

## Research Paper

# Numerical Simulation of Two-Phase Transient Flow Around Two Side-By-Side Circular Cylinders and Select Appropriate Turbulence Model Based on Vortex Shedding Frequency

Abolfazl Aslani-Kordkandi<sup>1\*</sup>, Meysam Bayati<sup>2</sup>, Feraydoon Vafaei<sup>3</sup>, Aref Farhangmehr<sup>4</sup>

1. Department of Engineering, Payame Noor University (PNU), P.O. Box 19395-4697, Tehran, Iran

2. Former M.Sc. Student of Marine Structures, K.N. Toosi University of Technology, Tehran, Iran

3. Associate Prof. of Marine Structures, Department of Civil Engineering, K.N. Toosi University of Technology, Tehran, Iran

4. Former M.Sc. Student of Marine Structures, K.N. Toosi University of Technology, Tehran, Iran

Received: 2020/12/02

Revised: 2021/03/09

Accepted: 2021/07/30

Use your device to scan and read the article online



DOI:

10.30495/wej.2023.23442.2215

### Keywords:

Numerical Simulation of two-phase transient flow around two side-by-side circular cylinders

### Abstract

**Introduction:** Nowadays, scouring is one of the important issues in river engineering as well as coastal engineering. Based on the results of the investigations, the destruction of most of the bridges built in the rivers is due to scouring around piers. For this reason, it has been the subject of many researches conducted in recent years.

Investigation of the flow pattern around the piers gives a more accurate understanding and vision for scouring prediction.

**Methods:** The flow pattern around two side-by-side circular cylinder with various gaps are investigated numerically in current study. The numerical calculations are carried out on quadrilateral mesh which is finer close to the cylinders vicinity in order to provide better description of boundary layer and gradually become coarser further places. In term of simulation of the free surface effect, the volume of fluid (VOF) method used. In this simulation based on the frequency of vortex shedding and Strouhal number. After selecting appropriate turbulence model (RNG  $k - \epsilon$ ) the value of velocity, turbulence and bed shear stress reported.

**Findings:** The results show that by reducing the gap between two cylinders, the velocity in middle of cylinders increases and the maximum velocity observed in  $G/D=1.5$  while for smaller gaps ( $G/D<1.5$ ) the velocity decreases due to blockage. In case of two side-by-side cylinders turbulence intensity in the middle of channel is higher than in bed which represent the significant impact of vortices. However, in case of single cylinder turbulence intensity in the bed of channel is higher than those of in middle which represent the significant impact of bed on turbulence intensity.

**Citation:** Aslani-Kordkandi A, Bayati M, Vafaei F, Farhangmehr A. Numerical Simulation of Two-Phase Transient Flow Around Two Side-By-Side Circular Cylinders and Select Appropriate Turbulence Model Based on Vortex Shedding Frequency. Water Resources Engineering Journal. 2023; 15(55): 1- 18.

\***Corresponding author:** Abolfazl Aslani-Kordkandi

**Address:** Department of Engineering, Payame Noor University (PNU), P.O. Box 19395-4697, Tehran, Iran

**Tell:** +989149866196

**Email:** a.aslani@pnu.ac.ir

## Extended Abstract

### Introduction

Nowadays, scouring is one of the important issues in river engineering as well as coastal engineering. Based on the results of the investigations, the destruction of most of the bridges built in the rivers is due to scouring around piers. For this reason, it has been the subject of many researches conducted in recent years. Factors such as the narrowing of the flow path and the creation of eddy currents around the piers cause local scouring of sediments around the piers. The dominant form of flow near a pier is a vortex system, which develops around the piers and forms the main scouring mechanism. The main components of this system are downflow, horseshoe vortex and wake vortices. Investigation of the flow pattern around the piers gives a more accurate understanding and vision for scouring prediction and determining the depth of erosion in the vicinity of the piers.

### Materials and Methods

The topic of investigating the flow pattern around the group of piers, despite its many applications in engineering problems, has not been numerically researched. In the present study, we investigate the flow patterns around two side-by-side piers with different distances using Fluent software. In this modeling, based on the vortex formation frequency and Strouhal number, the turbulence model and appropriate meshing size have been selected. Also, in this two-phase weather and climate modeling, the volume of fluid (VOF) method has been used to consider the effect of the free surface. The quality of the effect of choosing the appropriate turbulence model in a new way was carried out in the form of examining the velocity values, turbulence values and bed shear stress. The solution domain for the case of two side-by-side cylinders is a rectangular channel with a length of 12 m, a width of 1.26 m, a height of 0.5 m and a water depth of 0.32 m, with walls and a rigid bed that has two piers with a diameter of 9.1 cm

with the distance between the piers,  $G/D = 1, 1.5, 2, 2.5$  and 3 ( $G$  is the distance between the inner edge of two cylindrical piers) at a distance of 8 m from the upstream of the channel. The Reynolds number of the flow is about  $10^5$  and the Froude number is 0.2, which indicates the turbulent and subcritical flow regime. Considering that the flow of the current study is in a fully turbulent state, the change in the Reynolds number will have little effect on the results. Therefore, the effect of Reynolds number changes was not investigated in this study, and by presenting important turbulence parameters such as shear stress and flow turbulence energy in a fully turbulent flow, the effect of the presence of piers in front of the flow was investigated. In this study, the ratio of the average velocity to the threshold velocity of the movement of bed particles is considered to be around 0.95, and the flow upstream of the piers is close to critical conditions for the movement of sediment particles.

### Findings

In this research, the turbulence models available in the software were examined and it was found that the RNG  $k-\epsilon$  model provides better results than other models. As the flow approaches the piers, the velocity of the flow has increased due to the narrowing of the flow channel on the sides of the cylinders. The average velocity around the piers has not increased much compared to the single pier, but the disturbance inside the group piers have increased up to three times. The eddies have less expansion in the lower levels and more expansion in the middle and upper levels, which indicates the increase in the strength of the eddies as they move away from the bed. This difference in the strength of the vortex in the depth is one of the factors that create the pressure gradient in the depth and the separation of sediment particles into the flow downstream of the cylinder. In the area between the two cylinders, due to the increase in velocity, the

shear stress of the bed and its extent have increased. As the flow approaches the area between the two cylinders, an increase in speed can be seen, especially in the upper levels. Of course, it should be mentioned that this increase in velocity occurs after passing through the cylinder due to the presence of vortices, which themselves act as an obstacle.

### Discussion

This study was carried out in clear water conditions and taking into account the constant roughness of the bed. In this study, only circular cylindrical piers with a fixed diameter and perpendicular to the channel bed were used, and the effect of changes in the shape and size and installation angle of the piers was not investigated. To clarify the details of the flow, it is necessary to simulate the flow in the mobile and erodible bed until the formation of the final equilibrium hole. In the condition of the mobile bed, the simultaneous solution of the flow and sediment equations is done by the model. If the bed is erodible and scouring around the piers is allowed, the formed scour hole will attract the flow near the bed towards itself. By increasing the dimensions of the hole, the velocities and disturbances near the bed will increase. In fact, the combination of velocity components will increase the downward velocity in front of the piers, and as a result, stronger horseshoe vortices are created and move to the sides of the piers. A stronger vortex shedding will occur behind the pier and around the scouring hole. Due to the contraction of the flow, stronger horseshoe vortices are formed between the two piers inside the hole compared to the outside of the piers.

### Conclusion

Quantitatively and qualitatively, the results of the numerical simulation show a good

agreement with the laboratory results. In the case of two side-by-side cylinders, the turbulence values in the middle height are higher than the values near the bed (on the sides and downstream of piers) which shows the greater effect of eddies on the turbulence values. While in the case of a single cylinder, the turbulence values near the bed are higher than the turbulence values at the middle height. which can indicate the greater influence of the bed on the turbulence values. As the distance between the cylinders decreases, the velocity values in the center of the cylinder increase, and the maximum velocity value is at  $G/D = 1.5$  has occurred, while for  $G/D > 1.5$ , the velocity value has decreased due to the confinement of the flow. The highest amounts of turbulence in the case of two cylinders side by side occurred in the downstream of the cylinder and at  $G/D = 2$ . In general, it can be said that as the distance between the piers increases, the interaction of two piers on the flow pattern disappears, and each pier acts independently. When the piers are too close, two piers act like one pier with a larger diameter.

### 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

Each author contributed to all sections of this article.

### Conflicts of interest

The authors declared no conflict of interest.

## مقاله پژوهشی

## شبیه سازی عددی جریان غیردائم دوفازی اطراف دو استوانه دایره‌ای کنارهم و انتخاب مدل آشفتگی بر اساس فرکانس تشکیل گردابه

ابوالفضل اصلانی کردکندی<sup>۱\*</sup>، میثم بیاتی<sup>۲</sup>، فریدون وفايي<sup>۳</sup>، عارف فرهنگ مهر<sup>۴</sup>

۱. گروه فنی و مهندسی، دانشگاه پیام نور، تهران، ایران
۲. کارشناس ارشد سازه های دریایی، گروه مهندسی عمران، دانشگاه خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، ایران
۳. دانشیار سازه های دریایی، گروه مهندسی عمران، دانشگاه خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، ایران
۴. کارشناس ارشد سازه های دریایی، گروه مهندسی عمران، دانشگاه خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، ایران

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۰۹/۱۲

تاریخ داوری: ۱۳۹۹/۱۲/۱۹

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۵/۰۸

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



DOI:

10.30495/wej.2023.23442.2215

## واژه‌های کلیدی:

آشفتگی، استوانه کنار هم، الگوی جریان، حجم سیال، گردابه.

## چکیده

**مقدمه:** امروزه آبشستگی یکی از مسائل مهم در مهندسی رودخانه و همچنین مهندسی سواحل می‌باشد. آبشستگی نوعی فرسایش است که در اثر جریان آب در اطراف پایه‌ها به وجود می‌آید. بر اساس نتایج تحقیقات انجام شده، تخریب اکثر پل‌هایی که در رودخانه‌ها بنا شده‌اند به علت آبشستگی بوده است. برای تعیین عمق آبشستگی در مجاورت پایه نیاز به شناخت کافی این پدیده و الگوی جریان اطراف آن بوده تا با توجه به آن، روش مناسب برای تخمین عمق آبشستگی، مشخص گردد.

**روش:** در پژوهش حاضر به موضوع الگو و رفتار جریان اطراف دو استوانه کنار هم با فواصل مختلف در قالب یک مطالعه عددی پرداخته شده است. محاسبات عددی بر روی مش‌های مربعی که در نزدیکی استوانه‌ها به منظور تأمین لایه مرزی ریزتر و به تدریج در فواصل دورتر درشت‌تر شده‌اند انجام شده است. در این مدل‌سازی دو فازی آب و هوا برای لحاظ نمودن اثر سطح آزاد، از روش حجم سیال (VOF) استفاده شده است. در این مدل‌سازی بر اساس فرکانس تشکیل گردابه و عدد استروهل مدل آشفتگی و اندازه مش بندی مناسب انتخاب شده است. پس از انتخاب مدل آشفتگی مناسب (مدل  $k-\epsilon$  RNG) به بررسی مقادیر سرعت، مقادیر آشفتگی و تنش برشی بستر و مقایسه‌ی آن با نتایج آزمایشگاهی پرداخته شد.

**یافته‌ها:** مقایسه نتایج نشان می‌دهد که مطابقت خوبی بین نتایج عددی و آزمایشگاهی وجود دارد. نتایج نشان می‌دهد که با کم شدن فاصله بین استوانه‌ها مقادیر سرعت در مرکز استوانه افزایش پیدا کرده که بیشترین مقدار سرعت در  $G/D$  (نسبت فاصله لبه‌های داخلی دو پایه به قطر پایه) برابر  $1/5$  اتفاق افتاده است در حالی که برای فواصل  $G/D < 1/5$  مقدار سرعت به دلیل حبس شدگی جریان کاهش پیدا کرده است. در حالت دو استوانه کنار هم مقادیر آشفتگی در ارتفاع میانی بیشتر از مقادیر نزدیک بستر است که نشان دهنده تأثیر بیشتر گردابه‌ها بر مقادیر آشفتگی می‌باشد. در حالی که در حالت تک استوانه مقادیر آشفتگی نزدیک بستر بیشتر از مقادیر آشفتگی در ارتفاع میانی می‌باشد. که می‌تواند نشان دهنده تأثیر بیشتر بستر بر مقادیر آشفتگی باشد.

**نتیجه‌گیری:** به لحاظ کمی و کیفی نتایج شبیه سازی عددی تطابق خوبی با نتایج آزمایشگاهی نشان می‌دهد. در حالت دو استوانه کنار هم مقادیر آشفتگی در ارتفاع میانی بیشتر از مقادیر نزدیک بستر است (بیشتر در قسمت کنارها و پایین دست پایه‌ها) که نشان دهنده تأثیر بیشتر گردابه‌ها بر مقادیر آشفتگی می‌باشد.

