تامین شده است.

مشارکت نویسندگان

طراحی و ایده‌پردازی: رامتین صبح خیز فومنی، علیرضا مردوخ پور
روش‌شناسی و تحلیل داده‌ها: رامتین صبح خیز فومنی، علیرضا مردوخ پور
نظارت و نگارش نهایی: رامتین صبح خیز فومنی.

تعارض منافع

بنابر اظهار نویسندگان، مقاله حاضر فاقد هرگونه تعارض منافع بوده است.

References

1. Rahimi E, Qaderi K, Rahimpour M, Ahmadi M. 2018. Effect of Debris on Piers Group Scour: Experimental Study. *KSCE Journal of Civil Eng*, 22(4):1496-1505.
2. Yazdani A, Hoseini K, Karami H. 2019. Investigation of Scouring of Rectangular Abutment in a Compound Channel Under

تنش برشی کاهش می‌یابد. علت این امر می‌تواند ناشی از افزایش فاصله بین گروه پایه‌ها باشد بطوریکه وجود پایه دوم باعث کاهش الگوی جریان تشکیل شده در گروه پایه شده و عملکرد گروه پایه بصورت دو پایه مستقل در تشکیل الگوی جریان رفتار می‌کنند.

۵- کاهش تنش برشی در شرایط کارگذاری سرشمع در تراز بالاتر از بستر هم صادق می‌باشد. علت آن به دلیل است که در تراز کارگذاری سرشمع در شرایط بالاتر از بستر ($Z/T_p=0$) ضخامت سرشمع همانند طوقه عمل کرده و مانع از برخورد مستقیم گردابه‌ها به بستر رسوبی می‌گردد

۶- با بررسی پروفیل طولی آبستگي اطراف گروه پایه کج با شکل هندسی مختلف شمع‌ها، مشاهده شد که شمع دوکی شکل نسبت به سایر شکل شمع‌ها اثر بهتری در کاهش آبستگي از خود نشان می‌دهد. بطوریکه حداکثر عمق آبستگي ایجاد شده در اطراف گروه پایه کج با حضور شمع دوکی شکل $3/36$ سانتی‌متر بوده این در حالی است که برای شمع‌های استوانه‌ای، مستطیلی و مستطیلی گرد گوشه حداکثر عمق آبستگي به ترتیب $4/18$ ، $3/91$ ، $3/59$ سانتی‌متر می‌باشد. علت نقش موثرتر شکل دوکی شکل در کاهش آبستگي می‌تواند ناشی از نوع شکل هندسی آن در کاهش گردابه‌های برخاستگی باشد.

۷- نمودار ستونی درصد کاهش حداکثر عمق آبستگي با حضور شمع‌ها و شکل‌های هندسی متفاوت نسبت به شمع استوانه‌ای نشان داد که با تغییر شکل هندسی شمع‌های زیر گروه پایه کج از حالت استوانه‌ای به شکل‌های دوکی شکل، مستطیلی گرد گوشه و مستطیلی باعث کاهش ابعاد چاله و حداکثر عمق آبستگي شده بطوریکه به ترتیب موجب $19/61$ ، $14/11$ و $6/45$ درصد حداکثر عمق آبستگي کاهش پیدا می‌کند.

۸- در بین شرایط کارگذاری سرشمع بیشترین مقدار آبستگي در حالتی که سرشمع هم‌تراز با بستر می‌باشد ($Z/T_p=-1$) اتفاق می‌افتد. در این شرایط به تدریج با خالی شدن فضای زیر سر شمع، بخشی از جریان به این بخش نفوذ کرده و باعث فرسایش و آبستگي اطراف گروه شمع‌ها می‌گردد. نکته قابل ذکر اینکه در این حالت تاثیر شکل هندسی گروه شمع‌ها بر کاهش آبستگي و فرسایش زیر سرشمع موثر بوده بطوریکه در شرایط یکسان کارگذاری سرشمع، کمترین چاله و بخش فرسایشی زیر سرشمع در شکل دوکی شمع‌ها اتفاق می‌افتد.

