Amirkabir Journal of Mechanical Engineering

Amirkabir J. Mech. Eng., 53(Special Issue 1) (2021) 101-104
DOI: 10.22060/mej.2019.16679.6418

Numerical Investigation of Scour Around a Cylindrical Pier in Laboratory Scale Using Euler-Lagrange Approach

T. Ebrahimi[1], M. Hamidi[1*] , A. Rahmani Firoozjaee[1], E. Khavasi[2]

[1] Civil Engineering Department, Babol Noshirvani University of Technology, Babol, Iran
[2] Mechanical Engineering Department, University of Zanjan, Zanjan, Iran

ABSTRACT: The placement of a pier in flow causes a three-dimensional complex flow pattern around the pier, which leads to a scouring hole around the pier. In this research, modeling of scouring around piers was performed both experimentally and numerically. In the first section of this study, two different scenarios were used to simulate the scouring process. In the two numerical models, the effect of phase coupling and drag models on the scoured bed was investigated. One-way coupling with the sphere drag model was implemented in the first scenario and four-way coupling with a nonsphere drag model in the second one. According to the results, the first model was not satisfying, but the result of the second model was in good agreement with experimental results. The maximum depth of scour at the cross-section in numerical and experimental results was equal (6 percent error). In the second section of this research, in order to study the effect of a collar on the reduction of scouring, a simple cylinder without a collar and then with the presence of a collar at two different levels were performed. The result shows that as the collar goes up, both the maximum depth and the radius of the scour hole increases.

Review History:

Received: 2019-07-03
Revised: 2019-11-09
Accepted: 2019-12-09
Available Online: 2019-12-30

Keywords:

Scour
Cylindrical piers
Numerical-experimental investigation
Euler-Lagrange
OpenFOAM

1. INTRODUCTION

It is obvious that bridges play an important role in transportation. Many bridges fail every year, most of them because of scouring around their piers. The failure of bridges causes serious damage. Therefore, research on the control and reduction of scouring at piers is necessary. The mechanism of scouring around a pier is very complex. The decrease in velocity at the upstream face of the pier causes an increase in pressure. Also, the dynamic pressure on the pier reduces downwards. This pressure gradient forces the flow down the pier. When this downflow touches the streambed, it makes a hole in front of the pier [1].

A review of previous studies shows that most of the simulations carried out to study scouring around piers are based on the Eulerian-Eulerian approach, in which both the fluid and particle phases are assumed to be continuous. In this investigation, in order to take into account the discrete property of sediment, simulations are performed using the Eulerian-Lagrangian approach with $k-\omega_SST$ turbulence model in OpenFOAM. In the first part of the simulation, the modeling results are evaluated by changing the coupling and drag model and then are compared to experimental results. Later, in the second part of the simulation, the effect of collar presence on scouring reduction around a cylindrical pier is investigated.

*Corresponding author's email: Hamidi@nit.ac.ir

2. METHODOLOGY

The numerical model we have developed consists of two modules. The first one is the hydrodynamic module which simulates the flow field and solves Navier-Stokes equations. The second one is a morphological module which calculates the sediment transport and solves Newton's second law of motion. In this study, the sediment-laden flow is treated as a two-phase flow, which includes the water phase and the sediment phase. In Euler-Euler two-phase models, both the water and sediment phases are treated as a continuum. In the simulations to better represent the discrete property of sediment, Euler-Lagrange two-phase models are being used [2, 3]. In this investigation, the soft sphere model is applied to model collision or contact between particles. The soft sphere model is modeled by using mechanical elements such as a spring and a dash-pot. This model is also called the Discrete Element Method (DEM) [4].

Fig. 1 represents a schematic view of geometry and mesh in the numerical computational domain. The lower part of the domain is filled with particles and the upper 4 cm is filled with fluid passing over the sediment.

The boundary condition for the inlet velocity is set to be a fixed value of 0.3 m/s for the first part and 0.5 m/s for the second part of simulations. In the first part, a simple pier is modeled to validate the numerical model with the experimental results. In the second part, the pier is simulated with the presence of a collar at different levels.

Copyrights for this article are retained by the author(s) with publishing rights granted to Amirkabir University Press. The content of this article is subject to the terms and conditions of the Creative Commons Attribution 4.0 International (CC-BY-NC 4.0) License. For more information, please visit https://www.creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/legalcode.

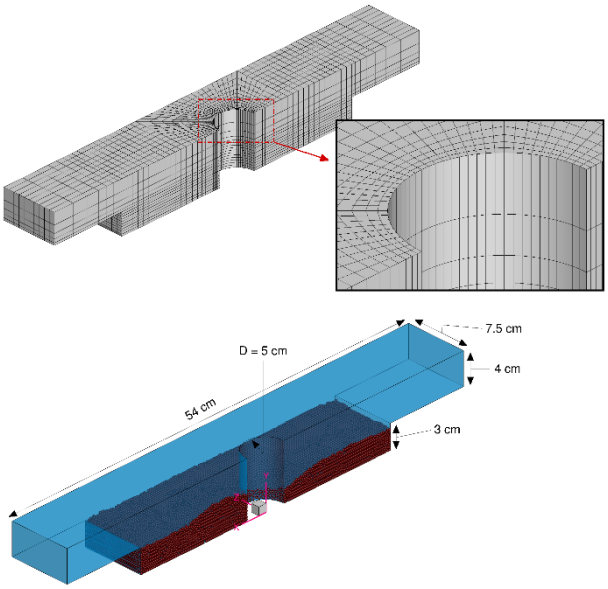


Fig. 1. The geometry and mesh of the numerical computational domain

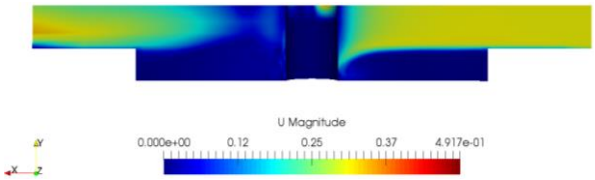


Fig. 2. The contour of velocity in the coupled approach on the plane of z=0 (m/s)

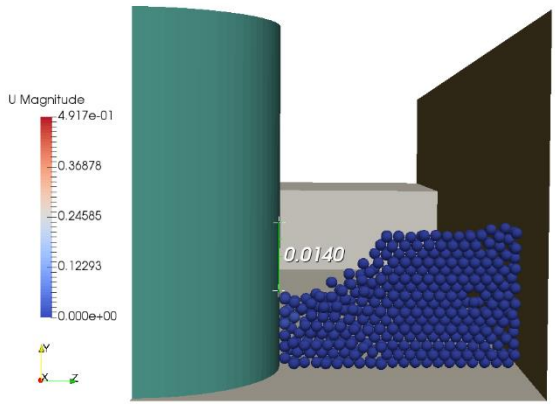


Fig. 3. Scoured bed profile and particle velocity on the cross-section (the plane of x=0) (m/s)

3. RESULTS AND DISCUSSION

In the first part of the simulation, the modified model is done using a four-way coupling and nonsphere drag model. Fig. 2 represents the contour of flow velocity on the plane of z=0. As the Figure shows, the flow velocity reaches zero in the zone of particles due to the coupling effect.

Fig. 3 represents the bed cross-section in a steady state. It shows that the maximum scour depth is 14 mm. Fig. 4 shows the comparison between numerical and experimental bed

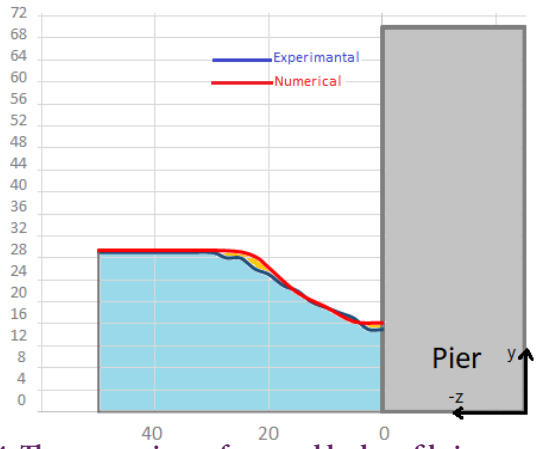


Fig. 4. The comparison of scoured bed profile in a coupled numerical model with the experimental model on the plane of x=0 (mm)

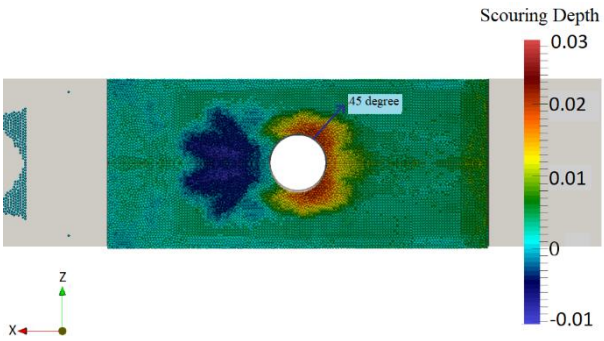


Fig. 5. The contour of particle distance from the bed surface (m)

cross-section in a steady state. The maximum scour depth in numerical and experimental results are almost equal. Finally, Fig. 5 represents the particle distance from the bed surface. It also shows the scouring hole and backfilling downstream of the pier.

In the second part of the simulation, in order to investigate the effect of the collar on scouring reduction, the scour depth is compared between a simple pier and pier with a collar. The numerical results show that the presence of a collar decreases the maximum depth of scouring. As a result, the collar at lower levels has a better performance in reducing scour.

4. CONCLUSIONS

In this study, a three-dimensional solver called pimpleLPTdenseFoam is used to simulate scouring around a vertical cylindrical pier. In this research, the $k-\omega_SST$ model has been selected as the turbulence model because of its better performance in the case of flows with a strong adverse pressure gradient. The experimental model was developed in the hydraulic laboratory of the Babol Noshirvani University of Technology. In order to obtain a suitable model for simulating scour around a cylindrical pier in the first part of the model, two scenarios were evaluated using the Eulerian-Lagrangian approach. In the first scenario, the discrete phase has no effect on the continuous phase and

sphere drag was being used but the results were not in good agreement with the experimental results. Therefore, in the second scenario, to improve the accuracy of the simulation, a four-way coupling and a nonsphere drag model were used as a modified model. The numerical results were in good agreement with the experimental results. The second part of this study has been done to investigate the effect of the collar on scouring reduction around a cylindrical pier. The result shows that as the collar goes up, both the maximum depth and the radius of the scour hole increases.

REFERENCES

[1] A.R. Zarrati, H. Gholami, M. Mashahir, Application of collar to control scouring around rectangular bridge piers, Journal of Hydraulic Research, 42(1) (2004) 97-103.

[2] L. Zhou, Numerical modelling of scour in steady flows, Doctoral dissertation, Université de Lyon, 2017.

[3] Y. Li, D.M. Kelly, M. Li, J.M. Harris, Development of a new 3D Euler-Lagrange model for the prediction of scour around offshore structures, Coastal Engineering Proceedings, 1(34) (2014) 31.

[4] J.D. Schwarzkopf, M. Sommerfeld, C.T. Crowe, Y. Tsuji, Multiphase flows with droplets and particles, CRC press, 2011.

HOW TO CITE THIS ARTICLE

T. Ebrahimi, M. Hamidi., A. Rahmani Firoozjaee, E. Khavasi, Numerical Investigation of Scour Around a Cylindrical Pier in Laboratory Scale Using Euler-Lagrange Approach, Amirkabir J. Mech Eng., 53(Special Issue 1) (2021) 101-104.