\* نویسنده مسئول: ابوالفضل اصلانی کردکندی

نشانی: گروه فنی و مهندسی، دانشگاه پیام نور، تهران، ایران - صندوق پستی ۱۹۳۹۵-۳۶۹

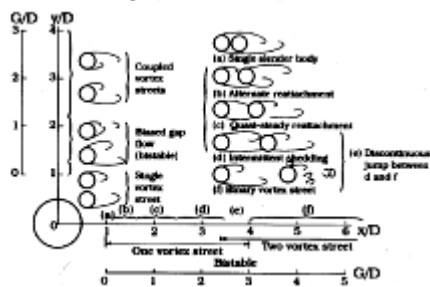
تلفن: ۰۹۱۴۹۸۶۶۱۹۶

پست الکترونیکی: a.aslani@pnu.ac.ir

## مقدمه

امروزه آبستتگی یکی از مسائل مهم در مهندسی رودخانه و همچنین مهندسی سواحل می‌باشد. آبستتگی نوعی فرسایش است که در اثر جریان آب در اطراف پایه‌ها به وجود می‌آید. بر اساس نتایج تحقیقات انجام شده، تخریب اکثر پل‌هایی که در رودخانه‌ها بنا شده‌اند به علت آبستتگی بوده است و به همین دلیل، موضوع بسیاری از تحقیقات انجام شده در سال‌های اخیر قرار گرفته است. عواملی نظیر تنگ‌شدگی مسیر جریان و ایجاد جریان‌های گردابه‌ای در اطراف پایه‌ها موجب آبستتگی موضعی ذرات در اطراف پایه می‌شود. شکل غالب جریان در نزدیک یک استوانه سیستم گردابه‌ای است، که در اطراف پایه توسعه یافته و مکانیزم اصلی آبستتگی را تشکیل می‌دهد. اجزاء اصلی این سیستم، جریان روبه پایین، گردابه نعل اسبی و گردابه‌های برخاستگی می‌باشند. برای تعیین عمق آبستتگی در مجاورت پایه نیاز به شناخت کافی این پدیده و الگوی جریان اطراف آن بوده تا با توجه به آن، روش مناسب برای تخمین عمق آبستتگی، مشخص گردد. الگوی جریان اطراف تک پایه توسط محققین متعددی بررسی گردیده است. ملویل و رادکیوی (۱۵) آزمایش‌هایی جهت بررسی مشخصات جریان اطراف پایه انجام دادند. آزمایش‌ها در سه بخش بستر زبر مسطح، آبستتگی میانی و آبستتگی تعادلی نهایی انجام شد. مقایسه نتایج بدست آمده از نمودارهای تنش برشی و شدت آشفتگی، نشان می‌دهد که تنش برشی بزرگتر در جایی که شدت آشفتگی کم باشد رخ می‌دهد (و بالعکس). براساس اندازه‌گیری‌های انجام شده از شدت آشفتگی، حفره آبستتگی میانی بیشترین مقادیر شدت آشفتگی را در قسمت بالادست داشت. درگاهی (۱۲) میدان جریان حول یک استوانه دایره‌ای که روی بستر مسطح قرار گرفته بود را مورد بررسی قرار داد. بر اساس این مطالعه مهمترین ویژگی جریان بالادست پایه، جدایی سه بعدی لایه مرزی جریان می‌باشد. میدان جریان در ناحیه جدا شده با گردابه‌های نعل اسبی که به صورت شبه پرپودیکی ریزش می‌کنند توصیف می‌شوند که این گردابه‌ها مستقل از گردابه‌های برخاستگی عمل می‌کنند. تعداد این گردابه‌ها به عدد رینولدز بستگی دارد اما اندازه این گردابه‌ها مستقل از عدد رینولدز بوده و به قطر پایه بستگی دارد. با افزایش عدد رینولدز سطح جداشدگی در بالادست از پایه دورتر می‌شود. نقطه جدایی نزدیک بستر تحت تأثیر بستر واقع می‌شود و تا حدودی به طرف پایین دست منتقل می‌شود. احمد و راجاراتنام (۶) آزمایش‌هایی روی جریان عبوری از یک استوانه مدور واقع در بسترهای صاف، زبر و متحرک انجام دادند. بر اساس نتایج بدست آمده برای بستر متحرک، بستر صلب و زبر، پروفیل سرعت در جهت جریان در بالادست پایه با قانون لگاریتمی مطابقت دارد در حالی که با نزدیک شدن به استوانه و با ظاهر شدن برخاستگی، این انطباق ضعیف می‌شود. برای بستر صاف این اثر کمتر بوده است. پروفیل‌های سرعت متوسط نشان می‌دهد که جریان نزدیک پایه کند شده و اثر پایه بر روی جریان تا فاصله  $2/5D$  در بالادست مشهود است. احمد و راجاراتنام (۷) نتایج بررسی آزمایشگاهی روی جریان سه بعدی کج شده اطراف کناره پل را ارائه دادند. بر اساس نتایج بدست آمده، پروفیل‌های سرعت در سطح تقارن فقط نزدیک بستر با قانون لگاریتمی تطابق دارند. تنش برشی بستر نزدیک گوشه بالادست کناره پل در حدود

۳/۶۳ برابر افزایش داشته است. سرکار (۱۷) آزمایشاتی جهت محاسبه ناحیه آشفته (ناحیه متأثر از حضور پایه) انجام داد. در این مطالعه آزمایشات در یک فلوم به طول  $16/1m$ ، عرض  $0/9m$ ، و ارتفاع  $0/72m$  روی لوله‌های فولادی استوانه‌ای به قطرهای  $33$ ،  $60$  و  $89$  میلی‌متر واقع شده روی بستر ماسه‌ای با قطر ذرات در حد مجاز  $2 - mm$  انجام شد.  $d_{50} = 0/8 mm$  انجام شد. وزن مخصوص ذرات رسوب  $2/64$  و انحراف معیار هندسی آن برابر  $1/2$  بود. دو نوع ADV با ردیاب رو به پایین و رو به پهلو برای اندازه‌گیری سرعت‌های سه‌بعدی استفاده شده بودند. آزمایش‌ها تحت شرایط آب صاف انجام شده بودند. آزمایشات تحت دو نوع جریان عادی با عمق‌های مختلف  $250$ ،  $300$  و  $300$  میلی‌متر و ترکیب موج و جریان با دو عمق  $200$  و  $300$  میلی‌متر انجام شد. سرعت جریان نزدیک شونده بین  $0/1$  و  $0/24$  متغیر بود و ارتفاع موج در این آزمایش  $300mm$  در نظر گرفته شده بود. در این مطالعه روابطی ارائه داد که در آن نسبت فاصله آخرین نقطه آشفتگی به قطر پایه را به سرعت متوسط جریان مرتبط ساخت. در تمامی این روابط که برای بالادست، پایین‌دست و کناره‌های پایه در نظر گرفته شده بود به غیر از جریان ترکیبی بالادست، با افزایش سرعت متوسط جریان، نسبت فاصله آخرین نقطه آشفتگی به قطر پایه کاهش می‌یافت. باروحیا و دی (۹) میدان جریان سه بعدی در یک حفره آبستتگی اطراف نیم‌پایه‌های کناره پل با شکل‌های مختلف و تحت رژیم آب صاف را با استفاده از دستگاه ADV با ردیاب رو به پایین اندازه‌گیری کردند. آزمایشات در کانالی به طول  $20m$ ، عرض  $0/9m$  و عمق  $0/7m$  انجام شد. نتایج آزمایشات نشان می‌دهد در بالادست پایه در تمامی مقاطع وجود جریان رو به پایین و گردابه‌های نعل‌اسبی محسوس است. در پایین دست پایه اساساً میدان جریان به خاطر جدایی جریان معکوس می‌شود. همچنین تعدادی از محققین به بررسی الگوی جریان اطراف گروه پایه پرداخته‌اند. زراوکویچ (۲۰) اثر متقابل گردابه‌های بلندشونده در گروه پایه دوتایی تحت تأثیر جریان دوبعدی را مورد بررسی قرار داد. شکل یک تصویر کامل از رژیم‌های جریان در مورد گروه پایه دوتایی را نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل مشاهده می‌شود، در مورد گروه پایه دوتایی عمود بر جهت جریان وقتی که  $G/D < 0/25$  که در آن  $G$  فاصله لبه‌های داخلی دو پایه و  $D$  قطر پایه می‌باشد (باشد دو پایه بصورت تک پایه عمل می‌کند، بنابراین جریان بصورت رژیم جریان تک گردابی می‌باشد. با افزایش فاصله بین پایه‌ها جریان از بین دو پایه وجود داشته و جریان بصورت رژیم جریان گردابی کوپل می‌باشد. فقط بعد از اینکه  $G/D$  به مقدار بزرگتر از حدود  $3$  می‌رسد، گرداب‌های ایجاد شده در اطراف هر یک از پایه‌ها جدا از هم می‌باشند.



شکل ۱- رژیم‌های جریان متداخل برای گروه پایه دوتایی (۲۰).

درصد گزارش شده است. قدسی و خانجانی (۳) به بررسی آبستگي موضعی اطراف پایه مرکب پل پرداختند. نتایج آزمایش‌های آن‌ها نشان داد که با افزایش ضخامت سرشمع، ارتفاع سرشمع که در آن بستر اطراف سرشمع شسته شده و گروه شمع در معرض جریان قرار می‌گیرند، کاهش می‌یابد.

حمیدی و سیادت موسوی (۱۳) از مدل عددی SSIIM برای حل معادلات ناویر استوکس برای معادلات انتقال جریان و بستر اطراف دو پایه کنار هم استفاده کردند. نتایج شبیه‌سازی نشان دهنده افزایش سرعت افقی و عمودی بین پایه‌ها بود. دو مدل آشفتگی  $k-\epsilon$  و  $k-\omega$  برای محاسبه لزجت گردابی میدان جریان استفاده شد. نتایج نشان داد که مدل آشفتگی  $k-\epsilon$  عملکرد بهتری نسبت به مدل آشفتگی  $k-\omega$  دارد. شبیه‌سازی عددی اطراف حفره آبستگي با استفاده از نرم افزار فلوئنت توسط چانگ و همکاران (۱۱) انجام شد. آنها نتایج عددی برای سرعت متوسط را مطابق با نتایج آزمایشگاهی بدست آوردند اما شدت آشفتگی و تنش رینولدز را تا حدی بیشتر از مقادیر آزمایشگاهی شبیه‌سازی کردند. بهروزی و همکاران (۱۰) تغییرات سرعت جریان و انرژی جنبشی آشفته اطراف تک پایه و گروه پایه‌های دوتایی دایروی، در سه حالت پشت سر هم، کنار هم و زاویه‌دار نسبت به جهت جریان را با استفاده از نرم‌افزار فلوئنت به صورت دو فازی شبیه‌سازی کردند. نتایج مدل‌سازی تطابق خوبی با نتایج آزمایشگاهی عطایی آشتیانی و اصلائی کردکندی (۴) نشان داد. موضوع بررسی الگوی جریان در اطراف گروه پایه‌ها علی‌رغم کاربرد فراوان در مسائل مهندسی کمتر به صورت عددی مورد تحقیق قرار گرفته است. هدف از پژوهش حاضر بررسی الگوهای جریان اطراف دو پایه کنارهم با فواصل مختلف با استفاده از نرم‌افزار Fluent می‌باشد. در این مدل‌سازی بر اساس فرکانس تشکیل گردابه و عدد استروهل مدل آشفتگی و اندازه مش بندی مناسب انتخاب شده است. همچنین در این مدل‌سازی دو فازی آب و هوا برای لحاظ نمودن اثر سطح آزاد، از روش حجم سیال (VOF) استفاده شده است. کیفیت اثر انتخاب مدل آشفتگی مناسب به شیوه جدید در قالب بررسی مقادیر سرعت، مقادیر آشفتگی و تنش‌برشی بستر و مقایسه آن با نتایج آزمایشگاهی عطایی آشتیانی و اصلائی کردکندی (۴) انجام گردید.

