





Numerical modeling to investigate the effect of the presence or absence of a free surface on the flow around the cylindrical pier

Mehdi Esmaeilzadeh Fereydani, Yasin Aghaee-Shalmani*

Faculty of Civil Engineering, Department of Mechanical and Civil Engineering, Kho. C, Islamic Azad University, Khomeinishahr, Iran.

Corresponding Author email: y.aghaee@iaukhsh.ac.ir

© The Author (s) 2025

Received: 04 Apr 2025	Revised: 15 Jun 2025	Accepted: 14 Jul 2025	Published: 17 Jul 2025
-----------------------	----------------------	-----------------------	------------------------

Extended Abstract

Introduction

Bridge piers, as critical components of hydraulic structures, are consistently subjected to dynamic water flow forces. Understanding flow patterns around these piers, particularly under free surface conditions, is essential for predicting phenomena like scour and structural instability. However, many numerical simulations neglect free surface effects to reduce computational costs. This study employs Flow-3D v10.0.1 to investigate the impact of free surface presence/absence on flow characteristics around cylindrical piers at subcritical Froude numbers (0.10–0.30). The primary objective is to quantify errors induced by ignoring free surface effects and compare velocity fields, shear stresses, and vortex patterns between free surface (VOF) and rigid-lid approaches.

Materials and Methods

The study implemented two modeling strategies: Free surface (Volume of Fluid - VOF method) and Rigid-lid (symmetry boundary condition).

A 4-m long flume with a 0.2-m diameter cylindrical pier was discretized using 1 million structured hexahedral cells (refined near boundaries). The RNG k- ϵ turbulence model solved Reynolds-Averaged Navier-Stokes equations. Model validation against experimental data from Salaheldin et al. (2004) showed <10% deviation in upstream velocity profiles and separation lengths. Five Froude number scenarios (0.10–0.30) were simulated with consistent flow depth (0.25 m). Boundary conditions included no-slip walls and pressure outlets, with timesteps controlled by Courant–Friedrichs–Lewy stability criteria.

Results and Discussion

Key findings revealed significant free surface influences:

•Water surface deformation: Maximum wave height upstream increased from 0.004 m (Fr=0.10) to 0.029 m (Fr=0.30), while downstream depression reached 0.0245 m.

•Velocity fields: Downward flow velocities near the pier base were 17% higher in VOF simulations at Fr=0.30.

Horizontal velocity components differed by 20% near the bed.

•Vortex dynamics: Rigid-lid models overestimated downstream separation lengths by 11% due to unaccounted pressure fluctuations from surface waves.

•Bed shear stress: VOF simulations predicted 15% higher shear stresses, emphasizing free surface effects on near-bed flow structures.

Technical Strategies in Water Systems https://sanad.iau.ir/journal/tsws ISSN (Online): 2981-1449 Spring 2025: Vol 3, Issue 1,57-71 https://doi.org/10.30486/TSWS.2025.1208971



Notably, discrepancies intensified at higher Froude numbers (Fr>0.25), with velocity profile variations exceeding 67% near sidewalls. The rigid-lid approach failed to capture surface-induced vertical velocities and underpredicted horseshoe vortex intensity by 12-18%.

Conclusion

This study demonstrates that neglecting free surface effects in subcritical flow modeling can introduce substantial errors ($\leq 20\%$) in hydrodynamic parameter predictions. The rigid-lid simplification proved particularly inadequate for Fr ≥ 0.25 , where free surface deformations significantly alter flow dynamics. While computational costs for VOF simulations were 35% higher, the improved accuracy justifies its application for pier design in real-world hydraulic conditions. Current limitations include the 2D-RANS framework's inability to resolve all turbulent scales and the need for finer meshes in separation zones. Future work should examine 3D free surface interactions with sediment transport mechanisms. These findings provide critical insights for optimizing numerical modeling protocols in bridge hydraulics and advancing sustainable pier design methodologies.

Keywords: Turbulent flow, Three-Dimensional modeling, Free-surface, Rigid-lid, Froud number

Conflicts of interest

The authors of this article declared no conflict of interest regarding the authorship or publication of this article.

Data availability statement

The datasets are available upon a reasonable request to the corresponding author.

Authors' contribution

Mehdi Esmaeilzadeh F. and Yasin Aghaee Sh.: Writing, Methodology, Investigation, Data Collection, Software; Mehdi Esmaeilzadeh F. and Yasin Aghaee Sh.: Analysis, Supervision, Writing – Review & Editing, Data Curation.