DOI: 10.22060/mej.2019.16679.6418

نشریه مهندسی مکانیک امیرکبیر

نشریه مهندسی مکانیک، دوره ۵۳، شماره ویژه ۱، سال ۱۴۰۰، صفحات ۴۱۱ تا ۴۲۶
DOI: 10.22060/mej.2019.16679.6418

شبیه‌سازی عددی پدیده آب‌شستگی اطراف پایه استوانه‌ای در مقیاس آزمایشگاهی با رویکردی اویلری-لاگرانژی

تینا ابراهیمی[۱]، مهدی حمیدی[۱*]، علی رحمانی فیروزجائی[۱]، احسان خواصی[۲]

[۱] دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه نوشیروانی بابل، بابل، ایران
[۲] دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه زنجان، زنجان، ایران

خلاصه: حضور پایه در مسیر جریان آب باعث ایجاد یک جریان سه‌بعدی پیچیده در اطراف پایه می‌شود که می‌تواند منجر به آب‌شستگی پیرامون پایه گردد. در این تحقیق مدل‌سازی مناسب پدیده آب‌شستگی پایه استوانه‌ای با استفاده از نرم‌افزار اپن‌فوم و داده‌های آزمایشگاهی به‌دست آمده از آزمایشگاه انجام شد. به این منظور از دو مدل برای شبیه‌سازی پدیده آب‌شستگی استفاده گردید. در این دو مدل عددی تاثیر کوپلینگ و مدل پسا بر پروفیل بستر بررسی شد. مدل اول با روش غیرکوپل و مدل پسا کروی و مدل دوم با روش کوپل‌شده و با تغییر مدل پسا کروی به غیرکروی انجام گردید. در مدل اول میزان خطا قابل توجه بوده است ولی در مدل دوم نتایج دارای تطابق خوبی با نتایج آزمایشگاهی می‌باشد. نتایج نشان می‌دهد که بیشترین مقدار عمق آب‌شستگی در مقطع عرضی در مدل عددی دوم و آزمایشگاهی با ۶ درصد اختلاف بر هم منطبق‌اند. در فاز دوم به منظور بررسی پارامترهای تاثیرگذار بر کاهش آب‌شستگی، از سه مدل عددی که شامل پایه ساده و پایه همراه با طوقه در دو تراز مختلف می‌باشد، استفاده شد. نتایج نشان می‌دهد که طوقه در تراز ۳/۵ و ۴ می‌توانند به ترتیب ۴۹/۲ درصد و ۲۹/۷ درصد از بیشترین عمق آب‌شستگی بکاهند.

تاریخچه داوری:
دریافت: ۱۲-۰۴-۱۳۹۸
بازنگری: ۱۸-۰۸-۱۳۹۸
پذیرش: ۱۸-۰۹-۱۳۹۸
ارائه آنلاین: ۰۹-۱۰-۱۳۹۸

کلمات کلیدی:
آب‌شستگی
پایه استوانه‌ای
مدل‌سازی عددی و آزمایشگاهی
اویلری-لاگرانژی
اپن‌فوم

۱- مقدمه

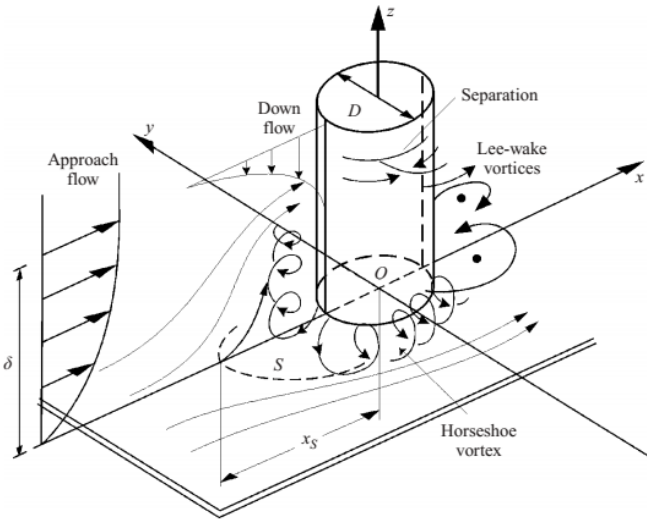
اهمیت استفاده از پل‌ها به عنوان کلید اساسی در حمل و نقل بسیار آشکار است. هرساله پل‌های فراوانی به علت آب‌شستگی[۱] اطراف پایه‌های خود فرو می‌پاشند. ریزش پل‌ها می‌تواند آسیب‌های جدی جانی و مالی به همراه داشته باشد. بنابراین مطالعه آب‌شستگی پل‌ها نقش مهمی را در سلامت آن‌ها ایفا می‌کند [۱]. هنگامی‌که پدیده آب‌شستگی محلی اتفاق افتد، یک گودال آب‌شستگی اطراف پایه پدیدار می‌شود. عمق آب‌شستگی محلی در جریانات شدید، توسعه می‌یابد و اگر به درستی پیش‌بینی نشود، تراز پایین گودال ناشی از آب‌شستگی به تراز اصلی فونداسیون پایه می‌رسد. با توسعه این پدیده و شکل‌گیری آب‌شستگی، پایداری و امنیت کلی پل در خطر خواهد بود. جریان سه‌بعدی اطراف یک پایه به علت جداشدگی و تشکیل گردابه‌های چندگانه بسیار پیچیده می‌باشد. این پیچیدگی به علت وجود اندرکنش دینامیکی بین جریان و مرز متحرک در طول گسترش گودال آب‌شستگی نیز تشدید می‌شود. پیش‌بینی دقیق الگوی آب‌شستگی اطراف پایه‌های پل به شدت وابسته به تحلیل ساختار جریان و مکانیزم حرکت رسوبات داخل گودال و خارج آن می‌باشد [۲].

به‌طور خلاصه، سرعت در جریان نزدیک‌شونده در بالادست پایه به سمت صفر میل می‌کند و این امر باعث افزایش در فشار می‌گردد.

1 Scouring

* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: Hamidi@nit.ac.ir

حقوق مؤلفین به نویسندگان و حقوق ناشر به انتشارات دانشگاه امیرکبیر داده شده است. این مقاله تحت لیسانس آفرینندگی مردمی (Creative Commons License) در دسترس شما قرار گرفته است. برای جزئیات این لیسانس، از آدرس https://www.creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/legalcode دیدن فرمائید.



شکل ۱. گردابه‌های ایجاد شده اطراف پایه [۳]
Fig. 1. Vortices formed around the pier

از آن‌جا که سرعت جریان از سطح جریان به سمت بستر کاهش می‌یابد، فشار هیدرودینامیک وارد بر پایه نیز از سطح جریان به سمت بستر کاهش می‌یابد. این گرادیان فشار باعث تشکیل جریان پایین‌رونده همانند یک جت قائم می‌گردد (شکل ۱). زمانی‌که این جریان پایین‌رونده به بستر برسد، حفره‌ای در جلوی پایه تشکیل می‌دهد و با چرخش به سمت بالا، تحت تاثیر جریان بالادست، یک سیستم گردابی پیچیده‌ای تشکیل می‌شود. این گردابه با گذشتن از کنار پایه، به سمت پایین‌دست توسعه می‌یابد. به علت شباهت این گردابه با نعل اسب، به آن گردابه نعل اسبی[1] می‌گویند. گردابه نعل اسبی تا زمانی‌که تنش برشی روی بستر کمتر از تنش برشی بحرانی گردد، حفره را گسترش می‌دهد. جداشدگی جریان در پشت پایه باعث ایجاد گردابه‌های برخاستی[2] می‌گردد. این گردابه‌ها ناپایدار بوده و در نهایت منجر به بلند شدن رسوبات بستر و تشکیل حفره آب‌شستگی می‌گردند [۱].

با توجه به مطالب بیان شده می‌توان گفت هنگامی‌که یک پایه استوانه‌ای عمودی روی بستر در مسیر جریان دائمی قرار می‌گیرد، مطابق شکل ۱ ابتدا یک گردابه نعل اسبی در جلوی پایه پل تشکیل می‌گردد و پس از آن یک الگوی جریان گردابه‌ای در قالب ریزش گردابه‌ای[3] در پشت پایه[4] ایجاد می‌شود و در نهایت خطوط جریان در کناره‌های پایه به هم می‌پیوندند. همچنین یک جریان پایین‌رونده ناشی از کاهش سرعت جریان در جلوی پایه تشکیل می‌شود. اگر بستر فرسایش‌پذیر باشد، تمامی تغییرات یاد شده منجر به افزایش انتقال رسوب و در نتیجه آب‌شستگی محلی اطراف پایه می‌گردد. با توسعه آب‌شستگی محلی و تبدیل آن به آب‌شستگی گسترده در اطراف پایه پایداری آن کاهش یافته و فروریزش آن محتمل می‌گردد [۳].

در سال‌های اخیر روش‌های مختلفی نظیر استفاده از پوشش سنگ‌ریزه‌ای[5]، ایجاد شکاف در پایه، استفاده از گروهی از ستون‌های کوچک در جلوی پایه و همچنین استفاده از طوقه‌ها برای کنترل آب‌شستگی اطراف پایه‌های پل مورد بررسی و آزمایش قرار گرفته‌اند. به‌طور کلی روش‌های کاهش آب‌شستگی را می‌توان به دو دسته روش‌های مستقیم و روش‌های غیرمستقیم تقسیم‌بندی نمود. روش‌های مستقیم که مبتنی بر افزایش مقاومت بستر بوده و معمولا با قرارگیری سنگ‌چین اطراف پایه‌ها ایجاد می‌گردند. اما در روش‌های غیرمستقیم به منظور کاهش تنش برشی وارد بر بستر، الگوی جریان در اطراف پایه تغییر داده می‌شود. این روش می‌تواند نسبت به روش قبل، مقرون به‌صرفه باشد [۱].

محققان در سرتاسر دنیا به‌طور گسترده مشکل آب‌شستگی محلی را از دیدگاه‌های مختلف و تحت شرایط متفاوت مورد مطالعه قرار داده اند. با توجه به نظرات محققین مهم‌ترین دلیل نگرانی در مورد پایداری فونداسیون پل‌ها و در نتیجه ناپایداری آن‌ها وقوع آب‌شستگی در اطراف پایه‌های پل می‌باشد [۴]. ملویل و رادکیوی [۵] در سال ۱۹۷۷ مطالعات آزمایشگاهی خود را به بررسی آب‌شستگی در پایه‌ها اختصاص دادند و به بررسی الگوی جریان آب، توزیع شدت آشفتگی، و توزیع تنش برشی در مرزها روی بستر متحرکی از رسوبات برای حالت‌های مختلف آب‌شستگی پرداختند. تحقیقات انجام شده توسط درگاهی [۶] در سال ۱۹۹۰ جزئیات بیشتری را شامل می‌شود. وی با مطالعه آزمایشگاهی آب‌شستگی پیرامون پایه استوانه‌ای نتیجه گرفت که مکانیزم آب‌شستگی با جدایش سه‌بعدی لایه مرزی بالادست و ریزش گردابه‌ای در پشت استوانه همراه است. همچنین نشان داد که با اتصال طوقه به پایه نمی‌توان به طور کامل از تشکیل گردابه‌ها جلوگیری کرد.

دنگ و پیگوت [۷] در سال ۱۹۹۲ به شبیه‌سازی عددی سه‌بعدی

1 Horseshoe Vortex
2 Wake Vortices
3 Vortex Shedding
4 Lee-Side
5 RipRap

جریان آشفته غیرقابل‌تراکم اطراف یک ایرفویل که در آن مشخصه‌های اصلی گردابه نعل اسبی مورد مطالعه قرار گرفت، پرداختند. کار آن‌ها یکی از نخستین تحقیقات انجام شده در این زمینه بر پایه معادلات میانگین‌گیری شده ناویر استوکس[1] در دینامیک سیالات محاسباتی بوده است. ریچاردسون و پانچانگ [۸] در سال ۱۹۹۸ جریان سه‌بعدی حول یک پایه استوانه‌ای حاوی گودال ناشی از آب‌شستگی را شبیه‌سازی کردند. با این حال، با مقایسه این تحقیق با نتایج عددی حاصل از ملویل و رادکیوی علاوه بر تطابق کمی و کیفی مناسب، اختلافاتی مشاهده گردید که می‌تواند با تغییرات مناسب در پارامترهای مدل عددی اصلاح گردد.

اولسن و ملایین [۹] در سال ۱۹۹۳ برای اولین بار شبیه‌سازی جریان را با مدل‌سازی آب‌شستگی در پایه استوانه‌ای ترکیب کردند. آن‌ها برای حل معادلات ناویر-استوکس از روش احجام محدود و از مدل آشفتگی $k-\varepsilon$ استفاده کردند. نتایج عددی تطابق نسبتا خوبی با داده‌های آزمایشگاهی داشت. از آنجایی‌که از ترم‌های گذرا[2] در مدل عددی چش‌م‌پوشی شده است، ممکن است این مدل قادر به مدل‌سازی دقیق پدیده آب‌شستگی در شرایط مختلف نباشد.