### معادلات حاکم بر جریان

معادلات پایه حاکم بر سیالات که به معادلات ناویر استوکس معروفند، عبارتند از معادلات پیوستگی، مومنتم و انرژی. این معادلات برای سیال با نماد تانسوری بصورت زیر بیان می‌شوند:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial \rho}{\partial t} (\rho u_i) = 0 \quad (1)$$

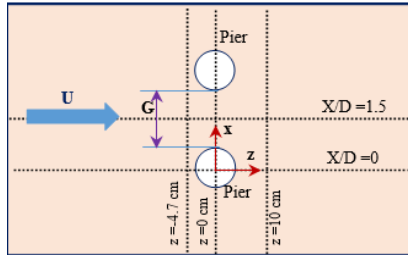
$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \nu \frac{\partial^2 u_i}{\partial x_j \partial x_j} \quad (2)$$

معادلات ناویر استوکس در شکل فعلی برای جریان‌های آشفته کاربردی، قابل حل نیستند. بنابراین رینولدز، مقادیر لحظه‌ای سرعت  $u_i$

آبستگي در گروه پایه‌های دوتایی در شرایط جریان دائم و آب صاف توسط حناح (۱۴) مورد مطالعه قرار گرفت. رسوب استفاده شده در این آزمایش با قطر متوسط  $0.75 \text{ mm}$ ، قطر پایه  $3/3 \text{ cm}$ ، سرعت جریان برابر  $28/5 \text{ cm/s}$  و عمق جریان برابر  $14 \text{ cm}$  در نظر گرفته شد. نتایج آزمایشات برای مدت زمان آبستگي ۷ ساعته که در آن  $80\%$  عمق تعادل آبستگي به دست آمده بود ارائه شد. بر اساس نتایج بدست آمده از این آزمایش‌ها، برای گروه پایه دوتایی عمود بر جهت جریان، وقتی که فاصله بین پایه‌ها بزرگتر از  $10D$  باشد، اثر متقابل هر دو پایه روی حداکثر عمق آبستگي از بین می‌رود. اگر فاصله بین پایه‌ها خیلی کوچک باشد ( $G/D < 1/5$ )، هر دو پایه روی همدیگر همان اثر تک پایه با قطر  $2D$  را دارند. عمق آبستگي برای فواصل کم بین پایه‌ها تا حدود دو برابر عمق آبستگي در تک پایه تحت شرایط یکسان بوده است. سامر و فردوس (۱۸) سرعت‌های متوسط و آشفتگی جریان عبوری از ۶ نوع گروه پایه را در ارتفاع  $14/5 \text{ cm}$  از بستر اندازه‌گیری کردند. براساس نتایج آن‌ها سرعت متوسط در اطراف گروه پایه افزایش زیادی نسبت به تک پایه نداشته است و حتی در مقاطع بین پایه‌های پایین دست این سرعت کاهش یافته است. اما آشفتگی درون گروه پایه‌ها تا حدود سه برابر افزایش داشته است. این آشفتگی اکثراً توسط گردابه برخاستگی پایه‌ها در مقاطع بالادست بوده است. به عقیده این محققین، هرچند که اندازه‌گیری‌ها در نزدیک بستر انجام نشده است، می‌توان انتظار داشت که آشفتگی تولید شده توسط پایه‌های بالادست متأثر از گردابه‌های نعل‌اسبی در سطوح نزدیک بستر نیز باشد.

اکیلی و همکاران (۸) جریان اطراف دو استوانه و سه استوانه که در کنار هم قرار گرفته‌اند، بررسی نمودند. فاصله بین استوانه‌ها  $G/D = 1-3$  می‌باشد. برای حالت دو استوانه کنار هم ساختار جریان پشت استوانه‌ها در منطقه بین آن‌ها بصورت نامتقارن و به شکل جت می‌باشد. جریان جت مانند، تمایل به تغییر شکل به سمت ناحیه برخاستگی‌های باریک دارد که دارای فرکانس بالاتری می‌باشد. در حالت  $G/D = 1$  دو پایه مانند تک پایه عمل می‌کنند. با افزایش فاصله، گردابه‌ها از هم فاصله گرفته و در فاصله  $G/D = 2/5$  گردابه‌های مجزا تشکیل می‌شوند. اصلائی کردکندی و آشتیانی (۱) به بررسی آزمایشگاهی الگوی جریان آب در اطراف گروه پایه‌های دوتایی با فاصله مرکز تا مرکز  $3D$  (قطر پایه) در دو حالت قرارگیری پایه‌ها به صورت متوالی و کنارهم و همچنین در دو حالت بستر مسطح و تشکیل حفره تعادل آبستگي پرداختند. نتایج نشان داد در بالا دست پایه شروع جریان رو به پایین در فاصله  $1D$  از مرکز پایه شکل می‌گیرد و در فاصله خیلی نزدیک به پایه و در قسمت پایینی آن به حدود  $0.5U$  (سرعت جریان) می‌رسد. در پشت پایه ناحیه با سرعت مثبت مشاهده شده و بیشترین مقدار این سرعت در نزدیکی بستر برابر  $0.31U$  رخ داده است. صفری پور و همکاران (۲) تأثیر صفحات مستغرق پادساعتگرد بر کاهش آبستگي پیرامون پایه پل منفرد را به صورت آزمایشگی در شرایط آب زلال مورد مطالعه قرار دادند. نتایج آزمایشات آن‌ها بیانگر این بود که استفاده از صفحات مستغرق پاد ساعتگرد، حجم حفره و عمق آبستگي در اطراف پایه پل را کاهش می‌دهد. درصد کاهش حجم حفره آبستگي پیرامون پایه در حالت استفاده از صفحات مستغرق پادساعتگرد حدود  $25-40\%$

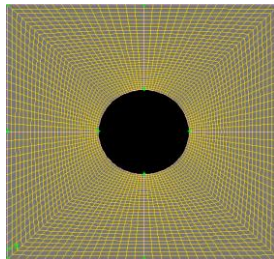
با شرایط آزمایشگاهی عطایی آشتیانی و اصلانی کردکندی (۴) می باشد.



شکل ۲- نحوه قرارگیری پایه‌ها با فاصله  $G/D=2$ .

### مش بندی مدل

مش بندی مدل با استفاده از نرم افزار Gambit انجام شد. برای انجام این نوع مش بندی از یک مربع هادی به ابعاد 3D (شکل ۳) اطراف هریک از پایه‌ها استفاده شده است. در شکل ۳ با توجه به اینکه مش بندی اطراف دو پایه حالت تقارن دارد جهت افزایش وضوح تنها مش بندی یک پایه و یک سمت کانال نمایش داده شده است. برای مش بندی کل محدوده از الگوی map بهره گرفته شد. مش بندی داخل مربع هادی با  $ratio=2$  در هر سه جهت در نظر گرفته شد یعنی با دور شدن از پایه‌ها ابعاد مش‌ها ۲ برابر می‌شود و برای پایین دست پایه‌ها خارج از مربع هادی سرعت رشد ابعاد مش‌ها برابر ۵ و برای بالادست برابر ۲۰ در نظر گرفته شد.



شکل ۳- مش بندی مربع هادی اطراف هر یک از استوانه‌ها.

### شرایط مرزی

با توجه به آنکه جهت صحت‌سنجی مدل عددی از نتایج آزمایشگاهی استفاده شده، لازم است که شرایط مرزی در مدل عددی منطبق بر آزمایش‌های انجام شده باشند. شرط مرزی ورودی کانال از نوع "سرعت ورودی" می‌باشد که به صورت مجزا برای آب و هوا تعریف شده است. که برای فاز آب مقدار سرعت برابر  $0.36 \text{ m/s}$  و برای فاز هوا مقدار سرعت صفر در نظر گرفته شده است. و برای خروجی کانال شرط مرزی از نوع "فشار خروجی" انتخاب گردید. مرز فوقانی فاز هوا، شرط مرزی تقارن انتخاب شده است. با این فرض، تنش برشی و شار تمام کمیت‌ها در این سطح برابر با صفر در نظر گرفته می‌شود. همچنین مرز تحتانی فاز هوا از نوع صفحه داخلی در نظر گرفته شده و در کف و دیوارهای کانال شرط مرزی دیواره به همراه تابع استاندارد دیواره بکار رفته است. تابع دیواره پاسخ‌های نقاط داخلی میدان را به نواحی نزدیک

فشار  $P$  و سایر کمیت‌های اسکالر را به کمیت‌های متوسط و نوسانی، تجزیه نمود. برای مؤلفه‌های سرعت داریم:

$$u_i = \bar{u}_i + u'_i \quad (3)$$

که  $u_i$  و  $u'_i$  به ترتیب مؤلفه‌های سرعت متوسط و نوسانی هستند. با جایگذاری معادله (۳) در روابط (۱) و (۲) و سپس متوسط‌گیری، معادلات حاکم بر حرکت یک سیال تراکم ناپذیر لزج در حالت آشفته بصورت زیر بدست می‌آیند:

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (4)$$

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + \frac{\partial u_i u_j}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + g_i + \frac{\partial}{\partial x_j} (\tau_{ij}) \quad (5)$$

در معادلات فوق،  $u_i$  مؤلفه سرعت در جهت  $x_i$  فشار کل،  $\rho$  چگالی سیال،  $g_i$  شتاب ثقل در جهت  $x_i$  و  $\tau_{ij}$  تانسور تنش بوده که در حالت جریان آشفته بصورت رابطه (۶) بیان می‌شود:

$$\tau_{ij} = -\rho \overline{u'_i u'_j} = \rho \nu_t \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \rho k \delta_{ij} \quad (6)$$

در معادلات فوق لزجت گردابه‌ای یا لزجت آشفتگی است که بر خلاف لزجت مولکولی از نوع خاصیت سیال نمی‌باشد. بلکه تابع خصوصیات جریان و آشفتگی آن است و مقدار آن از سیالی به سیال دیگر و از نقطه‌ای به نقطه دیگر متفاوت است. برای کاربردی کردن تعریف لزجت گردابه‌ای است. انرژی جنبشی آشفتگی بر واحد جرم ( $k$ ) بصورت زیر بیان می‌شود:

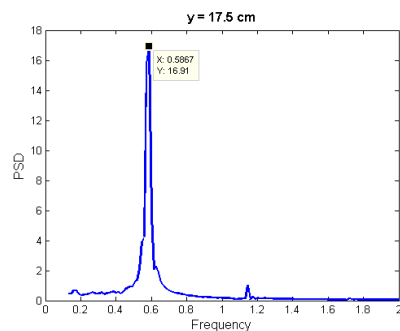
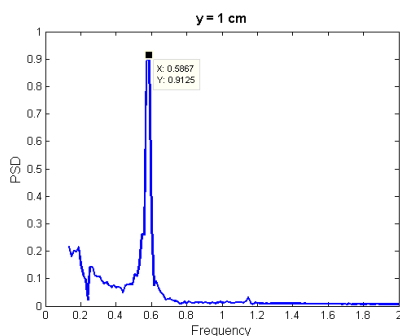
$$k = \frac{1}{2} (\overline{u_1^2} + \overline{u_2^2} + \overline{u_3^2}) \quad (7)$$

$$\delta_{ij} = \begin{cases} 1 & i=j \\ 0 & i \neq j \end{cases} \quad (8)$$

### مشخصات مدل عددی

میدان حل برای حالت دو استوانه کنار هم یک کانال مستطیلی مستقیم به طول ۱۲ متر، عرض  $1/26$  متر، ارتفاع  $0.5$  متر و عمق آب  $0.32$  متر، با دیوارها و کف صلب که دو پایه به قطر  $0.091$  متر با فاصله بین پایه‌ها  $2/5, 3/5, 1, 1.5$   $G/D$  (فاصله لبه داخلی دو پایه) در فاصله ۸ متری از بالادست کانال در آن قرار گرفته‌اند در نظر گرفته شده است. که در شکل ۲ نحوه قرارگیری پایه‌ها با فاصله  $G/D = 2$  (قطر پایه) نشان داده شده است. عدد رینولدز جریان در حدود  $10^5$  و عدد فرود  $0.2$  می‌باشد که نشان دهنده رژیم جریان آشفته و زیر بحرانی می‌باشد. با توجه به اینکه جریان مطالعه حاضر در حالت کاملاً آشفته قرار دارد، تغییر در میزان عدد رینولدز تاثیر اندکی روی نتایج خواهد داشت. بنابراین بررسی اثر تغییرات عدد رینولدز در این مطالعه صورت نگرفته و با ارائه پارامترهای آشفتگی مهم از جمله تنش برشی و انرژی آشفتگی جریان در یک جریان کاملاً آشفته اثر حضور پایه‌ها در مقابل جریان بررسی شده است. در این مطالعه نسبت سرعت متوسط به سرعت آستانه حرکت ذرات بستر در حدود  $0.95$  در نظر گرفته شده است و جریان در بالا دست پایه‌ها نزدیک به شرایط بحرانی برای حرکت ذرات رسوب می‌باشد. شرایط هندسی و هیدرولیکی برای این مطالعه منطبق

فواصل مش‌ها با توجه به نسبت‌های ذکر شده تعیین گردید. در ادامه طیف‌های توانی برای سرعت جریان (برآیند سرعت در سه بعد) در پشت استوانه و در نقطه  $(x, z) = (0, 2/D)$  نسبت به مرکز استوانه در دو ارتفاع ۱ cm و ۱۷/۵ cm نسبت به کف بدست آمده‌اند. طیف‌های توانی از روی داده‌های سری زمانی سرعت‌ها و با استفاده از تحلیل تبدیل فوریه سریع (FFT) بدست می‌آیند. براساس این تحلیل مقدار فرکانس ریزش گردابه‌ها که برابر با فرکانس غالب نوسانات سرعت‌ها است برای نقاط مذکور مشخص و با نتایج مدل آزمایشگاهی اصلائی کردکندی (۱) که برای ارتفاع ۱ cm و ۱۷/۵ cm به ترتیب برابر ۰/۷۸ Hz و ۰/۷۶ Hz می‌باشد مقایسه شد. در شکل ۴ تا شکل ۸ مقاله طیف توانی برای نقاط مذکور نشان داده شده‌اند. همچنین در جدول ۱ نتایج حاصل از آنالیز جریان با استفاده از مدل آشفتگی RNG k-ε برای هر کدام از مدل‌ها آورده شده است. مقایسه نتایج بدست آمده برای فرکانس تشکیل گردابه نقاط ذکر شده و محاسبه خطای پیش بینی نشان می‌دهد که نتایج حاصله در مورد ضخامت لایه اول برابر ۰/۰۲D دقیق‌تر است. لذا برای مدل‌سازی سایر حالات، از ضخامت ۰/۰۲D برای اولین لایه مجاور استفاده می‌شود که تعداد مش در این حالت برابر ۱۳۲۸۷۱۹ می‌باشد. نتایج همچنین نشان می‌دهد که میزان خطای نزدیک بستر از مقدار خطای عمق میانی بیشتر می‌باشد که اثر لزجت و آشفتگی جریان نزدیک بستر می‌تواند باعث این افزایش خطا باشد.