Unsteady Flow, *Amirkabir Journal of Civil Engineering*

3. Fathi A, Zomorodian A. 2018. Effect of Submerged Vanes on Scour around a Bridge Abutment. *KSCE Journal of Civil Eng*, 22(7): 2281-2289
4. Hosseini S., Esmaili Varki M, Fazl Oli R. 2014. Laboratory study of scouring around inclined base group located on pile group, 13th Iran Hydraulic

- Conference, University of Tabriz [In Persian].
5. Valizadeh R , Arman A.2019. 3D Numerical Simulation of Shear Stress in Rectangular Compound Channel using Ansys Fluent Model, Irrigation and Drainage Structures Engineering Research, 20: 77-94.
 6. Hashemi M, Zomorodian M, Alishahi M. 2019. Simulation of Turbulent Flow Around Tandem Piers, Iranian Journal of Science and Technology - Transactions of Civil Engineering, 43 :761-768.
 7. Rajabizadeh, Ayubzadeh AS, Ghaderi K. 2020. Laboratory study of the effect of circular collar on scour of the base of a cylindrical bridge in unstable flow, Amirkabir Civil Journal, 10.22060 / CEEJ.2019.17078.6460 [In Persian].
 8. Eghbalnik L, Vafeqi M, Golbahar M. 2019. Influence of flow conditions on the dimensions of the scour cavity around the base group of 6 sloping and perpendicular bridges on the flow direction in the 180 degree arc channel. Journal of Civil Engineering Tarbiat Modares. 19 (4) [In Persian].
 9. Karimi M, Ghaderi K, Rahimpour M, Ahmadi M. 2020. Laboratory study of the effect of the arrangement of submerged flat plates on scour around the foundations and supports of the bridge, Amirkabir Civil Journal, 10.22060 / CEEJ.2020.17729.6654 [In Persian].
 10. Keshavarzi A, Shrestha C. Zahedani M, Ball J, Khabbaz H . 2018. Experimental study of flow structure around two in-line bridge piers, Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Water Management, Vol17(1): 311-327
 11. Osrush M , Hosseini A Kamanbedast A .2019. Evaluation and comparison of the slots and collars performance in reducing scouring around bridge abutments, Amirkabir Journal of Civil Engineering
 12. Taheri Z , Ghomeshi M .2019. Experimental study of the effect of netted collar position on scour depth around of oblong-shape bridge pier, Amirkabir Journal of Civil Engineering, 51: 81-82.
 13. Qasemzadeh F, Kuchakzadeh P. 2015. Simulation of hydraulic problems in FLOW-3D. Innovative Publishing Publications. Tehran. Iran [In Persian].
 14. Hedayatifar M, Purlak M. 2014. Simulation of fluid dynamics with FLOW-3D. Atinger Publications. Tehran. Iran [In Persian].
 15. Marousi M., Roshan, R., and Sarkardeh, H. 2014. Analysis and design with Flow-3D software, Fadak Isatis Publications, first edition, Tehran, Iran [In Persian].
 16. Esmaili Varaki M, Saadati Pache Kanari S. 2015. Laboratory study of the effect of foundation angle on the foundation on the amount of scour around the bridge pier ", Journal of Water and Soil Knowledge, 25 (4): 27-39 [In Persian]
 17. Hosseini S., Esmaili Varaki M, Fazl Oli R. 2016. Laboratory study of scouring around a sloping base located on a pile group ", Journal of Soil and Water Knowledge, 25 (4): 135-147 [In Persian].
 18. Sadat Jafari M. and Ayubzadeh A., Esmaili Varaki M., Rostami M. 2016. Simulation of flow pattern around inclined base group using Flow-3D numerical model ", Journal of Water and Soil, 30 (6): 1860-1873 [In Persian].
 19. Kardan N, Hassanpour N , Hoseinzade-Dalir H . 2018. Experimental and Numerical Investigation of Bed Erosion around Bridge Piers with Different Cross-Sections, Irrigation and Drainage Structures Engineering Research, 19: 19-36.