موزامیل و همکاران [۱۰] در سال ۲۰۰۴ به مطالعات آزمایشگاهی خصوصیات اصلی گردابه نعل اسبی طی فرآیند آب‌شستگی پرداختند و نتیجه گرفتند که شکل گردابه نعل اسبی به عدد رینولدز پایه وابسته است. گردابه در رینولدزهای پایین (کوچکتر از ۵۰۰۰)، دایره‌ای بوده و با افزایش رینولدز بیضوی شکل می‌گردند [۱۱]. رولاند و همکاران [۳] در سال ۲۰۰۵ به شبیه‌سازی عددی و آزمایشگاهی جریان و آب‌شستگی حول پایه استوانه‌ای پرداختند. آن‌ها با استفاده از رویکرد اویلری-اویلری و مدل آشفتگی $k-\omega$ اثر سه پارامتر ضخامت لایه مرزی، عدد رینولدز و زبری بستر روی گردابه نعل اسبی را بدون در نظرگیری سطح آزاد، بررسی نمودند. همچنین به ازای مقادیر مختلف از این سه پارامتر تنش برشی در بستر محاسبه شد. نتایج نشان داد که مدل عددی تمامی خصوصیات اصلی فرآیند آب‌شستگی را به خوبی مدل می‌کند.

لیو و گارسیا [۱۲] در سال ۲۰۰۸ یک مدل عددی برای شبیه‌سازی آب‌شستگی حول پایه‌های پل با استفاده از روش کسر حجمی سیال[3] برای ردیابی سطح آزاد بین آب و هوا و روش شبکه متحرک برای اصلاح دامنه محاسباتی شبیه‌سازی در نرم‌افزار اپن‌فوم توسعه دادند. آن‌ها هم‌چنین مدل $k-\varepsilon$ و مدل ارائه شده توسط انگلوند و فردسو در سال ۱۹۷۶ را برای مدل انتقال رسوب بار بستر، انتخاب کردند. نتایج شبیه‌سازی برای میدان جریان و پروفیل‌های آب‌شستگی با اندازه‌گیری‌ها در تطابق خوبی بود. با این حال، در مدل آن‌ها برای محدودسازی شیب بستر در حفره آب‌شستگی، مکانیزم لغزش ماسه‌ای لحاظ نشد.

آقایی و حکیم‌زاده [۱۳] در سال ۲۰۱۰ یک مدل عددی سه‌بعدی به منظور شبیه‌سازی جریان آشفته اطراف یک پایه استوانه‌ای را بررسی کردند. در این شبیه‌سازی از دو نوع مدل آشفتگی استفاده شده است. مدل اول با استفاده از معادلات استاندارد $k-\varepsilon$ و مدل دوم با استفاده از مدل شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ. نتایج شبیه‌سازی حاصل از این دو مدل با هم مقایسه گردیده و با داده‌های آزمایشگاهی ارائه شده توسط رولاند و همکاران و درگاهی اعتبارسنجی شد. نتایج اعتبارسنجی نشان می‌دهد شدت و طول گردابه‌ها بسیار وابسته به مدل آشفتگی مورد استفاده می‌باشد و به علت خاصیت دوره‌ای بودن ریزش‌های گردابه‌ای، مدل شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ با دقت بیشتری می‌تواند میدان جریان و گردابه‌های نعل اسبی و برخاستی را شبیه‌سازی کند. ولی با این حال مدل $k-\varepsilon$ نیز تخمین مناسبی از گسترش حفره آب‌شستگی ارائه می‌دهد.

راموس و همکاران [۱۴] در سال ۲۰۱۴ به شبیه‌سازی عددی جریان اطراف یک پایه در دو حالت بستر ثابت و بستر تعادلی با استفاده از نرم‌افزار اپن‌فوم[4] پرداختند. حالت اول مربوط به شروع فرآیند آب‌شستگی بوده و حالت دوم هندسه بستر پس از رسیدن به عمق تعادل آب‌شستگی که در آزمایشگاه به‌دست آمده را بررسی می‌کند. در این مدل میدان سرعت و گردابه‌ها، تنش برشی بستر و ضریب پسا روی پایه با استفاده از مدل آشفتگی شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ[5] بررسی می‌گردد. در نهایت نتایج حاصل از نرم‌افزار اپن فوم با نتایج حاصل از شبیه‌سازی با نرم افزار فلوئنت به‌دست آمده از پژوهش راموس مقایسه شد.

خسرونژاد و همکاران [۱۵] در سال ۲۰۱۲ به شبیه‌سازی‌های

1 Reynolds Averaged Navier Stokes (RANS)
2 Transient
3 Volume of Fluid
4 OpenFOAM
5 Large Eddy Simulation (LES)

عددی و آزمایشگاهی آب‌شستگی ایجاد شده توسط شکل‌های مختلفی از پایه‌های پل با استفاده از مدل آشفتگی $k-\omega$ با رویکرد اویلری-اویلری، پرداختند. مدل‌سازی انتقال رسوب مشابه با تحقیق انجام شده توسط خسرونژاد و همکاران در سال ۲۰۱۱ بود. مطالعه آن‌ها نشان داد که ضخامت لبه پایه، یک تاثیر مهمی در پیش‌بینی مدل شبیه‌سازی شده دارد. بایکال و همکاران [۱۸-۱۶] در سال ۲۰۱۵ و بایکال و همکاران در سال ۲۰۱۷ با مدلی عددی مشابه کار فورمن و همکاران در سال ۲۰۱۴، جریان و آب‌شستگی پیرامون یک پایه عمودی در معرض جریان همراه با امواج و فرآیند انباشته سازی رسوبات در پشت پایه ناشی از آب‌شستگی را با رویکرد اویلری-اویلری بررسی نمودند. نتایج شبیه‌سازی با اندازه‌گیری‌های آزمایشگاهی رولاند و همکاران، سومر و همکاران در سال ۱۹۹۷ و سومر و همکاران در سال ۲۰۱۲ مقایسه شد تا مدل اعتبارسنجی گردد و تاثیرات بار معلق، مشخصات جریان ناپایدار مثل گردابه نعل اسبی و گردابه برخاستی روی آب‌شستگی مورد بحث قرار گرفت.

عبدالعزیز و همکاران [۱۹] در سال ۲۰۱۰ از نرم‌افزار فلوتریدی[1] برای شبیه‌سازی میدان جریان و از یک مدل انتقال رسوب برای شبیه‌سازی رسوب استفاده نمود. اثرات شیب بستر و مکانیزم لغزش ماسه‌ای نیز در نظر گرفته شد. آن‌ها تطابق خوبی با داده‌های میدان جریان و عمق آب‌شستگی نتیجه گرفتند اما شیب در پایین‌دست تپه بیشتر تخمین زده شده است. لی و همکاران [۲۰] در سال ۲۰۱۴ یک مدل سه‌بعدی با استفاده از نرم‌افزار اپن‌فوم ارائه نمودند. مدل آن‌ها یک مدل سه فاز بوده و سطح آزاد نیز در آن لحاظ شده است. این پژوهش با بررسی استوانه افقی و عمودی و گسترش آب‌شستگی حاصل از آن انجام گرفت. اندرکنش بین فاز سیال، فاز رسوبات و سازه‌ها توسط مدل به خوبی محاسبه شد.

شیم و همکاران [۲۱] در سال ۲۰۱۶ به شبیه‌سازی عددی اطراف پایه پل به روش اویلری-لاگرانژی با استفاده از مدل شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ در نرم‌افزار اپن‌فوم پرداختند. به منظور اعتبارسنجی، نتایج عددی با نتایج آزمایشگاهی مقایسه شد. نتایج توزیع سرعت ذرات در مدل عددی و آزمایشگاهی بر هم منطبق بوده ولی اندازه سرعت ذرات با خطا همراه بوده است. در این تحقیق دامنه محاسباتی کوچک بوده و زمان اجرا نیز بسیار کوتاه بوده است.

1 Flow3D

بررسی مرور بر تحقیقات پیشین نشان می‌دهد، اغلب شبیه‌سازی‌هایی که تاکنون برای مطالعه آب‌شستگی پایه‌های پل انجام گرفته است با استفاده از دیدگاه اویلری-اویلری می‌باشد که در آن‌ها هر دو فاز سیال و رسوب پیوسته در نظر گرفته می‌شود. در این پژوهش به منظور احتساب خاصیت ذاتی گسسته بودن رسوبات، شبیه‌سازی آب‌شستگی پیرامون پایه استوانه‌ای به روش اویلری-لاگرانژی و با استفاده از مدل آشفتگی $k-\omega$ در نرم‌افزار اپن‌فوم مدل می‌شود. نتایج مدل‌سازی با تغییر نوع کوپلینگ و مدل پسا بررسی می‌شود. به این منظور اثرات درنظرگیری کوپلینگ چهار طرفه و تغییرات مدل پسا در نتایج مدل عددی بررسی شده و با نتایج حاصل از مدل آزمایشگاهی مقایسه می‌گردد. در این راستا از نتایج مدل آزمایشگاهی مربوط به پدیده آب‌شستگی که در آزمایشگاه هیدرولیک دانشکده عمران دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل ساخته شده است، استفاده می‌گردد. پس از آن در فاز دوم با قرار دادن طوقه در فواصل مختلف از بستر، تاثیر حضور طوقه و تراز نصب آن در کاهش آب‌شستگی پایه استوانه‌ای بررسی می‌گردد و پروفیل بستر در ترازهای مختلف طوقه با حالت پایه بدون طوقه مقایسه می‌شود

.

۲- الگوسازی نظری یا تجربی

۲-۱- روش حل عددی و معادلات حاکم

مدل‌های عددی برای شبیه‌سازی آب‌شستگی از حل‌گر هیدرودینامیک برای حل میدان جریان و حلگر ریخت‌شناسی برای انتقال رسوبات استفاده می‌کند. حلگر هیدرودینامیک با عدد کورانت معادل ۰/۸ معادلات ناویر استوکس را برای میدان جریان حل می‌کند. جریانات حاوی رسوب را می‌توان یک جریان دو فازی در نظر گرفت که شامل فاز سیال و فاز رسوبات می‌باشد. یا می‌توان آن را به‌صورت تک‌فاز در نظر گرفت. در مقایسه با مدل‌های تک فاز، رویکرد دو فازی به علت تفسیر بهتر اندرکنش‌های جریان با رسوب، رسوب با رسوب و جریان با سازه، مقبولیت بیشتری دارد. مدل‌های دو فاز به سه گروه اویلر-اویلر، اویلر-لاگرانژ و مدل‌های تماما لاگرانژ تقسیم‌بندی می‌شوند. در مدل‌های اویلر-اویلر، هر دو فاز سیال و جامد پیوسته در نظر گرفته می‌شوند و معادلات پیوستگی و مومنتوم برای هر دو فاز در یک قالب اویلری حل می‌گردد. در مدل‌های اویلری کمیت‌ها عموما بر پایه میانگین‌گیری سلولی محاسبه می‌شوند و در مدل کردن

تغییرشکل‌های پیچیده ضعیف هستند. در مدل‌های تماما لاگرانژی، خاصیت ذاتی گسسته بودن رسوب با دقت بیشتری لحاظ می‌گردد. مدل‌های لاگرانژی نیازمند منابع محاسباتی قوی هستند. با انتخاب روش‌های اویلری-لاگرانژی، با صرفه‌جویی در هزینه‌های محاسباتی می‌توان خواص ذاتی ذرات رسوب را نیز در نظر گرفت [۱۶ و ۲۰].