شکل ۴- طیف توانی سرعت‌ها در پشت استوانه و در نقطه  $(x, z) = (0, 2/D)$  نسبت به مرکز استوانه در دو ارتفاع مختلف از بستر برای مدل ۱.

دیوار مرتبط می‌سازد و بدین ترتیب از شبکه بسیار ریز در نواحی نزدیک دیواره پرهیز می‌گردد. با توجه به آنکه در شبیه‌سازی سطح آزاد با استفاده از روش حجم سیال (VOF) مدل دوفازی است، ارتفاع کانال باید به صورتی انتخاب شود که شرط مرزی در نظر گرفته شده برای فاز هوا تأثیری روی میدان جریان فاز آب نداشته باشد. در تحقیق تارک و همکاران (۱۹) روی جریان حول استوانه پل با استفاده از نرم‌افزار Fluent و روش VOF مشخص گردید که اگر ارتفاع هوا یک سوم یا بیشتر از ارتفاع اولیه آب باشد، سطح هوا تأثیری بر میدان جریان نخواهد داشت. با توجه به این نکته ارتفاع کانال برابر ۰/۵ در نظر گرفته شده است (۱۹).

قبل از شروع آنالیز توسط نرم‌افزار Fluent لازم است شرایط اولیه تحلیل را مشخص کنیم. مقدار سرعت اولیه برای جریان برابر m/s ۰/۳۶ (مطابق مطالعه آزمایشگاهی) در نظر گرفته شده است. برای آنالیز جریان در حالت مغشوش لازم است شرایط اولیه اغتشاش نیز تعیین شود. در نرم‌افزار Fluent گزینه‌های مختلفی برای تنظیم شرایط اولیه اغتشاش وجود دارد، ولی با توجه به توصیه‌های راهنمای نرم‌افزار، از دو پارامتر شدت اغتشاش و قطر هیدرولیکی استفاده شده است. این پارامترها از روابط زیر بدست می‌آیند:

$$D_H = 4 \left( \frac{A}{P} \right) \quad (9)$$

$$I = \frac{u'}{u_{avg}} = 0.16 \left( \text{Re}_{D_H} \right)^{-\frac{1}{8}} \quad (10)$$

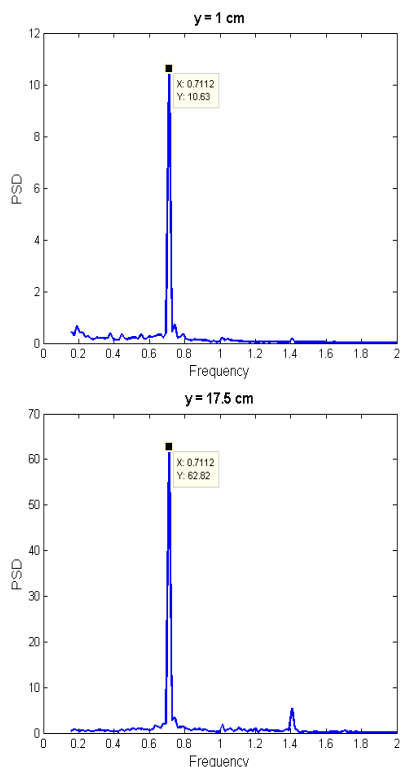
$$\text{Re}_{D_H} = \frac{\rho v D_H}{\mu} \quad (11)$$

در روابط فوق A سطح مقطع ورودی جریان، P محیط ورودی جریان،  $u'$  سرعت لحظه‌ای،  $u_{avg}$  سرعت متوسط، I شدت اغتشاش،  $D_H$  قطر هیدرولیکی و  $\text{Re}_{D_H}$  عدد رینولدز در مرز ورودی جریان است.

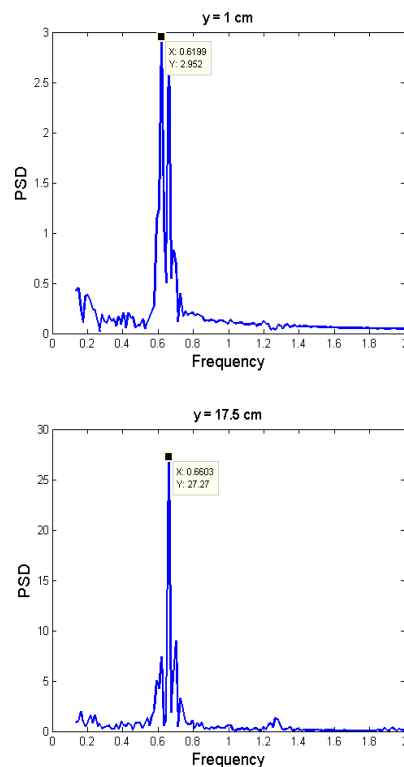
در هر پژوهش عددی، لازم است که در ابتدا از صحت نتایجی که مدل عددی بدست می‌دهد مطمئن شویم. بدین منظور جهت صحت سنجی نتایج حاصل از شبیه‌سازی عددی از داده‌های مدل آزمایشگاهی برداشت شده توسط اصلائی و عطائی آشتیانی (۴ و ۵) که در حالت بستر صلب (بدون تشکیل حفره آشستگی) انجام شده استفاده شده است.

از آنجایی که نوع و تراکم مش بندی روی دقت نتایج هزینه و زمان محاسبات تأثیر زیادی دارد لازم است که مش بندی مناسب انتخاب گردد که هم جوابگوی دقت مورد نیاز در محاسبات باشد و هم از نظر زمان انجام محاسبه در حد متعارفی باشد. انتخاب یک شبکه بسیار ریز علاوه بر آن که هزینه و زمان انجام محاسبات را به میزان قابل توجهی افزایش می‌دهد، ممکن است روی همگرایی نتایج تأثیر منفی بگذارد. از طرفی در صورتی که ابعاد مش به حد کافی کوچک نباشد، دقت محاسبات به خصوص در لایه مرزی کاهش یافته و احتمال خطا در نتایج بدست آمده افزایش می‌یابد. بدین منظور ۶ نوع مش بندی مطابق جدول ۱ با ابعاد مختلف در لایه مرزی و در کل محدوده جریان در نظر گرفته شد و تحلیل جریان در نرم‌افزار فلوئنت با استفاده از مدل آشفتگی RNG k-ε برای هر کدام از مدل‌ها انجام شد. در واقع ضخامت اولین لایه مجاور با توجه به قطر پایه در ۶ حالت مورد بررسی قرار گرفته و

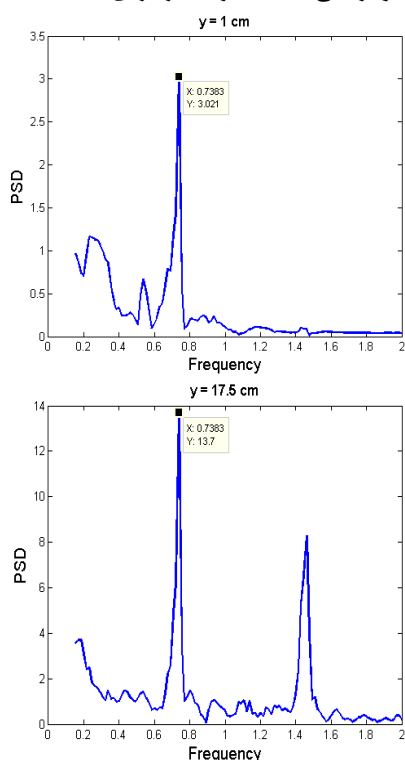




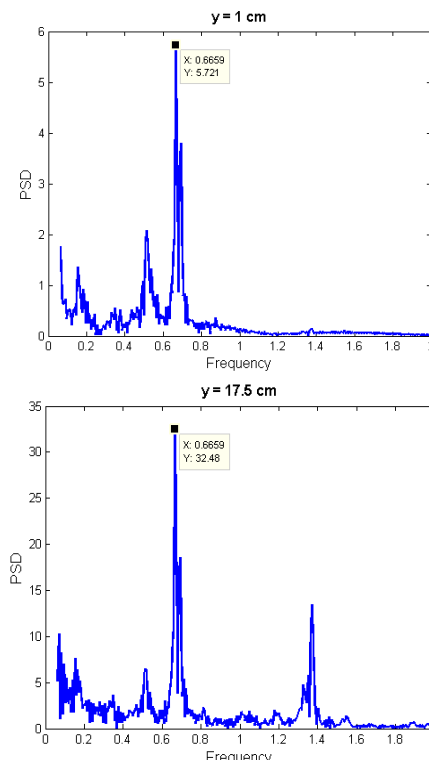
شکل ۷- طیف توانی سرعت‌ها در پشت استوانه و در نقطه  $(x, z) = (0, 2/2D)$  نسبت به مرکز استوانه در دو ارتفاع مختلف از بستر برای مدل ۴.



شکل ۵- طیف توانی سرعت‌ها در پشت استوانه و در نقطه  $(x, z) = (0, 2/2D)$  نسبت به مرکز استوانه در دو ارتفاع مختلف از بستر برای مدل ۲.



شکل ۸- طیف توانی سرعت‌ها در پشت استوانه و در نقطه  $(x, z) = (0, 2/2D)$  نسبت به مرکز استوانه در دو ارتفاع مختلف از بستر برای مدل ۵.



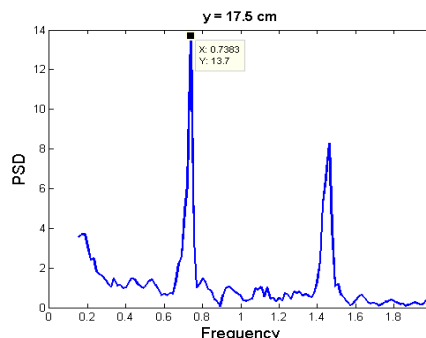
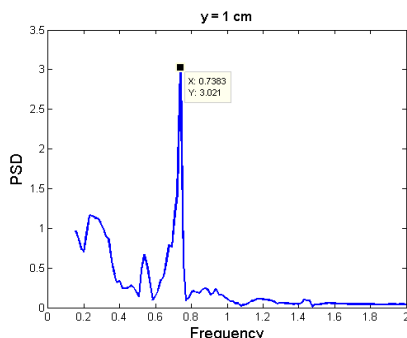
شکل ۶- طیف توانی سرعت‌ها در پشت استوانه و در نقطه  $(x, z) = (0, 2/2D)$  نسبت به مرکز استوانه در دو ارتفاع مختلف از بستر برای مدل ۳.