در این پژوهش، بررسی دو فازی (فاز پیوسته سیال و فاز گسسته ذرات) با رویکردی اویلری-لاگرانژی صورت گرفته و اثر سطح آزاد (فاز هوا) در نظر گرفته نشده است. به این منظور، ابتدا حلگر استاندارد پیمپل‌فوم[1] در نسخه ۴ نسخه استاندارد اپن‌فوم انتخاب شد. این حلگر یک حلگر گذرا برای جریانات آشفته غیرقابل‌تراکم است و با توسعه برنامه، کتابخانه اینترمدیت[2] به این حلگر برای بررسی حرکت رسوبات با رویکرد لاگرانژی اضافه گردید و در غالب حلگر اصلاح شده‌ای با نام pimpleLPTdenseFoam تدوین شد. معادلات حاکم بر فاز پیوسته سیال شامل معادلات پیوستگی و معادلات میانگین‌گیری شده ناویر استوکس می‌باشد که به‌صورت زیر محاسبه می‌گردد [۲۲]:

$$\vec{\nabla}.\vec{U} = 0 \tag{۱}$$

$$\frac{\partial \vec{U}}{\partial t} + \vec{U}.\vec{\nabla}(\vec{U}) = -\frac{1}{\rho}\vec{\nabla}p + \vec{R}_P + \vec{\nabla}.\tau \tag{۲}$$

که در آن U سرعت سیال، τ تنش برشی سیال و R_p ترم مربوط به اندرکنش بین ذرات و سیال (تبادل مومنتوم با فاز ذرات) می‌باشد که از نیروهای پسا ذرات برای هر سلول محاسبه می‌گردد. در رویکرد اویلر-لاگرانژ، معادلات بقا برای فاز سیال حل می‌گردد، درحالی‌که در فاز حاوی ذرات معادلات حرکت نیوتن برای یافتن مسیر حرکت ذرات حل می‌شود. با حل معادله زیر، مسیر حرکت ذرات محاسبه می‌گردد [۲۳]:

$$m_p \frac{d\vec{U}_p}{dt} = \vec{F}_{particle} \tag{۳}$$

که در آن m_p جرم ذره، U_p سرعت ذره و $F_{particle}$ برآیند نیروهای وارد بر ذره می‌باشد. تعادل نیرو برای یک ذره کروی موجود در سیال لزج به‌صورت زیر نوشته می‌شود [۲۴]:

$$\vec{F}_{Particle} = \vec{F}_D + \vec{F}_P + \vec{F}_g + \vec{F}_n + \vec{F}_t \tag{۴}$$

که در آن F_D نیروی پسا وارده از فاز سیال به ذره، F_P نیروی فشاری، F_g نیروی وزن و شناوری، F_n نیروی تماسی نرمال و F_t نیروی تماسی مماسی وارد بر ذرات می‌باشند. حدود ۸۰ درصد از کلیه نیروهای وارده به ذرات به نیروی پسا اختصاص دارد. لذا این نیرو مهم‌ترین نیروی وارده به ذرات است و طبق رابطه زیر محاسبه می‌گردد [۲۴]:

$$\vec{F}_D = C_D \frac{\pi D_p^2}{8}\rho_f (\vec{U} - \vec{U}_p)\left|\vec{U} - \vec{U}_p\right| \tag{۵}$$

که در آن D_p قطر ذره، ρ_f چگالی سیال و ضریب پسا می‌باشد. نیروی وزن و شناوری برابر است با [۲۳]:

$$\vec{F}_g = m_p \vec{g}(1 + \frac{\rho_f}{\rho_p}) \tag{۶}$$

که در آن ρ_p چگالی ذره می‌باشد. نیروی ناشی از گرادیان فشار برابر است با [۲۳]:

$$\vec{F}_p = \frac{1}{6}\pi D_p^3 \vec{\nabla}P \tag{۷}$$

۲-۲- مدل‌سازی نیروهای تماسی

برای مدل‌سازی برخورد یا تماس می‌توان از دو مدل کره سخت[3] و یا مدل کره نرم[4] استفاده کرد. مدل کره نرم با استفاده از المان‌های مکانیکی مانند فنر و میراگر مدل‌سازی می‌شود. در مدل کره نرم کل فرآیند برخورد یا تماس با انتگرال‌گیری عددی از معادلات حرکت حل می‌گردد. این مدل نسبت به مدل کره سخت زمان محاسباتی خیلی بالاتری دارد اما کاربرد مدل کره نرم وسیع‌تر از مدل کره سخت می‌باشد. در این پژوهش برای مدل‌سازی لاگرانژی ذرات رسوب از روش کره نرم استفاده شده است. در این روش مطابق شکل ۲ به جای سر و کار داشتن با تغییر شکل، ذرات در تماس با هم تحت تاثیر نیروهای خارجی وادار به هم‌پوشانی می‌شوند. مسیر هم‌پوشانی δ شامل دو مولفه می‌باشد: مولفه نرمال δ_n و مولفه مماسی δ_t [۲۵].

طبق روابط موجود در فصل پنجم مرجع [۲۵]، مدل نیرو را

1 PimpleFoam
2 Intermediate
3 Hard Sphere Model
4 Soft Sphere Model

می‌توان به مولفه‌های جدا برای نیروی مماسی و نرمال تقسیم کرد که در آن فنر، میراگر و سایر المان‌های مکانیکی بین ذره i و ذره j جایگذاری شده است. اثرات فنر، میراگر و لغزنده اصطکاکی روی حرکت ذره توسط پارامترهای سختی فنر k، ضریب میرایی η، ضریب اصطکاک f، بیان می‌شود. مولفه نرمال نیروی تماسی F_n وارده بر ذره i از برآیند نیروهای ایجاد شده توسط فنر و میراگر به‌دست می‌آید. براساس قضیه تماس هرتزین[1]، در کره‌های سه‌بعدی نیروی نرمال با توان $3/2$ جابه‌جایی تغییر می‌کند. بنابراین نیروی F_n وارده بر ذره کروی i با رابطه (۸) بیان می‌شود:

$$\vec{F}_n = \left(-k_n \delta_n^{3/2} - \eta_{nj} \vec{G}.\vec{n}\right)\vec{n} \qquad (۸)$$

در رابطه فوق δ_n جابه‌جایی ذره ناشی از نیروی نرمال، G بردار سرعت ذره i نسبت به ذره j، $(G = V_i - V_j)$ و n بردار یکه در جهت خط واصل مراکز دو ذره می‌باشد. مولفه مماسی نیروی تماسی نیز طبق رابطه (۹) بیان می‌شود:

$$\vec{F}_t = -k_t \vec{\delta}_t - \eta_{tj} \vec{G}_{ct} \qquad (۹)$$

که در آن k_t و η_{tj} به ترتیب سختی و ضریب میرایی در جهت مماسی می‌باشند. G_{ct} سرعت لغزش نقطه تماس است و طبق رابطه (۱۰) محاسبه می‌شود:

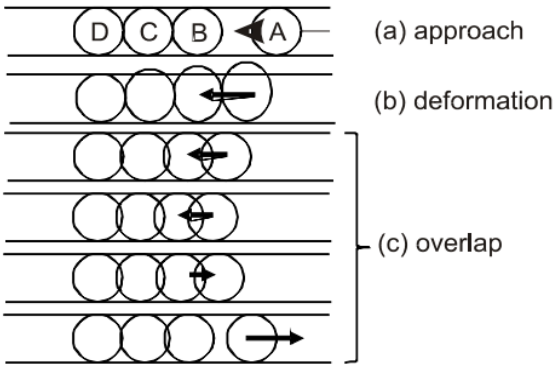
$$\vec{G}_{ct} = \vec{G} - \left(\vec{G}.\vec{n}\right)\vec{n} + a_i \vec{\omega}_i \times \vec{n} + a_j \vec{\omega}_j \times \vec{n} \qquad (۱۰)$$

که در آن a_i و a_j به ترتیب شعاع ذره i و j و ω سرعت زاویه‌ای ذره می‌باشند [۲۵].

۲-۳- انتخاب مدل آشفتگی

انتخاب مدل آشفتگی مناسب برای شبیه‌سازی آب‌شستگی پایه‌های پل از ضروریات تحقیق در مورد این پدیده می‌باشد. از آن‌جا که گرادیان فشار معکوس قوی منجر به تشکیل گردابه نعل اسبی می‌گردد، رولاند و همکاران مدل $k-\omega$ را به علت عملکرد بهتر آن در جریانات لایه مرزی با گرادیان فشار معکوس قوی، به عنوان مدل آشفتگی در شبیه‌سازی آب‌شستگی پیشنهاد کرده‌اند. در مطالعات پیشین سه نسخه از مدل‌های $k-\omega$ موجود است که

1 Hertzian Contact Theory



شکل ۲. هم‌پوشانی ذرات در مدل کره نرم [۲۵]
Fig. 2. Particle overlap in the soft sphere model

شامل مدل اصلی $k-\omega$ مربوط به ویلکاکس[2]، مدل $k-\omega_BSL$ [3] و مدل $k-\omega_SST$ [4] می‌باشند. دو مدل آخر مورد بحث توسط منتر در سال ۱۹۹۳ برای بهبود مدل اصلی ویلکاکس توسعه یافت تا برای جریان‌های با گرادیان فشار معکوس دقت بیشتری حاصل شود. نتایج نهایی تحقیقات منتر نشان می‌دهد، با استفاده از مدل $k-\omega_SST$ دقیق‌ترین نتایج برای شبیه‌سازی این پدیده حاصل می‌گردد. در حالی‌که در مدل $k-\varepsilon$ نتایج ضعیف‌تری نسبت به هر سه مدل $k-\omega$ در جریانات با گرادیان فشار معکوس، حاصل گردیده است. به همین دلیل در این تحقیق مدل $k-\omega_SST$ که در آن اثرات قوی فشار معکوس وجود دارد، برای شبیه‌سازی این رویداد انتخاب شده است. علت اصلی تشکیل گردابه نعل اسبی در جلوی پایه نیز همین اثر قوی فشار معکوس می‌باشد. در مدل $k-\omega$ کمیت k همان انرژی جنبشی آشفتگی و کمیت ω نیز اتلاف مشخصه انرژی جنبشی آشفتگی می‌باشد [۳].

۲-۴- تعریف مدل عددی و آزمایشگاهی

در این پژوهش از حلگر اویلری-لاگرانژی درنرم‌افزار متن باز اپن‌فوم برای شبیه‌سازی مساله مورد بحث استفاده شده است. مطابق شکل ۴ شبیه‌سازی‌ها در یک دامنه‌ای که متشکل از چاله‌ای با ابعاد ۰/۳۴، ۰/۱۵ و ۰/۰۳ متر و کانالی مستطیلی به ابعاد ۰/۵۵، ۰/۱۵ و ۰/۰۴ متر که به ترتیب طول، عرض و ارتفاع را بیان می‌کند، می‌باشد. چاله

2 Wilcox
3 Baseline Model
4 Shear-Stress Transport

شامل ۱۳۲۱۰۰ ذره به قطر ۲/۴ میلی‌متر، چگالی ۲۶۵۰ کیلوگرم بر مترمکعب، مدول یانگ 5×10^{5} پاسکال و نسبت پواسون معادل ۰/۴۵ می‌باشد. عمق رسوب برابر با ۳ سانتی‌متر و ارتفاع آب گذرنده از روی آن ۴ سانتی‌متر می‌باشد. چگالی آب 10^{3} کیلوگرم بر مترمکعب و ویسکوزیته سینماتیکی 1×10^{-6} مترمربع بر ثانیه می‌باشد. استوانه‌ای به قطر ۵ سانتی‌متر در وسط کانال قرار گرفته است.

به منظور بررسی حساسیت‌سنجی پاسخ‌ها نسبت به گسسته‌سازی دامنه محاسباتی و انتخاب شبکه‌بندی مناسب، پروفیل سرعت در صفحه $X=0$ در چهار شبکه‌بندی متفاوت با پاسخ‌ها در ریزترین شبکه‌بندی مقایسه و خطای نسبی طبق رابطه زیر محاسبه شده است [۲۶]:

$$O.E=\frac{\sum_{j=1}^{n}\left|\varphi_{ref}^{j}-\varphi^{j}\right|}{\sum_{j=1}^{n}\left|\varphi_{ref}^{j}\right|} \qquad (۱۱)$$

که در آن φ_{ref}^{j} مقدار مرجع کمیت مورد نظر (جواب ریزترین شبکه) در گره j ام و φ^{j} مقدار آن کمیت (سرعت) در شبکه مورد نظر می‌باشد. تغییرات درصد خطا با افزایش تعداد شبکه در جدول ۱ و نمودار حاصل از آن در شکل ۳ نشان داده شده است:

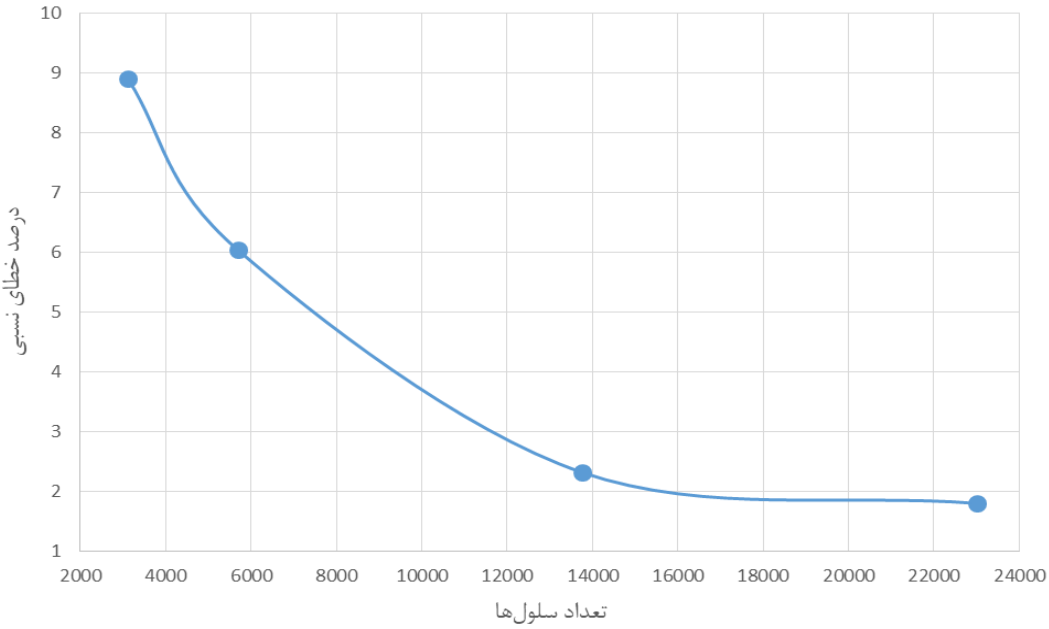
مطابق شکل دامنه عددی شامل ۲۳۰۰۰ سلول دارای درصد خطای قابل قبولی به منظور انتخاب شبکه‌بندی مناسب می‌باشد که در آن به علت تقارن در صفحه $Z=0$ نصف دامنه مدل می‌شود. شبکه‌بندی سازمان‌یافته بوده و با نزدیک شدن به دیواره‌ها و پایه ریزتر می‌گردند (شکل ۴).

به منظور اعمال شرایط مرزی، برای مرز بالای دامنه محاسباتی از شرط مرزی تقارن که در آن کلیه گرادیان‌های عمود بر مرز صفر بوده و هیچ جریانی از آن عبور نمی‌کند، استفاده شده است. همچنین در کلیه دیواره‌ها و در سطح پایه استوانه‌ای برای میدان سرعت شرط مرزی عدم لغزش، برای k و ω از توابع دیواره برای سایر کمیت‌ها از شرط مرزی گرادیان صفر استفاده شده است. شرط مرزی ورودی، سرعت ثابت و شرط مرزی همرفتی برای خروجی محدوده مدل‌سازی

جدول۱. تغییرات درصد خطای نسبی با افزایش تعداد سلول‌ها

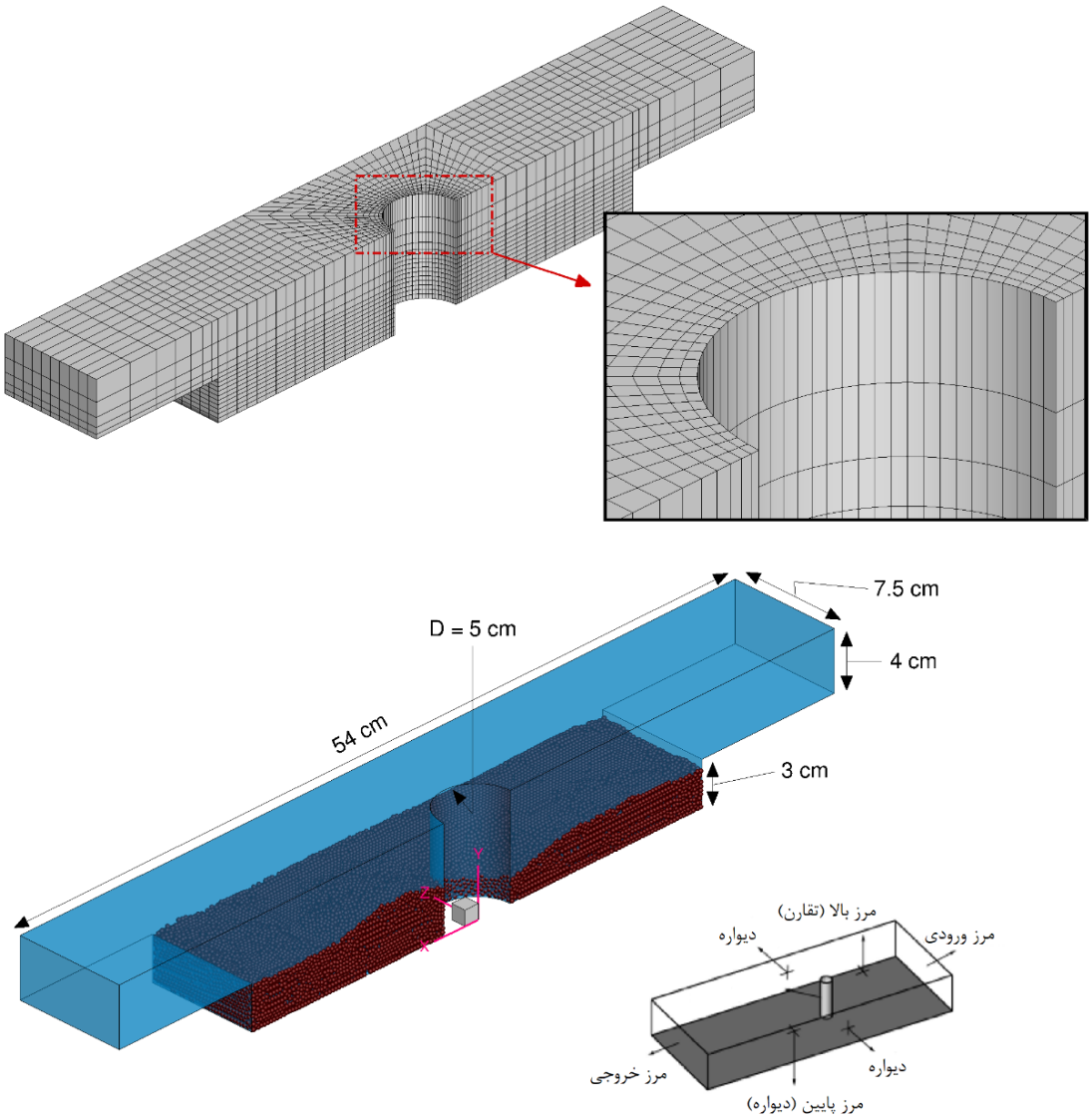
Table 1. The table of changes in the percentage of relative error by increasing cell number

تعداد سلول‌ها	۳۱۲۰	۵۶۸۸	۱۳۷۶۰	۲۳۰۰۰
درصد خطای نسبی	۸/۹۰۵۲۲۹	۶/۰۴۵۷۵۲	۲/۳۱۴۸۱۵	۱/۷۹۷۳۸۶



شکل ۳. نمودار کاهش درصد خطای نسبی با افزایش تعداد سلول‌ها

Fig. 3. The diagram of reduction in the percentage of relative error by increasing cell number



شکل ۴. هندسه و نحوه شبکه‌بندی دامنه حل عددی
Fig. 4. The geometry and mesh of the numerical computational domain

در نظر گرفته شده است. همچنین به علت تقارن در فیزیک مسئله و برای صرفه‌جویی در هزینه‌های محاسباتی نصف دامنه مورد اشاره شبیه‌سازی شده است. از آنجایی‌که رسوبات درون چاله محاصره شده‌اند، تنها با دیواره در تماس می‌باشند و طبق شرط مرزی ریباند[1] ذرات با برخورد به دیواره با ۹۷ درصد انرژی اولیه خود، برمی‌گردند [۲۳].

مدل عددی بررسی شده در این پژوهش شامل دو فاز مجزا می‌باشد. در فاز اول به منظور اعتبارسنجی مدل عددی با نتایج آزمایشگاهی، پایه ساده مدل شده است. سرعت جریان ورودی به کانال ۰/۳ متر بر ثانیه می‌باشد. در فاز دوم، پایه ساده و پایه با حضور طوقه در ترازهای مختلف با سرعت ورودی ۰/۵ متر بر ثانیه شبیه‌سازی شده است. به منظور بررسی اثر تراز نصب طوقه در عمق آب‌شستگی، مدل‌های پایه با طوقه‌هایی به قطر ۱۰ سانتی‌متر در ارتفاع‌های ۳/۵ و ۴ سانتی‌متر از کف دامنه محاسباتی شبیه‌سازی گردید. همان‌طور که اشاره شد، در این پژوهش مدل آشفتگی $k-\omega_SST$ به علت عملکرد بهتر اینگونه مدل‌ها در جریانات لایه مرزی با گرادیان فشار معکوس قوی، به عنوان مدل آشفتگی انتخاب گردیده است.

1 Rebound

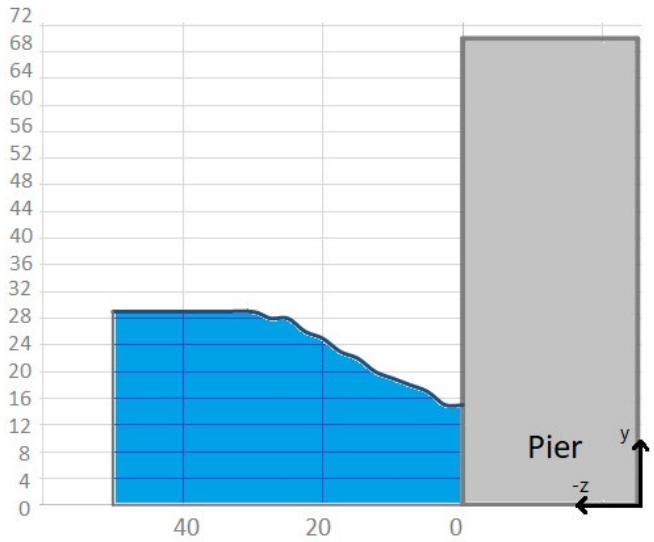
مدل آزمایشگاهی مورد بررسی در این مقاله در آزمایشگاه هیدرولیک دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل ساخته و بهره‌برداری شده است. در این آزمایش از رسوبات با ماسه‌های رد شده از الک شماره ۸ و مانده روی الک شماره ۱۲، یعنی ذراتی با قطرهای بین ۱/۶ تا ۲/۴ میلی‌متر استفاده شده است. دبی ورودی به کانال برابر ۲۶ مترمکعب بر ساعت بوده که سرعت جریان ورودی برای عرض ۶۰ سانتی‌متری کانال و عمق ۴ سانتی‌متری جریان را برابر با ۰/۳ متر بر ثانیه به‌دست می‌دهد. پایه‌ای استوانه‌ای به قطر ۵ سانتی‌متر در مسیر جریان و در مرکز آن قرار گرفته است. شکل ۵ محدوده بررسی شده در این آزمایش را نشان می‌دهد که مشابه دامنه مورد استفاده در مدل‌سازی عددی می‌باشد.