جدول ۱- نتایج حاصل از آنالیز جریان با استفاده از مدل آشفتگی  $k-\epsilon$  RNG برای هر کدام از مدل‌ها

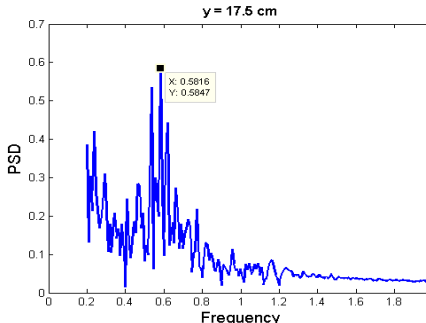
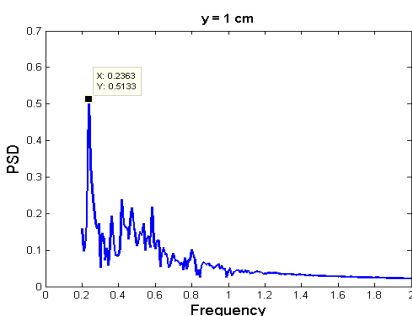
مدل	ضخامت اولین لایه مرزی	تعداد مش	زمان اجرا (ساعت)	فرکانس تشکیل گردابه (عددی)	فرکانس تشکیل گردابه (آزمایشگاهی)
۱	۰/۰۸ D	۱۰۳۷۶۱	۱۰	ارتفاع ۱ cm ۰/۵۸۷۶ Hz	ارتفاع ۱ cm ۰/۵۸۷۶ Hz
۲	۰/۰۶ D	۴۵۵۳۰۸	۲۶	ارتفاع ۱ cm ۰/۶۱۹۹ Hz	ارتفاع ۱ cm ۰/۶۶۰۳ Hz
۳	۰/۰۴ D	۶۸۵۷۳۹	۳۸	ارتفاع ۱ cm ۰/۶۶۵۹ Hz	ارتفاع ۱ cm ۰/۶۶۵۹ Hz
۴	۰/۰۳ D	۹۷۴۴۳۵	۴۴	ارتفاع ۱ cm ۰/۷۱۱۲ Hz	ارتفاع ۱ cm ۰/۷۱۱۲ Hz
۵	۰/۰۲ D	۱۳۲۸۱۷۹	۵۲	ارتفاع ۱۷/۵ cm ۰/۷۳۸۶ Hz	ارتفاع ۱۷/۵ cm ۰/۷۳۸۶ Hz
۶	۰/۰۱ D	۱۶۷۷۴۹۰	۶۰	واگرا	واگرا

(۴ و ۵) داشت، انتخاب گردید که در شکل ۹ تا شکل ۱۲ تأثیر مدل‌های آشفتگی نشان داده شده است. در این شکلها در چگالی طیفی توان (PSD) بیشینه، مقدار فرکانس ریزش گردابه‌ها که برابر با فرکانس غالب نوسانات سرعت‌ها است بدست می‌آید. همچنین در جدول ۲ نتایج بدست آمده از انجام کلیه آنالیزها، برای پارامتر تشکیل گردابه، مشاهده می‌گردد. همانطور که مشاهده می‌شود مدل  $k-\epsilon$  RNG نسبت به سایر مدل‌ها نتایج نزدیک‌تری به مقادیر آزمایشگاهی نشان می‌دهد. بنابراین جهت بررسی الگوهای مختلف جریان بصورت ۳ بعدی در اطراف استوانه‌ها و بررسی موارد مختلفی که در مقدمه مقاله به آن‌ها اشاره شد، مدل تدوین شده برای مش‌بندی نهایی یعنی ۰/۰۲، مدل آشفتگی نهایی یعنی  $k-\epsilon$  RNG برای مدت زمان حدود ۱۲۵ ثانیه RUN شده و نتایج حاصله بصورت اشکال و گراف‌های مختلف در زیر ارائه شده‌اند.

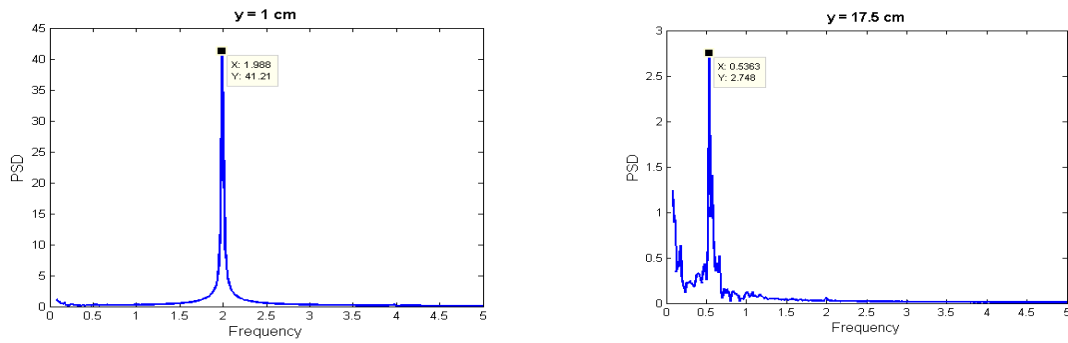
برای رژیم جریان ورقه‌ای در نرم افزار Fluent از مدل Laminar استفاده می‌شود. ولی برای جریان آشفتده، اعداد رینولدز بالاتر از ۳۰۰، بایستی یکی از مدل‌های آشفتگی موجود در نرم‌افزار انتخاب شود. مدل آشفتگی که بتواند برای تمام حالت‌ها و مسائل مختلف بکار رود، متأسفانه وجود ندارد و انتخاب مدل آشفتگی به ملاحظاتمانند فیزیک جریان، تجربیات حاصل از شبیه‌سازی برای مسائل خاص، میزان دقت مورد نیاز، قدرت منابع محاسباتی (قدرت کامپیوتر) و زمان موجود برای انجام محاسبات، وابسته می‌باشد. لذا برای انتخاب بهترین مدل آشفتگی، مدل‌های  $k-\epsilon$  standard،  $k-\epsilon$  Realizable،  $k-\epsilon$  RNG، مدل انتقال تنش برشی  $k-\omega$  SST و مدل تنش رینولدزی (RSM) استفاده شده و برای هر کدام از این مدل‌ها آنالیز جریان حول استوانه‌های پل انجام و سپس بهترین مدل که نزدیک‌ترین جواب‌ها را به نتایج بدست آمده از مدل آزمایشگاهی توسط اصلائی و عطائی آشتیانی



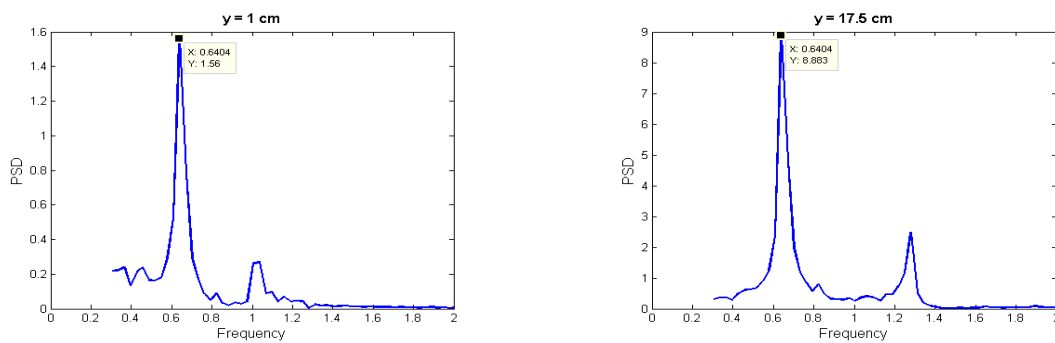
شکل ۹- طیف توانی سرعت‌ها در پشت استوانه و در نقطه  $(x, z) = (0, 2/2D)$  نسبت به مرکز استوانه در دو ارتفاع مختلف از بستر برای مدل  $k-\epsilon$  RNG



شکل ۱۰- طیف توانی سرعت‌ها در پشت استوانه و در نقطه  $(x, z) = (0, 2/2D)$  نسبت به مرکز استوانه در دو ارتفاع مختلف از بستر برای مدل  $k-\epsilon$  Realizable.



شکل ۱۱- طیف توانی سرعت‌ها در پشت استوانه و در نقطه  $(x, z) = (0, 2/2D)$  نسبت به مرکز استوانه در دو ارتفاع مختلف از بستر برای مدل  $k-\omega$  (SST).



شکل ۱۲- طیف توانی سرعت‌ها در پشت استوانه و در نقطه  $(x, z) = (0, 2/2D)$  نسبت به مرکز استوانه در دو ارتفاع مختلف از بستر برای مدل تنش رینولدزی (RSM).

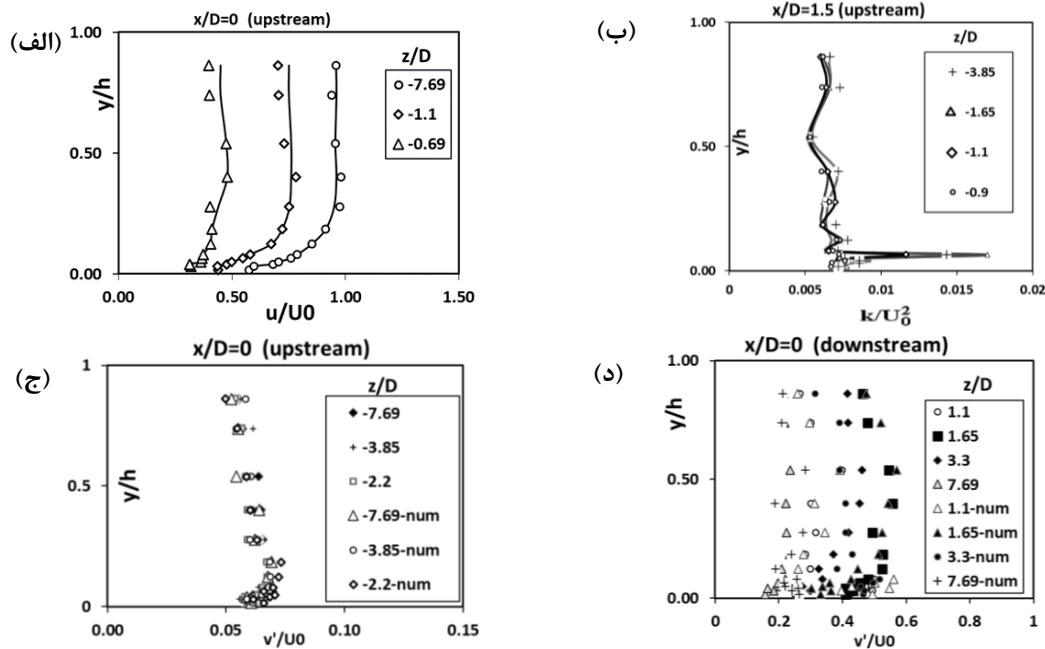
جدول ۲- نتایج حاصل از تحلیل جریان با مدل‌های مختلف آشفتگی و مقایسه آن با نتایج آزمایشگاهی

فرکانس تشکیل گردابه (عددی)		فرکانس تشکیل گردابه (آزمایشگاهی)		نتیجه	زمان اجرای برنامه (ساعت)	مدل آشفتگی
ارتفاع ۱ cm	ارتفاع ۱۷/۵ cm	ارتفاع ۱ cm	ارتفاع ۱۷/۵ cm			
-	-	-	-	واگرا	۴۰	standard k-ε
۰/۷۳۸۳ Hz	۰/۷۳۸۳ Hz	۰/۷۳۸۳ Hz	۰/۷۳۸۳ Hz	همگرا	۵۲	RNG k-ε
۰/۷۶ Hz	۰/۷۸ Hz	۰/۵۸۱۶ Hz	۰/۲۳۶۳ Hz	همگرا	۴۸	Realizable k-ε
		۰/۵۳۶۳ Hz	۱/۹۸۸ Hz	همگرا	۵۲	(SST) k-ω
		۰/۶۴۰۴ Hz	۰/۶۴۰۴ Hz	همگرا	۶۰	(RSM)

آب و  $\gamma$  راستای عمقی کانال می‌باشد. در شکل ۱۳ (الف) نتایج نیمرخ سرعت طولی شبیه سازی شده (خطوط ممتد) با نتایج آزمایشگاهی (شکل‌های هندسی) در بالادست پایه مقایسه شده است. در شکل ۱۳ (ب) انرژی جنبشی آشفتگی برای نتایج عددی (خطوط ممتد) و آزمایشگاهی (شکل‌های هندسی) با یکدیگر مقایسه شده‌اند. مقایسه نتایج نشان می‌دهد که مطابقت خوبی بین نتایج عددی و آزمایشگاهی وجود دارد. در شکل ۱۳ (ج و د) نتایج شدت آشفتگی عرضی در بالادست و پایین دست پایه در راستای عمق در مقطع طولی نمایش داده شده است. مقایسه نتایج عددی و آزمایشگاهی نشان دهنده دقت بالای مدلسازی می‌باشد.