شکل ۵. مدل آزمایشگاهی قبل شروع جریان
Fig. 5. The experimental model before the flow starts

۳- نتایج و بحث

در مدل آزمایشگاهی پس از انجام آزمایش و تشکیل حفره آب‌شستگی تعادلی با بررسی مقطع عرضی گذرنده از مرکز پایه (صفحه $X = ۰$) عمق آب‌شستگی به فواصل نیم سانتی‌متری توسط سوزن مدرج قرائت شد. دقت سوزن مدرج ۰/۱ میلی‌متر می‌باشد. در نهایت عمق بیشینه تعادلی آب‌شستگی برابر ۱/۵ سانتی‌متر مشاهده و ثبت گردید. شکل ۶ مدل آزمایشگاهی را پس از اتمام آزمایش نشان می‌دهند. همان‌طور که در شکل مشخص است، حفره حاصل از پدیده آب‌شستگی اطراف پایه تشکیل گردید. شکل ۷ پروفیل عرضی سطح بستر در مقطع عبوری از مرکز استوانه (صفحه $X = ۰$) را در مدل آزمایشگاهی نشان می‌دهد. با توجه به شکل ۷، تا فاصله ۲/۷ سانتی‌متری از کنار پایه، بستر تحت تاثیر قرار گرفته و آب‌شسته

شکل ۶. حفره حاصل از آب‌شستگی در جلو پایه و انباشته شدن رسوب در پشت آن
Fig. 6. Scour hole in front of the pier and backfilling on the back of the pier



شکل ۷. پروفیل بستر آب‌شسته حاصل از مدل آزمایشگاهی در صفحه $X=0$ (میلی‌متر)

Fig. 7. Scoured bed profile obtained from the experimental model on the plane of x=0 (mm)

می‌شود.

برای پیش‌بینی الگوهای فاز گسسته می‌توان بر مبنای یک میدان جریان فاز پیوسته ثابت (یک روش غیرکوپل) استفاده کرد و یا می‌توان اثر فاز گسسته روی فاز پیوسته را لحاظ نمود (روش کوپل‌شده). در روش دوم، الگوی جریان فاز پیوسته از فاز گسسته تاثیر می‌پذیرد و بالعکس [۲۷]. همچنین مدل پسا یکی از پارامترهای تاثیرگذار در رفتار ذرات و شسته شدن آن‌ها می‌باشد. در فاز اول مدل عددی تاثیر کوپلینگ و مدل پسا طی دو شبیه‌سازی بررسی شده و نتایج حاصل از آن‌ها با مدل آزمایشگاهی مقایسه می‌گردد. یکی از مفاهیم مهم در آنالیز جریانات چندفازی، کوپلینگ است. اگر جریان یک فاز بر فاز دیگر اثر بگذارد در حالی‌که اثر معکوسی وجود نداشته باشد، جریان کوپلینگ یک‌طرفه[1] نام دارد. اگر یک اثر متقابل بین جریانات هر دو فاز وجود داشته باشد، جریان کوپلینگ دوطرفه[2] می‌باشد [۲۵].

۳-۱- نتایج مدل عددی فاز اول

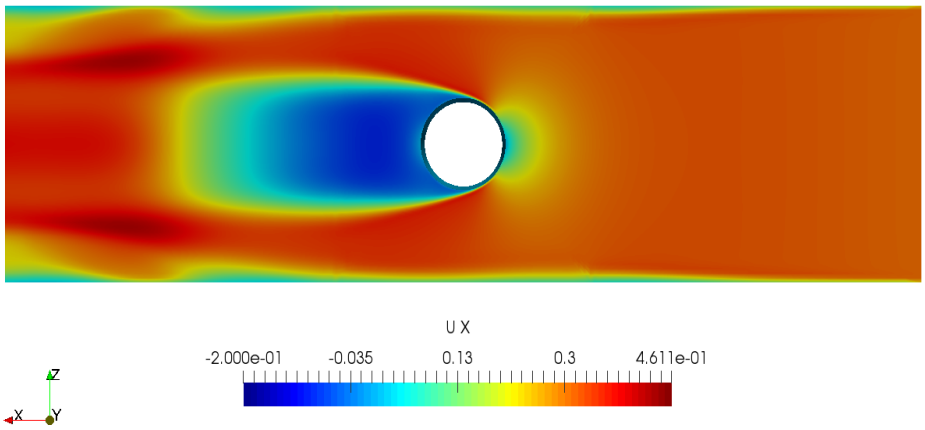
در مدل اول اثر سیال بر روی ذره و اندرکنش (برخورد) بین ذرات در محاسبات لحاظ می‌گردد ولی به منظور کاهش هزینه محاسباتی، کوپلینگ بین فاز سیال و فاز ذرات در نظر گرفته نمی‌شود. این به آن معنی است که ذرات اثری روی جریان نخواهند گذاشت و رفتار جریان حول استوانه به گونه‌ای است که انگار رسوبی در کف دامنه وجود ندارد ولی جریان روی ذرات اثر گذاشته و باعث آب‌شستگی آن می‌شود. همچنین در این مدل از مدل پسا کروی استفاده شده است. یعنی کلیه ذرات رسوب برای شبیه‌سازی کروی فرض گردیده اند.

نحوه چیدمان ذرات قبل شروع جریان به‌صورت شطرنجی می‌باشد. این چیدمان منجر به نشست اولیه ذرات می‌گردد که در نتیجه آن پس از نشست اولیه به اندازه ۷ میلی‌متر، عمق رسوبات کمتر از ۳ سانتی‌متر می‌شود. به منظور بالا بردن دقت شبیه‌سازی عددی، ابتدا ۴ سانتی‌متر از ذرات کروی به‌صورت شطرنجی چیده شده و در حالی‌که جریانی از روی آن‌ها عبور نمی‌کند، به آن‌ها اجازه نشست اولیه داده می‌شود و پس از این نشست، ذراتی که تراز کمتر از ۳ سانتی‌متر دارند جدا شده و در مدل اصلی قرار داده می‌شود. به این ترتیب در مدل عددی، چاله اطراف استوانه، توسط ذراتی که نشست اولیه ناشی از وزن خود را تجربه نموده‌اند، پر شده است. برای انجام عملیات فوق، از کد نوشته شده در فرترن استفاده شده است.

شکل ۸ کانتور سرعت افقی جریان در مجاورت پایه دایروی در حالت پایدار را نشان می‌دهد. در این شکل جهت جریان در کانال از راست به چپ می‌باشد. با نزدیک شدن به جلوی پایه سرعت جریان روند نزولی داشته و به مقداری منفی می‌رسد. در نتیجه جریان برگشتی ایجاد شده که در نهایت مطابق شکل ۹ منجر به تشکیل گردابه نعل اسبی می‌گردد.

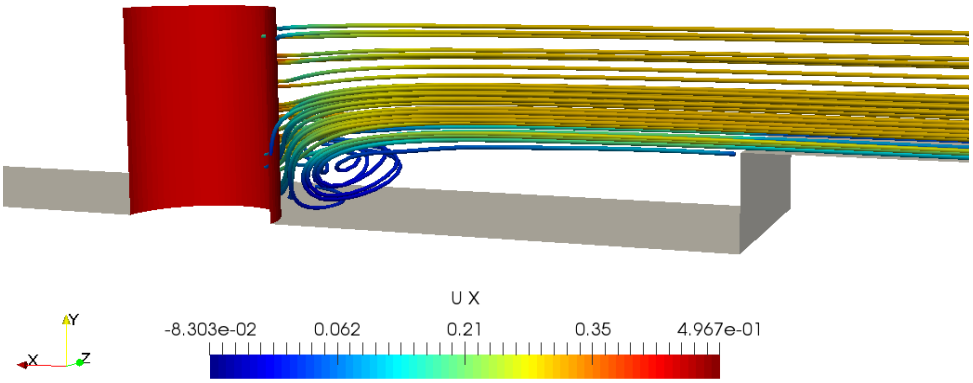
شکل ۱۰ نشان می‌دهد نتایج حاصل از مدل‌سازی عددی با شرایط ذکرشده دارای تطابق مناسب با داده‌های آزمایشگاهی نمی‌باشد. مقایسه پروفیل حاصل از مدل عددی با آزمایشگاهی بیانگر این است که شیب حفره آب‌شستگی در مدل عددی کمتر از مدل آزمایشگاهی می‌باشد. یعنی رسوبات از فاصله دورتری از پایه شروع به شسته شدن می‌کنند. در این مدل عددی کل فاصله موجود از کناره پایه تا دیواره که برابر ۵ سانتی‌متر می‌باشد، تحت تاثیر آب‌شستگی ناشی از حضور پایه استوانه‌ای قرار گرفته است که این مساله با نتایج آزمایشگاهی هم‌خوانی ندارد. اختلاف بیشترین عمق آب‌شستگی در کنار پایه در دو مدل عددی و آزمایشگاهی برابر با ۵ میلی‌متر (۳۳ درصد اختلاف) می‌باشد. بنابراین مدل نیاز به اصلاح داشته و به این

1 One-Way Coupled
2 Two-Way Coupled



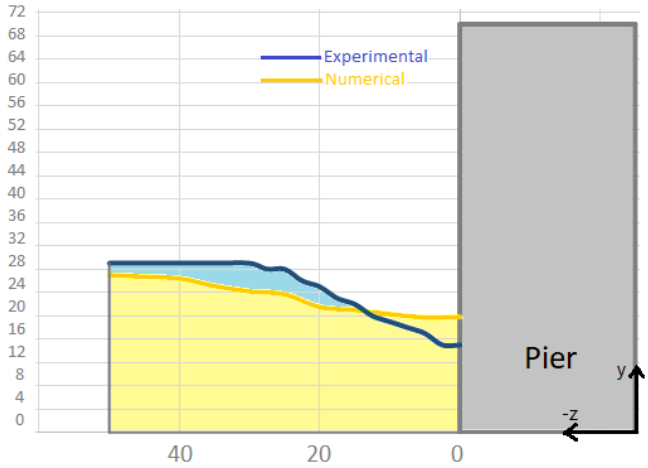
شکل ۸.کانتور سرعت افقی جریان (متر بر ثانیه)

Fig. 8. The contour of horizontal flow velocity (m/s)



شکل ۹. تشکیل گردابه نعل اسبی در جلوی پایه

Fig. 9. Horseshoe vortex forming in front of the pier



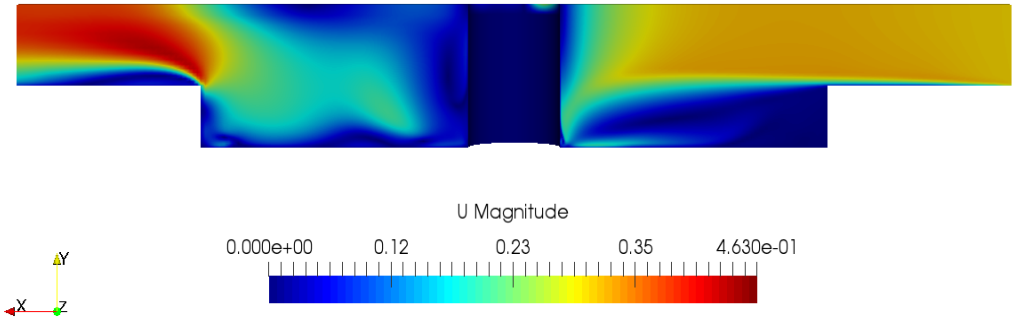
شکل۱۰. مقایسه پروفیل بستر آب‌شستهمدل عددی غیر کوپل با مدل آزمایشگاهی در صفحه $X=0$ (میلی‌متر)

Fig. 10. The comparison of scoured bed profile in an uncoupled numerical model with the experimental model on the plane of x=0 (mm)

منظور ابتدا کوپلینگ چهار طرفه و سپس مدل پسا غیر کروی به مدل اضافه می‌گردد.