### اعتبار سنجی نتایج مدلسازی عددی

اعتبار سنجی اول در خلال انتخاب اندازه مش و مدل آشفتگی مناسب که در آن نتایج مدل عددی با نتایج آزمایشگاهی بر اساس میزان فرکانس تشکیل گردابه و عدد استروهال با یکدیگر مقایسه گردید و برای مش و مدل آشفتگی مطلوب کمترین مقدار خطای شبیه سازی بدست آمد. اعتبار سنجی دیگر مقایسه نتایج نیمرخهای عمقی سرعت طولی، انرژی جنبشی آشفتگی و شدت آشفتگی شبیه سازی شده در مقاطع مختلف با مطالعه آزمایشگاهی عطایی آشتیانی و اصلانی کردکندی (۴) می‌باشد. در شکل ۱۳ زیر نتایج صحت سنجی نشان داده شده است. در این شکلها  $h$  عمق



شکل ۱۳- مقایسه نتایج عددی و آزمایشگاهی در راستای عمق و در مقطع طولی برای (الف) سرعت طولی (خطوط ممتد: نتایج آزمایشگاهی و اشکال هندسی: نتایج عددی)، (ب) شدت انرژی آشفتگی (خطوط ممتد: نتایج آزمایشگاهی و اشکال هندسی: نتایج عددی)، (ج و د) شدت آشفتگی عرضی

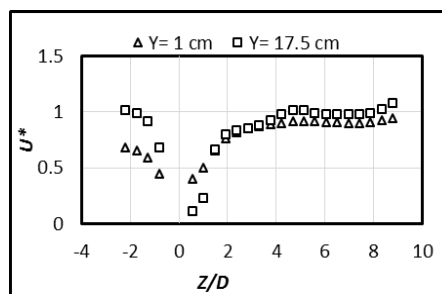
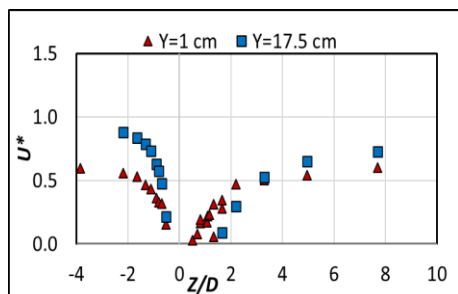
اصلی هنگام عبور از کنار آن‌ها افزایش می‌یابد و این افزایش سرعت تا فاصله نسبتاً دوری از استوانه ادامه دارد. نتایج آزمایشگاهی نشان می‌دهد که در مقطع  $X=0$  مقادیر سرعت در بالادست و پایین دست تا حدی از نتایج شبیه سازی عددی کمتر می‌باشد و سرعت بی بعد زیر عدد ۱ می‌باشد اما روند سرعت مشابهی برای هر دو نتیجه عددی و آزمایشگاهی برقرار می‌باشد. نتایج سرعت شبیه سازی شده مربوط به مقطع  $X=1/5D$  نیز برای بالادست پایه به لحاظ کمی و کیفی تطابق خوبی با نتایج آزمایشگاهی نشان می‌دهد اما در پایین دست پایه این تطابق کمتر می‌شود. گردابه‌ها در حالت دو استوانه تا حدودی کشیده تر و از نظر عرضی کوچکتر از حالت تک استوانه است که به دلیل افزایش سرعت مابین استوانه‌ها می‌باشد. اندازه سرعت در تراز  $17/5\text{cm}$  بیشتر از تراز  $1\text{cm}$  می‌باشد که نقش اثر زبری بستر بر حرکت جریان دلیل اصلی آن می‌باشد. نزدیک بستر مابین دو استوانه گسترش ناحیه با اندازه سرعت بالا نسبت به سمت خارجی دو استوانه بیشتر است. در شکل‌های ۱۵ و ۱۶ نتایج انرژی جنبشی آشفتگی و شدت آشفتگی نشان می‌دهد که بر خلاف اندازه سرعت، مقدار آشفتگی نزدیک بستر در بالا دست پایه بیشتر از عمق میانی می‌باشد. این امر ممکن است به دلیل اثرات زبری بستر باشد که افزایش زبری باعث افزایش بیشتر پارامترهای آشفتگی شده و به تبع آن لایه‌های برشی از روی پایه مسافت زیادی را طی کرده و بعد از پایه جدا می‌شوند. همچنین مقادیر آشفتگی در قسمت پایین دست پایه‌ها بیشتر از قسمت بالا دست مشاهده می‌شود که اثر گردابه‌های برخاستگی و جریان نعل اسبی بالقوه می‌تواند باعث این امر شود. در قسمت پایین دست پایه مقادیر آشفتگی بالا به عمق-های بالاتر جابجا می‌شود. در ناحیه بین دو پایه اختلاف مقادیر آشفتگی در دو عمق نسبت به راستای پایه‌ها بیشتر می‌شود و مقادیر خیلی بالاتر

### نتایج مربوط به مدل سازی

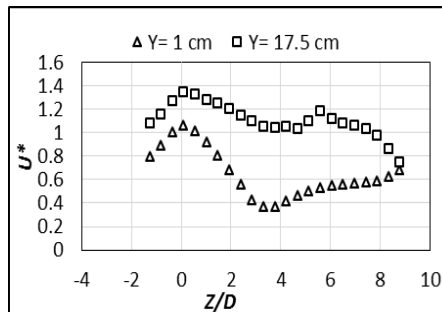
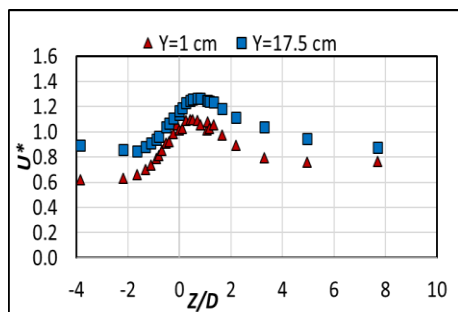
در این بخش نتایج مربوط به مدل سازی جریان اطراف دو استوانه کنار هم با فاصله  $G/D=2$  بررسی خواهد شد. این بررسی‌ها شامل تحلیل پروفیل‌های سرعت، انرژی جنبشی و شدت‌های آشفتگی در مقاطع مختلف افقی و قائم خواهد بود. همچنین در قسمت‌هایی از نواحی تنش برشی بستر برآورد خواهد شد. و در ادامه اثر فاصله بین استوانه‌ها بر الگوی جریان بررسی خواهد شد. در شکل ۲ پلانی از ناحیه اندازه گیری شده، مبدأ مختصات و محورهای مختصات نمایش داده شده است. در این مطالعه با توجه به مشابهت شرایط آزمایشگاهی، نتایج عددی با نتایج آزمایشگاهی عطایی آشتیانی و اصلاحی کردکندی (۴) مقایسه شده است. در شکل ۱۴ مقایسه پروفیل‌های سرعت برآیند در مقاطع  $X=1/5D$  و  $X=0$  در طول کانال در دو ارتفاع مختلف از بستر به صورت آزمایشگاهی و شبیه سازی عددی نشان داده شده است. پروفیل‌های سرعت برآیند با استفاده از سرعت متوسط جریان  $(U/U_0=U^*)$  و فواصل بر اساس قطر استوانه بی بعد شده اند. نتایج شبیه سازی نشان می‌دهد با نزدیک شدن جریان به استوانه‌ها به دلیل تنگ‌شدگی مجرای جریان در طرفین استوانه‌ها سرعت سرعت افزایش یافته است. بیشترین مقدار سرعت مابین استوانه‌ها و تقریباً در زاویه  $90^\circ$  درجه در راستای طولی مراکز استوانه‌ها در سمت داخلی آن‌ها اتفاق می‌افتد. ما بین دو استوانه افزایش سرعت قابل ملاحظه است. این امر به علت کاهش بیشتر سطح مقطع جریان بین دو استوانه می‌باشد. در پشت استوانه جریان معکوس شکل می‌گیرد که مقایسه ابعاد ناحیه مربوط به جریان معکوس و برخاستگی نشان می‌دهد که با فاصله گرفتن از بستر، گستره و قدرت گردابه‌ها افزایش می‌یابد. وجود گردابه‌ها در پشت استوانه مانند خود استوانه نقش مانع را ایفا کرده بنابراین سرعت جریان

است. بر خلاف پایین دست پایه‌ها، نتایج آزمایشگاهی آشفتگی برای بالادست پایه برای دو عمق متفاوت نتایج تقریباً مشابهی با اندکی اختلاف را نشان می‌دهد. در پایین دست پایه‌ها، علاوه بر زبری بستر، گردابه‌های برخاستگی نیز در آشفتگی تاثیر زیادی دارد که باعث می‌شود مقادیر آشفتگی افزایش چشمگیر داشته باشد.

آشفتگی در راستای پایه‌ها و نزدیک به آنها رخ می‌دهد. نتایج آزمایشگاهی عطایی آشتیانی و اصلانی کردکندی (۴) نیز همین روند را نشان می‌دهد اما به لحاظ کمی نتایج آزمایشگاهی مقادیر آشفتگی را بیشتر از شبیه سازی نشان می‌دهد. دلیل این امر می‌تواند مربوط به زبری بستر باشد که اثر آن در نتایج آزمایشگاهی بیشتر نمایان شده



(الف)



(ب)

شکل ۱۴- مقایسه سرعت برآیند (الف) - در مقطع  $X/D = 0$  (ب) - در مقطع  $X/D = 1/5$  در طول کانال در دو ارتفاع مختلف از بستر (نتایج آزمایشگاهی (۴) (چپ) و نتایج عددی (راست))

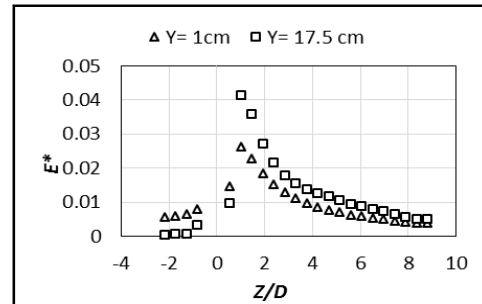
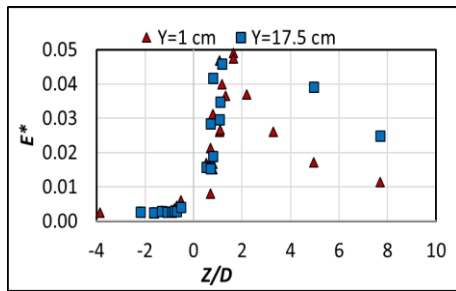
در مقاطع عرضی در دو ارتفاع مختلف از بستر را برای نتایج آزمایشگاهی (۴) و شبیه سازی عددی حاضر نشان می‌دهد. با نزدیک شدن به استوانه، مقادیر آشفتگی در تراز میانی بیشتر از مقادیر آشفتگی در نزدیکی بستر است ولی در نواحی دورتر از استوانه مقادیر آشفتگی در نزدیکی‌های بستر بیشتر از تراز میانی می‌باشد. مقادیر آشفتگی در پایین دست بیشتر از مقادیر آشفتگی در بالادست می‌باشد. که به دلیل حضور جریان گردابه‌ها در این ناحیه می‌باشد. روند کیفی نتایج عددی و آزمایشگاهی یکسان بوده ولی به لحاظ کمی نتایج آزمایشگاهی مقادیر آشفتگی را تا حدودی بیشتر از نتایج شبیه سازی عددی نشان داده اند. در شکل ۱۹ تنش برشی وارد شده بر بستر در مقاطع طولی نشان داده شده است. همان‌طور که در شکل مشاهده می‌شود در مقطع  $X/D=1/5$  با نزدیک شدن به مرکز استوانه مقادیر تنش برشی افزایش به طوریکه در مرکز استوانه به حداکثر مقدار خود می‌رسد. با دور شدن از استوانه ابتدا تنش برشی کاهش به طوریکه در پایین دست در فاصله  $3D$  از مرکز استوانه مقدار تنش برشی به حداقل مقدار خود رسیده سپس افزایش پیدا می‌کند. در مقطع  $X/D=0$  بیشترین مقدار تنش برشی در پایین دست در

### الگوی جریان در مقاطع قائم

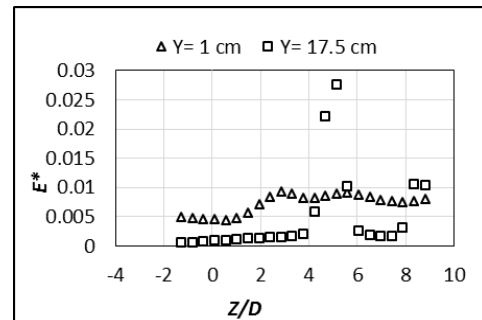
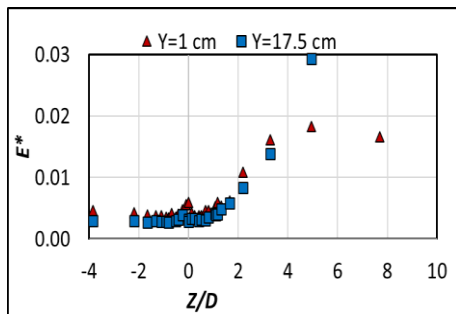
شکل ۱۷ پروفیل‌های سرعت برآیند در مقاطع عرضی در دو ارتفاع مختلف از بستر برای نتایج آزمایشگاهی (۴) و شبیه سازی عددی حاضر نشان داده شده است. خاطر نشان می‌گردد که اندازه‌گیری آزمایشگاهی به دلیل تقارن کانال و پایه‌ها تنها در نصف کانال انجام شده است. با رسیدن جریان به اطراف استوانه  $x=0$  (به دلیل کاهش سطح مقطع جریان سرعت افزایش یافته است. در مقطع  $Z=10\text{cm}$  جریانات رو به پایین و گردابه‌ها مشاهده می‌شود. در پشت استوانه و در راستای مرکز استوانه در اثر گرادیان فشار منفی جریانات رو به بالایی دیده می‌شود. در مقطع  $Z=10\text{cm}$  مشاهده می‌شود که مقادیر سرعت در پشت استوانه کاهش یافته است که نشان دهنده تشکیل گردابه در این ناحیه می‌باشد. به لحاظ کمی و کیفی نتایج شبیه سازی عددی تطابق خوبی با نتایج آزمایشگاهی نشان می‌دهد. تنها در شکل ۱۷ (ج) در پشت پایه نتایج آزمایشگاهی سرعت نزدیک به صفر را نمایش می‌دهد که نتایج عددی مقادیر بزرگتر از صفر را نمایش داده است. شکل ۱۸ پروفیل‌های انرژی جنبشی آشفتگی و شدت آشفتگی را

محاسبات تنش برشی از نتایج آزمایشگاهی مقادیر بزرگتری نسبت به نتایج عددی نشان می‌دهد .

فاصله  $3D$  از مرکز اتفاق می‌افتد. نتایج آزمایشگاهی (۴) نیز همین روند را نشان می‌دهد ولی به لحاظ کمی مثل نتایج مربوط به آشفتگی،

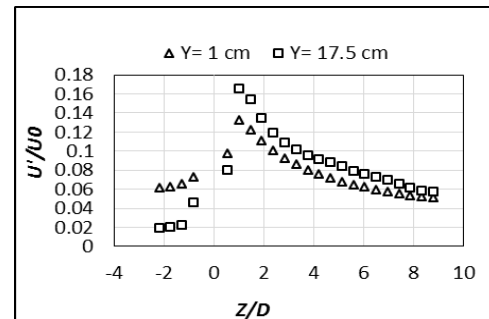
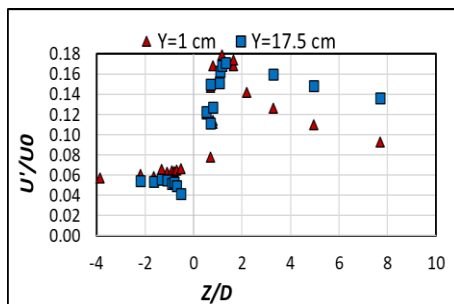


(الف)

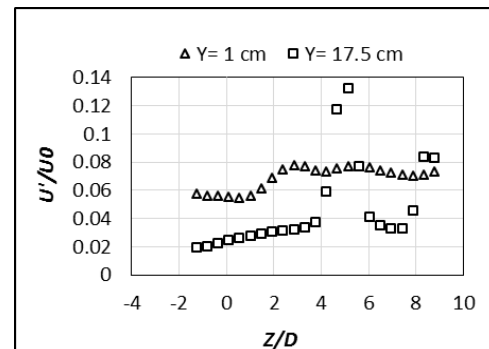
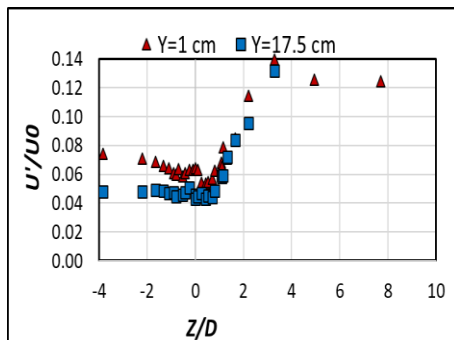


(ب)

شکل ۱۵- مقایسه انرژی جنبشی آشفتگی (الف) - در مقطع  $X/D = 0$  (ب) - در مقطع  $X/D = 1/5$  در طول کانال در دو ارتفاع مختلف از بستر ( نتایج آزمایشگاهی (چپ) و نتایج عددی (راست))

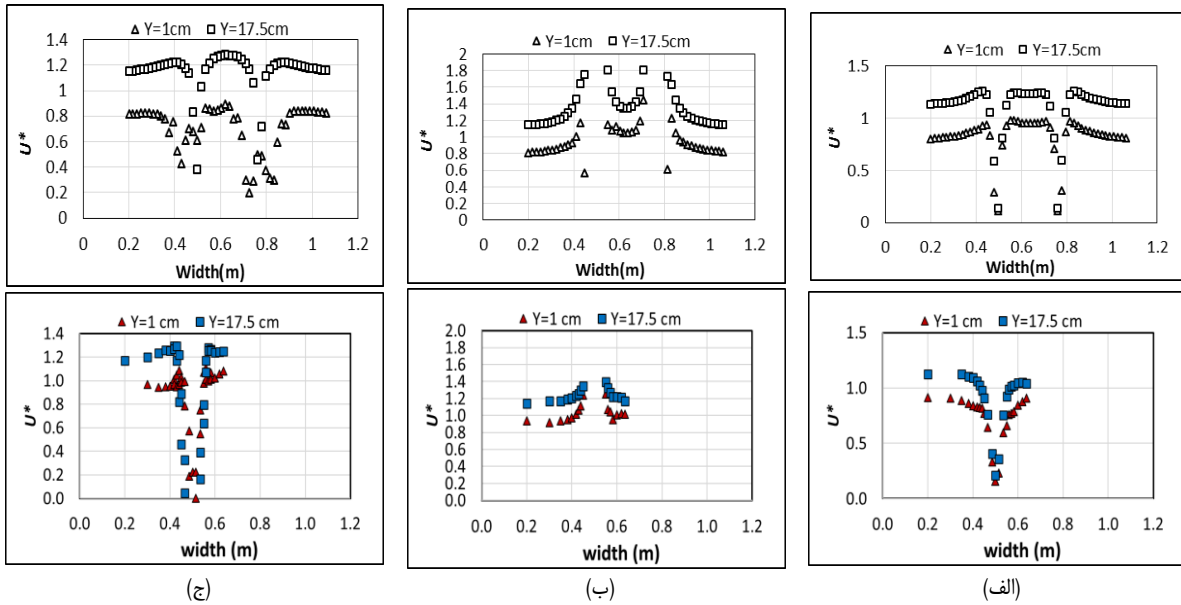


(الف)

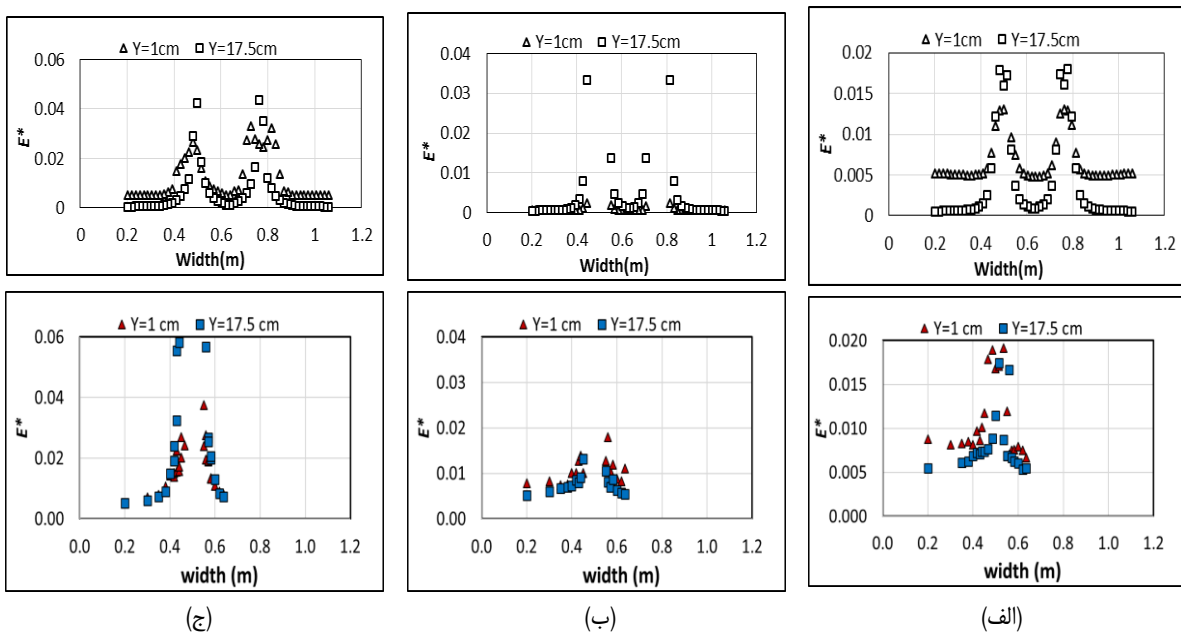


(ب)

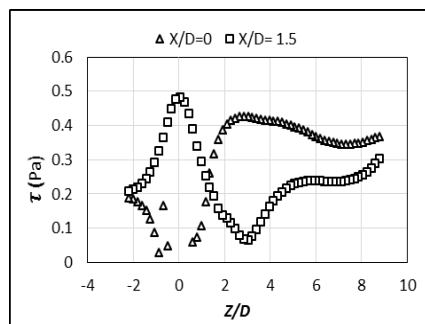
شکل ۱۶- مقایسه شدت آشفتگی (الف) - در مقطع  $X/D = 0$  (ب) - در مقطع  $X/D = 1/5$  در طول کانال در دو ارتفاع مختلف از بستر ( نتایج آزمایشگاهی (چپ) و نتایج عددی (راست))



شکل ۱۷- مقایسه سرعت‌های برآیند در مقطع عرضی عبوری از (الف)  $Z = -\frac{4}{7} \text{ cm}$  - (ب)  $Z = 0$  - (ج)  $Z = 10 \text{ cm}$  در دو ارتفاع مختلف از بستر، ( نتایج عددی (بالا) و نتایج آزمایشگاهی (پایین))

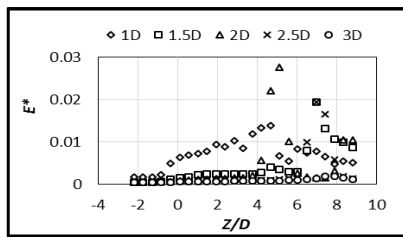


شکل ۱۸- مقایسه انرژی جنبشی آشفتگی در مقطع عرضی عبوری از (الف)  $Z = -\frac{4}{7} \text{ cm}$  - (ب)  $Z = 0$  - (ج)  $Z = 10 \text{ cm}$  در دو ارتفاع مختلف از بستر، ( نتایج عددی (بالا) و نتایج آزمایشگاهی (پایین))

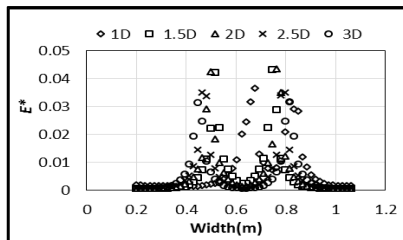


شکل ۱۹- تنش برشی وارد شده بر بستر در مقطع طولی عبوری از  $X = 0$  و  $X/D = 1/5$

عمل می‌کنند و جریان در قسمت بیرونی استوانه‌ها وجود دارد. در شکل ۲۳ تنش برشی وارد بر بستر در مقطع طولی نشان داده شده است همان‌طور که مشاهده می‌شود با کم شدن فاصله حداکثر مقدار تنش-برشی در مرکز دو استوانه و در  $G/D=1/5$  رخ داده است و با گذر از مرکز دو استوانه مقدار تنش برشی کاهش پیدا کرده است. در پایین دست استوانه‌ها حداکثر مقدار تنش برشی در  $G/D=1$  و در فاصله  $3D$  رخ داده است. به طور کلی می‌توان گفت که فاصله‌ی زیاد پایه‌ها باعث از بین رفتن اندرکنش دو پایه بر جریان می‌شود و هر کدام از پایه‌ها به صورت مستقل عمل می‌کنند. با نزدیک شدن بیش از حد پایه‌ها نیز دو پایه مثل یک پایه با قطر بزرگتر عمل می‌کند.