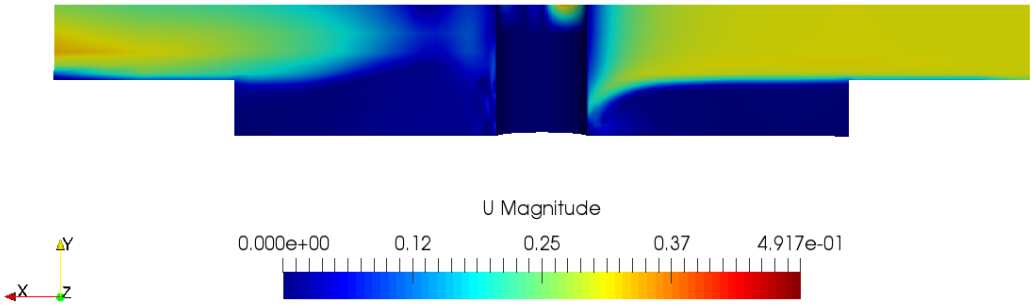
در مدل دوم از کوپلینگ چهار طرفه برای شبیه‌سازی آب‌شستگی استفاده شده است. یعنی اثر سیال بر روی ذره، اثر ذره روی سیال و اندرکنش بین ذرات در شبیه‌سازی لحاظ می‌گردد. به منظور بهبود نتایج مدل‌سازی عددی و تطابق بیشتر با نتایج آزمایشگاهی، مدل پسا از مدل کروی به مدل غیر کروی تغییر یافت. شکل‌های ۱۱ و ۱۲ به ترتیب کانتور سرعت در حالت غیرکوپل و کوپل‌شده را نشان می‌دهد.

طبق شکل ۱۱ در روش غیرکوپل، حضور ذرات در داخل چاله هیچ اثری بر رفتار سیال نمی‌گذارد. در نتیجه گردابه‌های جریان در داخل رسوبات نیز حضور دارند و فاز گسسته ذرات نمی‌تواند باعث کاهش سرعت فاز پیوسته گردد. در نهایت با مقایسه این دو شکل می‌توان نتیجه گرفت که در حالت کوپل‌شده اینرسی سیال بالا می‌رود



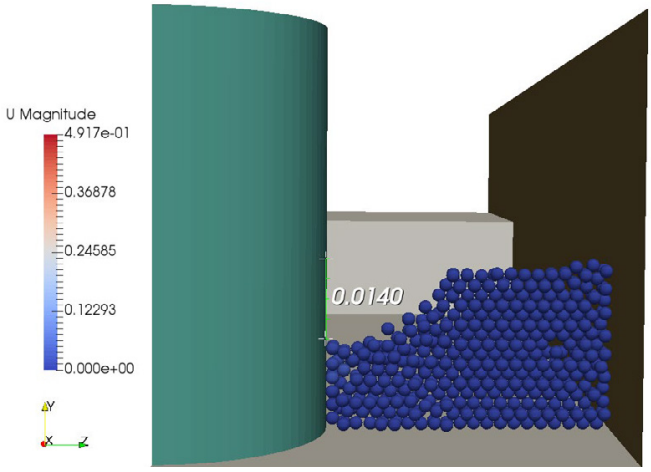
شکل ۱۱. کانتور سرعت در روش غیرکوپل در صفحه $Z=0$ (متر بر ثانیه)

Fig. 11. The contour of velocity in the uncoupled approach on the plane of z=0 (m/s)



شکل ۱۲. کانتور سرعت در روش کوپل‌شده در صفحه $Z=0$ (متر بر ثانیه)

Fig. 12. The contour of velocity in the coupled approach on the plane of z=0 (m/s)



شکل ۱۳. پروفیل بستر و سرعت ذرات در مقطع عرضی (صفحه $X=0$) پس از آب‌شستگی (متر بر ثانیه)

Fig. 13. Scoured bed profile and particle velocity on the cross-section (the plane of x=0) (m/s)

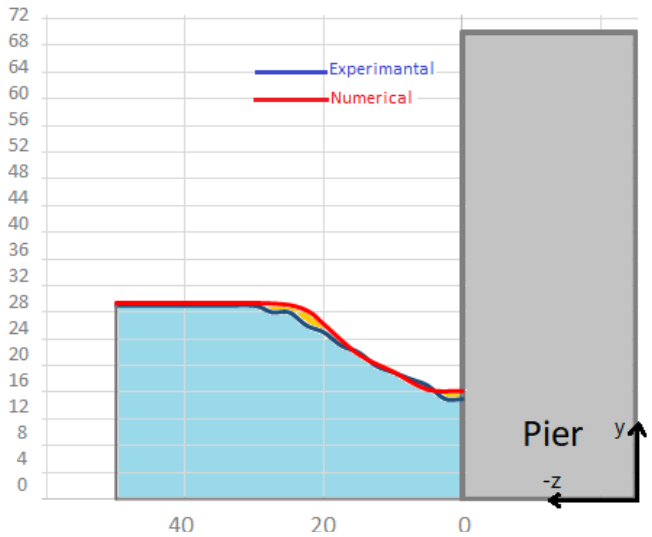
و در محل حضور ذرات گردابه تشکیل نمی‌گردد. این به آن معنی است که در شکل ۱۲ برخلاف شکل ۱۱، ذرات چیده شده در کف باعث می‌شوند که میدان سرعت جریان در چاله به سمت صفر میل کند که منطبق بر فیزیک مسئله می‌باشد.

شکل ۱۳ مقطع عرضی بستر را پس از آب‌شستگی در حالت پایدار نشان می‌دهد. رسوبات در جلو و کناره‌های پایه شسته شده و به پشت آن منتقل شده اند. مطابق شکل سرعت ذرات به علت پایداری به صفر رسیده‌اند. در این شکل حفره آب‌شستگی در کناره پایه به خوبی قابل تشخیص می‌باشد.

در نهایت در شکل ۱۴ نتایج پروفیل عرضی حاصل از این مدل عددی با مدل آزمایشگاهی مقایسه می‌گردد. در این مدل تا فاصله ۲/۳ سانتی‌متری از کنار پایه، بستر تحت تاثیر قرار گرفته و آب‌شسته می‌شود. اختلاف بیشترین عمق آب‌شستگی در کنار پایه در دو مدل عددی و آزمایشگاهی برابر با ۱ میلی‌متر (۶ درصد اختلاف) می‌باشدکه در مقایسه با حالت بدون کوپلینگ دقت بهتری را نشان می‌دهد. شیب حفره آب‌شستگی در مدل عددی و آزمایشگاهی تطابق خوبی با هم دارند. در نتیجه این مدل دارای دقت کافی بوده و تطابق خوبی با نتایج

آزمایشگاهی دارد.

شکل ۱۵ فاصله کلیه ذرات را از سطح بستر نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل مشخص است بیشترین میزان آب‌شستگی در زاویه ۴۵ درجه از لبه جلویی پایه اتفاق می‌افتد. همچنین در پایین دست پایه با کم شدن اثر گردابه‌های برخاستی، ذرات شسته شده از اطراف پایه در پشت پایه جمع شده و با گذشت زمان به سمت پایین (جهت $+X$) دست حرکت می‌کنند.



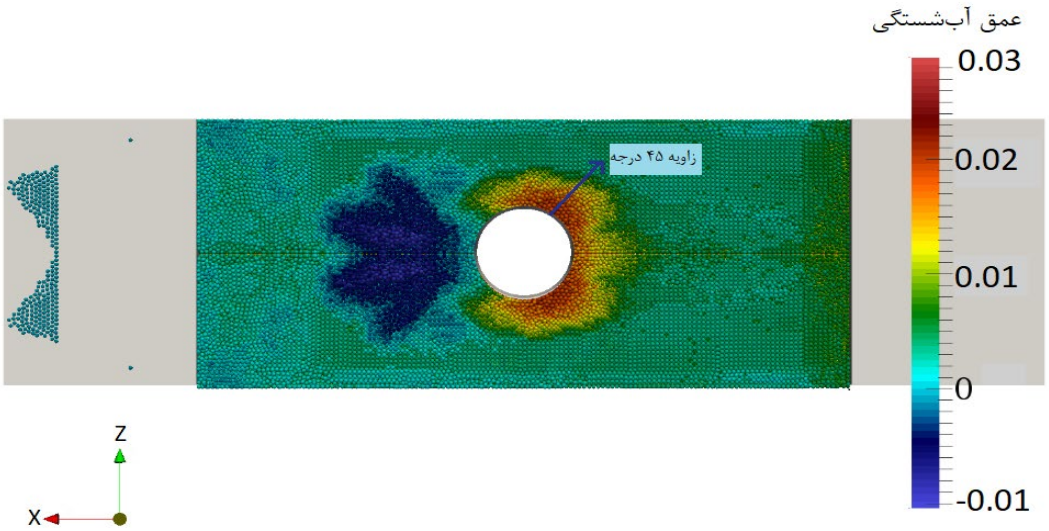
شکل ۱۴. مقایسه پروفیل بستر آب‌شسته مدل عددی کوپل‌شده با مدل آزمایشگاهی در صفحه $X=0$ (میلی‌متر)

Fig. 14. The comparison of scoured bed profile in a coupled numerical model with the experimental model on the plane of x=0 (mm)

۳-۱- نتایج مدل عددی فاز دوم

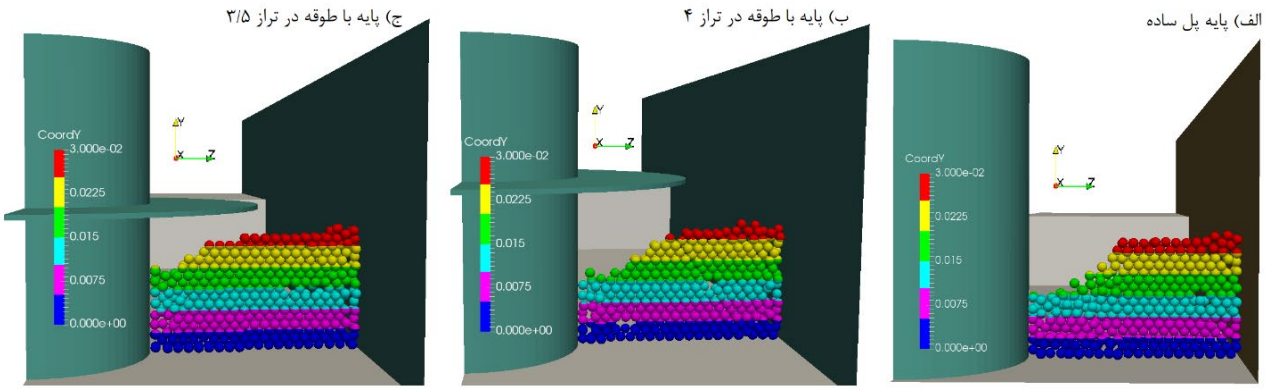
در این فاز به منظور بررسی اثر طوقه در کاهش آب‌شستگی پیرامون پایه، حفره حاصل از آب‌شستگی در دو مدل پایه طوقه‌دار با مدل پایه بدون طوقه مقایسه می‌گردد. شکل ۱۶ کانتور فاصله ذرات از کف دامنه و پروفیل بستر آب‌شسته در مقطع عرضی گذرنده از مرکز پایه (صفحه $X=0$) در حالت پایه ساده و پایه با حضور طوقه در دو تراز مختلف را نشان می‌دهد. نتایج نشان می‌دهد حضور طوقه باعث کاهش عمق بیشینه آب‌شستگی می‌شود و با افزایش تراز طوقه، آب‌شستگی افزایش می‌یابد. در نتیجه طوقه در تراز پایین‌تر عملکرد بهتری در کاهش آب‌شستگی دارد.