(الف)

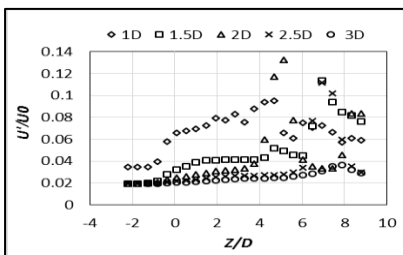


(ب)

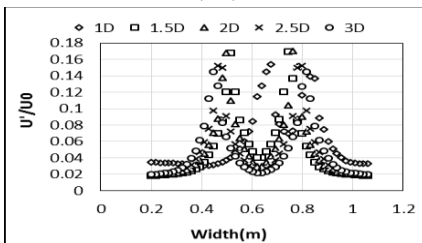
شکل ۲۱- مقایسه انرژی جنبشی آشفتگی (الف)-

مقطع طولی (ب)- مقطع عرضی در ارتفاع

$Y=17/5$  cm برای فواصل مختلف



(الف)



(ب)

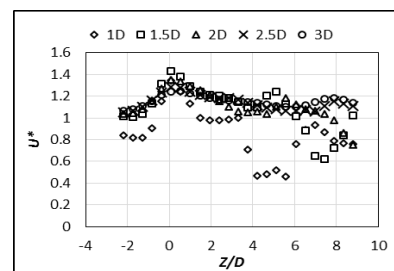
شکل ۲۲- مقایسه شدت آشفتگی (الف)- مقطع طولی

(ب)- مقطع عرضی در ارتفاع  $Y=17/5$  cm برای

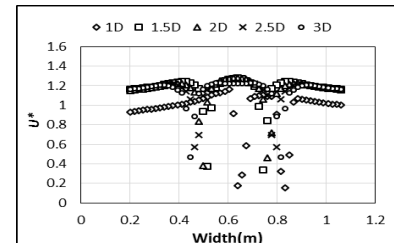
فواصل مختلف

## نتایج مربوط به تأثیر فاصله بین استوانه‌ها

در این بخش تأثیر فاصله بین استوانه‌ها بر مقادیر سرعت، مقادیر آشفتگی و تنش برشی بستر بررسی خواهد شد. برای این منظور فاصله بین استوانه‌ها ۳، ۲/۵، ۲، ۱/۵،  $G/D=1$  (فاصله لبه داخلی دو استوانه) در نظر گرفته شده است. به منظور بررسی سرعت، آشفتگی و تنش-برشی بستر دو مقطع طولی و عرضی مطابق شکل ۲ در نظر گرفته شده است. به این نحو که مقطع طولی از میانه استوانه‌ها و مقطع عرضی در فاصله  $1D$  نسبت به مرکز استوانه در پایین دست استوانه‌ها در میانه عمق کانال در نظر گرفته شده است. شکل ۲۰ (الف) و (ب) پروفیل‌های سرعت در مقاطع طولی و عرضی را به ترتیب نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که در مقطع طولی با کم شدن فاصله بین استوانه‌ها مقدار سرعت در مرکز استوانه‌ها افزایش پیدا کرده که بیشترین مقدار سرعت در  $G/D=1/5$  اتفاق افتاده است در حالی که برای فواصل  $G/D < 1/5$  مقدار سرعت به دلیل حبس شدگی جریان کاهش پیدا کرده است. این پدیده می‌تواند نشانگر این باشد که برای فواصل کوچکتر از  $1/5$  (دو استوانه مانند تک استوانه با قطر  $2D$  عمل می‌کنند. در شکل ۲۱ و ۲۲ مقادیر انرژی و شدت آشفتگی به ترتیب نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود با کم شدن فاصله بین استوانه‌ها در مقطع طولی در مرکز استوانه‌ها بیشترین مقادیر آشفتگی در  $G/D=1$  اتفاق افتاده است در حالی که در پایین دست استوانه‌ها بیشترین مقادیر آشفتگی در  $G/D=2$  در فاصله  $5D$  اتفاق افتاده است. در مقطع عرضی بیشترین مقادیر آشفتگی برای  $G/D=2$  و  $G/D=1/5$  در پشت استوانه‌ها (ناحیه سایه) اتفاق افتاده در حالی که، در  $G/D=1$  این مقدار در وسط کانال رخ داده است. این موضوع نشانگر این است که برای فواصل کم بین دو استوانه به دلیل حبس شدگی جریان، در فاصله بین دو استوانه جریان سیالی وجود ندارد در واقع دو استوانه همانند یک استوانه با قطر  $2D$



(الف)



(ب)

شکل ۲۰- مقایسه سرعت برآیند (الف)- مقطع طولی

(ب)- مقطع عرضی در ارتفاع  $Y=17/5$  cm برای

فواصل مختلف



$G/D < 1/5$  مقدار سرعت به دلیل حبس شدگی جریان کاهش پیدا کرده است.

۱۰- بیشترین مقادیر آشفتگی در حالت دو استوانه کنارهم در پایین دست استوانه و در  $G/D = 2$  اتفاق افتاده است.

### محدودیت‌های تحقیق

۱- این مطالعه در شرایط آب صاف و با در نظر گرفتن بستر زبر ثابت انجام شده است.

۲- دبی و عمق آب در این مطالعه ثابت بوده و اثر تغییرات این پارامترها در مطالعه دیده نشده است.

۳- این مطالعه برای رژیم جریان کاملاً آشفته زیر بحرانی انجام شده است و اثر تغییرات عدد رینولدز و عدد فرود در مطالعه بررسی نشده است.

۴- در این مطالعه تنها از پایه‌های استوانه‌ای دایره‌ای با قطر ثابت و عمود بر بستر کانال استفاده شده و اثر تغییرات شکل و اندازه و زاویه نصب پایه‌ها بررسی نشده است.

برای روشن شدن جزئیات جریان شبیه سازی جریان در بستر متحرک و فرسایش پذیر تا تشکیل حفره تعادلی نهایی ضروری می‌باشد. در شرایط بستر متحرک حل هم زمان معادلات جریان و رسوب توسط مدل انجام می‌گردد. چنانچه بستر فرسایش پذیر باشد و اجازه آبستگی اطراف پایه‌ها داده شود، حفره آبستگی تشکیل شده جریان نزدیک بستر را به سمت خودش جذب خواهد کرد (۴). با افزایش ابعاد حفره، سرعت‌ها و آشفتگی‌های نزدیک بستر زیاد خواهد شد. در واقع ترکیب مولفه‌های سرعت باعث افزایش سرعت رو به پایین در جلوی پایه خواهد شد و در نتیجه گردابه‌های نعل اسبی قویتری ایجاد شده و به طرفین پایه‌ها حرکت می‌کند. در پشت پایه و حوالی حفره آبستگی نیز ریزش گردابه قویتری رخ خواهد داد. بین دو پایه در داخل حفره به دلیل تراکم جریان، گردابه‌های نعل اسبی قویتری نسبت به خارج پایه‌ها تشکیل می‌گردد (۴).

### ملاحظات اخلاقی پیروی از اصول اخلاق پژوهش

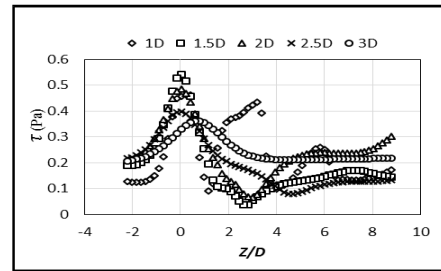
همکاری مشارکت‌کنندگان در تحقیق حاضر به صورت داوطلبانه و با رضایت آنان بوده است.

### حامی مالی

هزینه تحقیق حاضر توسط نویسندگان مقاله تامین شده است.

### مشارکت نویسندگان

تمامی نویسندگان در تهیه بخش‌های مختلف مشارکت داشته‌اند.



شکل ۲۳- مقایسه تنش برشی بستر در مقطع طولی برای فواصل مختلف

### نتیجه گیری

- ۱- در این تحقیق مدل‌های آشفتگی موجود در نرم‌افزار مورد بررسی قرار گرفتند و مشخص گردید که مدل RNG k-ε نسبت به سایر مدل‌ها نتایج بهتری ارائه می‌دهد.
- ۲- با نزدیک شدن جریان به استوانه‌ها به دلیل تنگ‌شدگی مجرای جریان در طرفین استوانه‌ها سرعت افزایش یافته است.
- ۳- سرعت متوسط در اطراف گروه پایه افزایش زیادی نسبت به تک پایه نداشته است اما آشفتگی درون گروه پایه‌ها تا حدود سه برابر افزایش داشته است.
- ۴- گردابه‌ها در ترازهای تحتانی از گسترش کمتری و در ترازهای میانی و فوقانی از گسترش بیشتری برخوردار می‌باشند که نشان دهنده افزایش قدرت گردابه‌ها با دور شدن از بستر می‌باشد. این تفاوت قدرت گردابه در عمق، از عوامل ایجادگردایان فشار در عمق و جداسدن ذرات رسوب به داخل جریان در پایین دست استوانه است.
- ۵- در ناحیه بین دو استوانه به دلیل افزایش سرعت میزان تنش برشی بستر و گستردگی آن افزایش یافته است.
- ۶- با نزدیک شدن جریان به ناحیه بین دو استوانه افزایش سرعت به خصوص در ترازهای بالایی دیده می‌شود. البته قابل ذکر است که این افزایش سرعت بعد از گذر از استوانه اتفاق می‌افتد به دلیل حضور گردابه‌ها که خود نقش مانع ایجاد می‌کنند.
- ۷- در حالت دو استوانه کنار هم مقادیر آشفتگی در ارتفاع میانی بیشتر از مقادیر نزدیک بستر است (بیشتر در قسمت کناره‌ها و پایین دست پایه‌ها) که نشان دهنده تأثیر بیشتر گردابه‌ها بر مقادیر آشفتگی می‌باشد.
- ۸- درحالی‌که در حالت تک استوانه مقادیر آشفتگی نزدیک بستر بیشتر از مقادیر آشفتگی در ارتفاع میانی می‌باشد. که می‌تواند نشان دهنده تأثیر بیشتر بستر بر مقادیر آشفتگی باشد.
- ۹- با کم شدن فاصله بین استوانه‌ها مقادیر سرعت در مرکز استوانه افزایش پیدا کرده که بیشترین مقدار سرعت در  $G/D = 1/5$  اتفاق افتاده است در حالی‌که برای فواصل

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

## References

- Aslani-Kordkandi A. 2009. Experimental Investigation of Flow Pattern around Pile Groups (two piles). Master's thesis, Sharif University of Technology, Iran.
- Safaripour N, vaghefi M, mahmoudi A. 2018. Investigation of the effect of counter clockwise submerged vanes on reduced scour around single bridge pier in the sharp bend. *Journal of Irrigation and Water Engineering*. 8(2): 19-28.
- Ghods H, Khanjani MJ. 2018. Experimental Investigation of Local Scour around Complex Bridge Pier. *Journal of Irrigation and Water Engineering*. 8(3): 35-47.
- Ataie-Ashtiani B, Aslani-Kordkandi A. 2012. Flow field around side-by-side piers with and without a scour hole. *European Journal of Mechanics-B/Fluids*. 36: 152-166.
- Ataie-Ashtiani B, Aslani-Kordkandi A. 2013. Flow field around single and tandem piers. *Flow, Turbulence and Combustion*. 90(3): 471-490.
- Ahmed F, Rajaratnam N. 1998. Flow around bridge piers. *Journal of Hydraulic Engineering*. 124(3): 288-300.
- Ahmed F, Rajaratnam N. 2000. Observations on flow around bridge abutment. *Journal of Engineering Mechanics*. 126(1): 51-59.
- Akilli H, Akar A, Karakus C. 2004. Flow characteristics of circular cylinders arranged side-by-side in shallow water. *Flow Measurement and Instrumentation*. 15(4): 187-197
- Barbhuiya A. K, Dey S. 2004. Measurement of turbulent flow field at a vertical semicircular cylinder attached to the sidewall of a rectangular channel. *Flow Measurement and Instrumentation*. 15(2): 87-96.
- Behrouzi, Z., Hamidifar, H., Zomorodian, M. 2021. Numerical simulation of flow velocity around single and twin bridge piers with different arrangements using the Fluent model. *Amirkabir Journal of Civil Engineering*, 53(9): 1-15.
- Chang, C.K., Lu, J.Y., Lu, S. Y., Wang, Z. X., Shih, D. S. 2020. Experimental and Numerical Investigations of Turbulent Open Channel Flow over a Rough Scour Hole Downstream of a Groundsill. *Water*, 12, 1488.
- Dargahi B. 1989. The turbulent flow field around a circular cylinder. *Experiments in Fluids*. 8(1-2): 1-12.
- Hamidi, A., Siadatmousavi S. M. 2018. Numerical simulation of scour and flow field for different arrangements of two piers using SSIIM model. *Ain Shams Engineering Journal* 9: 2415–2426.
- Hannah C. R. 1978. Scour at pile groups. Research Report, University of Canterbury, New Zealand.
- Melville B. W, Raudkivi A. J. 1977. Flow characteristics in local scour at bridge piers. *Journal of Hydraulic Research*. 15(4): 373-380.
- Millero F. J., Feistel R, Wright D. J., McDougall T. J. 2008. The composition of Standard Seawater and the definition of the Reference-Composition Salinity Scale. *Deep Sea Research*. 55(1): 50-72.
- Sarker M. A. 1998. Flow measurement around scoured bridge piers using Acoustic-Doppler Velocimeter (ADV). *Flow Measurement and Instrumentation*. 9(4): 217-227.
- Sumer B. M, Fredsøe J. 2002. The mechanics of scour in the marine environment. World Scientific Publishing Co Pte Ltd.
- Tarek M, Imran J, Chaudhry H. 2004. Numerical modeling of threedimensional flow field around circular piers. *Journal of Hydraulic Engineering*. 130(2): 91-100.
- Zdravkovich M. M. 1987. The effects of interference between circular cylinders in cross flow. *Journal of Fluids and Structures*. 1: 239-261.