جزئیات دقیق‌تر از مقطع عرضی در حالت‌های مختلف از طوقه و پایه ساده در شکل ۱۷ نشان داده شده است. منحنی مشکی نشان‌دهنده پروفیل سطح بستر در حالتی است که آب‌شستگی حول پایه ساده و بدون طوقه می‌باشد. در این حالت بیشینه عمق آب‌شستگی برابر با ۱۸/۵ میلی‌متر است. منحنی نارنجی رنگ مربوط به پروفیل بستر در حالت طوقه نصب شده در ارتفاع ۳/۵ است که در آن بیشینه عمق آب‌شستگی ۹/۴ میلی‌متر می‌باشد. این بدان معناست



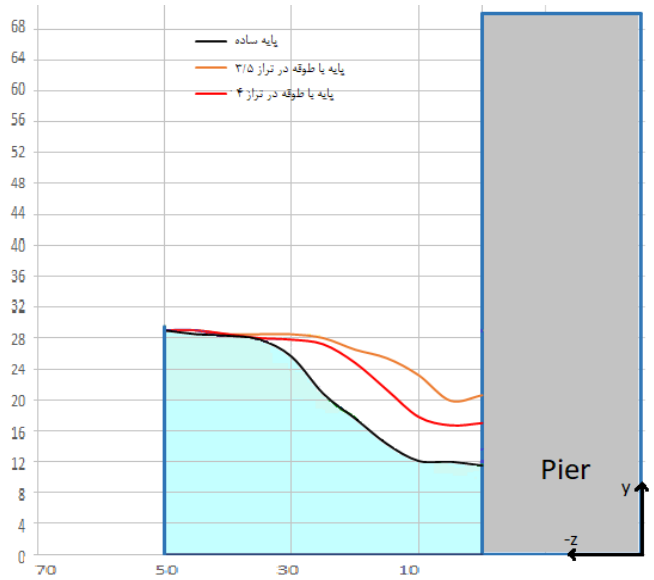
شکل۱۵. کانتور فاصله ذرات از سطح بستر (متر)

Fig. 15. The contour of particle distance from the bed surface (m)



شکل۱۶. مقطع عرضی آب‌شستگی و کانتور فاصله ذرات از کف دامنه در حالت. الف) پایه ساده، ب) پایه با طوقه در تراز ۴ و ج) پایه با طوقه در تراز ۳/۵

Fig. 16. The scouring cross-section and the contour of particle distance from the bottom of the domain in a) simple pier, b) pier with collar at level 4 and c) pier with collar at level 3.5.



شکل۱۷. مقایسه پروفیل بستر آب‌شسته پایه ساده با پایه طوقه‌دار در صفحه $X=0$ (میلی‌متر)

Fig. 17. The comparison of scoured bed profile in a simple pier with piers having a collar on the plane of x=0 (mm)

که طوقه در فاصله نیم سانتی‌متر از بستر ماسه‌ای، می‌تواند تا ۴۹/۲ درصد از بیشترین عمق آب‌شستگی بکاهد. منحنی قرمز رنگ مربوط به طوقه در تراز ۴ یا به عبارت دیگر طوقه در فاصله ۱ سانتی‌متری از بستر رسوبات است که در این حالت بیشینه عمق آب‌شستگی ۱۳ میلی‌متر می‌باشد که ۲۹/۷ درصد از بیشترین عمق آب‌شستگی کاهش داده است.

۴- نتیجه‌گیری

در این پژوهش به منظور شبیه‌سازی پدیده آب‌شستگی اطراف یک پایه استوانه‌ای عمودی که در مسیر جریان قرار دارد، از یک حلگر سه‌بعدی توسعه یافته در نرم‌افزار اپن‌فوم به نام pimpleLPTdenseFoam استفاده می‌شود. به دلیل عملکرد بهتر مدل آشفتگی $k-\omega_SST$ در جریان‌های با گرادیان فشار معکوس، این مدل آشفتگی در این تحقیق به‌کار رفته است. مدل آزمایشگاهی مورد بررسی در این مقاله در آزمایشگاه هیدرولیک دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل ساخته شده است. برای دستیابی به یک مدل مناسب برای شبیه‌سازی پدیده آب‌شستگی پایه استوانه‌ای در فاز اول مدل‌سازی، دو سناریو در قالب دو مدل با رویکرد اویلری-لاگرانژی مورد بررسی و ارزیابی قرار گرفت. در سناریو اول اثر فاز گسسته روی فاز پیوسته لحاظ نشده است و در آن از پسا کروی استفاده شده است. نتایج این مدل دارای تطابق مناسب با نتایج آزمایشگاهی نمی‌باشد. بنابراین در سناریو دوم به منظور بالا بردن دقت شبیه‌سازی، کوپلینگ چهار طرفه و مدل پسا غیرکروی استفاده گردید. در سناریو دوم با روش کوپل‌شده و با تغییر مدل پسا کروی به غیرکروی، نتایج مناسبی حاصل گردید که دارای تطابق خوبی با نتایج آزمایشگاهی می‌باشند.

نتایج نشان می‌دهد که بیشترین مقدار عمق آب‌شستگی تعادلی در مقطع عرضی در مدل عددی دوم و آزمایشگاهی به‌طور قابل قبولی (۶ درصد اختلاف) بر هم منطبق‌اند. شیب حفره آب‌شستگی در مدل عددی و آزمایشگاهی نیز تطابق خوبی با هم دارند. نتایج مدل عددی همچنین نشان می‌دهد که بیشترین میزان آب‌شستگی در زاویه ۴۵ درجه از لبه جلویی پایه اتفاق می‌افتد. فاز دوم مدل‌سازی عددی آب‌شستگی نیز به منظور بررسی اثر طوقه در کاهش آب‌شستگی پیرامون پایه استوانه‌ای انجام گردیده است. در این فاز ابتدا پایه ساده بدون طوقه و سپس پایه با حضور طوقه در دو تراز مختلف شبیه‌سازی شده است. به منظور بررسی اثر تراز نصب طوقه در کاهش عمق آب‌شستگی، مدل‌های پایه طوقه‌دار با ارتفاع‌های ۳/۵ و ۴ سانتی متر از کف دامنه محاسباتی شبیه‌سازی گردید. حضور طوقه باعث کاهش عمق بیشینه آب‌شستگی می‌شود. نتایج نشان داده است که طوقه در تراز پایین‌تر عملکرد بهتری در کاهش آب‌شستگی دارد و با بالا رفتن طوقه، بیشینه عمق و شعاع حفره حاصل از آب‌شستگی افزایش می‌یابد.

فهرست علائم

علائم انگلیسی

E مدول الاستیسیته، N/m^2

f ضریب اصطکاک

C_D ضریب پسا

D_p قطر ذره، m

F_g نیروی وزن و شناوری، N

F_D نیروی پسا، N

F_n نیروی تماسی نرمال، N

F_p نیروی فشاری، N

F_t نیروی تماسی مماسی، N

G بردار سرعت نسبی، m/s

k سختی فنر، N/m

m_p جرم ذره، kg

n بردار یکه

P فشار، N/m^2

R_p ترم اندرکنش بین ذرات و سیال، m/s^2

U سرعت، m/s

علائم یونانی

δ_n جابه‌جایی نرمال ذره، m

δ_t جابه‌جایی مماسی ذره، m

η ضریب میرایی، N.s/m

τ تنش برشی، N/m^2

ω_i سرعت زاویه‌ای، rad/s

ρ چگالی، kg/m^3

φ کمیت مورد نظر

زیرنویس

n مولفه نرمال

t مولفه مماسی

منابع

[1] A.R. Zarrati, H. Gholami, M. Mashahir, Application of collar to control scouring around rectangular bridge piers, Journal of Hydraulic Research, 42(1) (2004) 97-103.

[2] T. Esmaeili, A. Dehghani, A. Zahiri, K. Suzuki, 3D Numerical simulation of scouring around bridge piers (Case Study: Bridge 524 crosses the Tanana River), World Academy of Science, Engineering and Technology, 58 (2009) 1028-1032.

[3] A. Roulund, B.M. Sumer, J. Fredsøe, J. Michelsen, Numerical and experimental investigation of flow and scour around a circular pile, Journal of Fluid Mechanics, 534 (2005) 351-401.

[4] A. Zarrati, M. Nazariha, M. Mashahir, Reduction of local scour in the vicinity of bridge pier groups using collars and riprap, Journal of Hydraulic Engineering, 132(2) (2006) 154-162.

[5] B.W. Melville, A.J. Raudkivi, Flow characteristics in local scour at bridge piers, Journal of Hydraulic Research, 15(4) (1977) 373-380.

[6] B. Dargahi, Controlling mechanism of local scouring, Journal of Hydraulic Engineering, 116(10) (1990) 1197-1214.

[7] G. Deng, J. Piquet, Navier-Stokes computations of horseshoe vortex flows, International journal for

numerical methods in fluids, 15(1) (1992) 99-124.

[8] J.E. Richardson, V.G. Panchang, Three-dimensional simulation of scour-inducing flow at bridge piers, Journal of Hydraulic Engineering, 124(5) (1998) 530-540.

[9] N.R. Olsen, M.C. Melaaen, Three-dimensional calculation of scour around cylinders, Journal of Hydraulic Engineering, 119(9) (1993) 1048-1054.

[10] M. Muzzammil, T. Gangadharaiah, A. Gupta, An experimental investigation of a horseshoe vortex induced by a bridge pier, in: Proceedings of the institution of civil engineers-water management, Thomas Telford Ltd, 2004, pp. 109-119.

[11] M. Vaghefi, M. Ghodsian, S. Salimi, The effect of circular bridge piers with different inclination angles toward downstream on scour, Sadhana, 41(1) (2016) 75-86.

[12] X. Liu, M.H. García, Three-dimensional numerical model with free water surface and mesh deformation for local sediment scour, Journal of waterway, port, coastal, and ocean engineering, 134(4) (2008) 203-217.

[13] Y. Aghaee, H. Hakimzadeh, Three dimensional numerical modeling of flow around bridge piers using LES and RANS, in: River Flow, 2010, pp. 211-218.

[14] P. Cunha Ramos, J.P. Pêgo, R. Maia, Numerical simulation of the flow around a pier using OpenFOAM, in: 3rd IAHR Europe Congress, 2014.

[15] A. Khosronejad, S. Kang, F. Sotiropoulos, Experimental and computational investigation of local scour around bridge piers, Advances in Water Resources, 37 (2012) 73-85.

[16] L. Zhou, Numerical modelling of scour in steady flows, Doctoral dissertation, Université de Lyon, 2017.

[17] C. Baykal, B.M. Sumer, D.R. Fuhrman, N.G. Jacobsen, J. Fredsøe, Numerical simulation of scour and backfilling processes around a circular pile in waves, Coastal Engineering, 122 (2017) 87-107.

[18] C. Baykal, B.M. Sumer, D.R. Fuhrman, N.G. Jacobsen, J. Fredsøe, Numerical investigation of flow and scour around a vertical circular cylinder, Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences, 373(2033) (2015) 20140104.

[19] S. Abdelaziz, M.-D. Bui, P. Rutschmann, Numerical simulation of scour development due to submerged horizontal jet, River Flow 2010, (2014) 1597-1604.

[20] Y. Li, D.M. Kelly, M. Li, J.M. Harris, Development of a new 3D Euler-Lagrange model for the prediction of scour around offshore structures, Coastal Engineering Proceedings, 1(34) (2014) 31.

[21] J. Shim, G. Duan, H. Jo, Simulating Sediment Transport around a Bridge Pier Using Open FOAM Software, in: 16th World Environmental and Water Resources Congress 2016: Hydraulics and Waterways and Hydro-Climate/ Climate Change, American Society of Civil Engineers (ASCE), 2016, pp. 362-369.

[22] H.K. Versteeg, W. Malalasekera, An introduction to computational fluid dynamics: the finite volume method, Pearson education, 2007.

[23] A. Lopez, LPT for erosion modeling in OpenFOAM, in, 2014.

[24] R. Kasper, J. Turnow, N. Kornev, Numerical modeling and simulation of particulate fouling of structured heat transfer surfaces using a multiphase Euler-Lagrange approach, International Journal of Heat and Mass Transfer, 115 (2017) 932-945.

[25] J.D. Schwarzkopf, M. Sommerfeld, C.T. Crowe, Y. Tsuji, Multiphase flows with droplets and particles, CRC press, 2011.

[26] H. Tofighian, E. Amani, M. Saffar-Avval, Parcel-number-density control algorithms for the efficient simulation of particle-laden two-phase flows, Journal of Computational Physics, 387 (2019) 569-588.

[27] A. Fluent, ANSYS fluent theory guide 15.0, ANSYS, Canonsburg, PA, (2013).

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

T. Ebrahimi, M. Hamidi., A. Rahmani Firoozjaee, E. Khavasi, Numerical Investigation of Scour Around a Cylindrical Pier in Laboratory Scale Using Euler-Lagrange Approach, Amirkabir J. Mech Eng., 53(Special Issue 1) (2021) 411-426.

DOI: 10.22060/mej.2019.16679.6418