Citation: Esmaeilzadeh, F., & Aghaee Sh, Y. (2025). Numerical modeling to investigate the effect of the presence or absence of a free surface on the flow around the cylindrical pier. Technical Strategies in Water Systems, 3(1), 57-71. https://doi.org/10.30486/TSWS.2025.1208971

Publisher: Islamic Azad University, Isfahan Branch

مجله راهبردهای فنی در سامانههای آبی https://sanad.iau.ir/journal/tsws شاپا الکترونیکی: ۱۴۴۹–۲۹۸۱

بهار ۱۴۰۴، دوره سه، شماره۱، ۵۷–۲۱ https://doi.org/10.30486/TSWS.2025.1208971

مقاله پژوهشی





مدلسازی عددی بررسی تأثیر وجود یا عدم وجود سطح آزاد بر جریان اطراف پایه استوانهای

مهدی اسمعیلزاده فریدنی، یاسین آقایی شلمانی*

گروه عمران، دانشکده مهندسی مکانیک و عمران، واحد خمینیشهر، دانشگاه آزاد اسلامی، خمینیشهر، ایران. ایمیل نویسنده مسئول: <mark>y.aghaee@iaukhsh.ac.ir</mark> 2025 The Author (s)

چاپ: ۴/۰۴/۲۶	پذیرش: ۱۴۰۴/۰۴/۲۳	بازنگری: ۱۴۰۴/۰۳/۲۵	دریافت: ۱۴۰۴/۰۱/۱۵
			چکیدہ

پایههای پل و جریان اطراف آنها بهدلیل اهمیت فراوانشان در سازههای هیدرولیکی همواره توجه ویژه بودهاند. درمطالعه حاضر با استفاده از مدلسازی عددی با استفاده از مدل آشفتگی RNG به بررسی جریانهای آشفته در اطراف پایه استوانهای پل با سطح آزاد (Free-surface) و بدون سطح آزاد (Rigid-lid) پرداخته میشود. هدف اصلی، مدلسازی عددی جریان در اعداد فرود زیر بحرانی د۰/۱۰، ۲۰/۱۰، ۲۰/۱۰ و ۳/۰ در هر دو حالت سطح آزاد و بدون سطح آزاد است. با توجه به نتایج بهدست آمده و مقایسه آنها، در مدلسازی با عدد فرود ۲۵/۰ و ۳/۰ در هر دو حالت سطح آزاد و بدون سطح آزاد در مقایسه با یکدیگر نمایان تر است. تفاوت سرعت جریان رو به پایین در جلوی پایه بهازای عدد فرود ۳/۰ برای جریان با سطح آزاد در مقایسه با یکدیگر نمایان تر است. تفاوت سرعت اختلاف مقدار حداکثر سرعت در صفحه افقی در اطراف پایه در صفحه افقی بهازای عدد فرود ۳/۰ در و مدلسازی ۲۰ درصد است. افزایش عدد فرود جریان طول جدایش در بالادست جریان به مقدار جزئی افزایش مییابد. همچنین مقدار طول جدایش در پاییندست، برای دو مدلسازی با و بدون سطح آزاد در تمامی اعداد فرود با یکدیگر تفاوت در مای می و معان را مان با

واژههای کلیدی: جریان آشفته، مدلسازی سهبعدی، سطح آزاد، سطح ثابت، عدد فرود

استناد: اسمعیلزاده فریدنی، م.، آقایی شلمانی،ی. (۱۴۰۴). مدلسازی عددی بررسی تأثیر وجود یا عدم وجود سطح آزاد بر جریان اطراف پایه استوانهای . راهبردهای فنی در سامانه های آبی، ۳(۱): ۲۱–۵۷. https://doi.org/10.30486/TSWS.2025.1208971

ناشر: دانشگاه آزاد اسلامی واحد اصفهان (خوراسگان)

۱- مقدمه

قرارگیری سازه پلها در مسیر جریانهای رودخانهای، همواره مستلزم تعبیه پایههایی در این مناطق است که عملاً این پایهها در معرض انواع جریانهای رودخانهای و بهدنبال آن آبشستگی قرار خواهند داشت. این موضوع احتمال تهدید پایداری پایههای پل را بیشتر کرده و در نهایت با ناپایدار کردن آنها موجب شکست پلها می گردد. موانع واقع شده در برابر جریان، موجب تغییر در وجهی جویان پیرامون آنها می گردد. جدایش جریان از مرز پایهها، موجب ایجاد گردابههایی در پشت پایه شده که به تناوب از وجهی به وجه دیگر پایه حرکت می کنند. گردابهها پس از آنکه به اندازه کافی رشد کردند به سمت پایین ست پایه شده که به تناوب از وجهی به وجه دیگر پایه حرکت می کنند. گردابهها پس از آنکه به اندازه کافی رشد کردند به سمت پایین دست پایه حرکت کرده و وجهی به وجه دیگر پایه مرکت می کنند. گردابهها پس از آنکه به اندازه کافی رشد کردند به سمت پایین دست پایه حرکت کرده و وجود داشته باشد، سرعت جریان در برخورد به سطح بالادست پایه به صغر می رسد. به دلیل اینکه پروفیل سرعت از سطح آزاد به سمت کف از میزان حداکثر خود به صفر کاهش می یابد، فشار دینامیکی نیز از سطح آزاد به سمت کف کاهش می یابد. این گرادیان می کند. مقداری از جریان که به سمت بالادست بازگشت می کند، در برخورد به بستر در مختلف پراکنده می هرد و به حرکت در جهت وشار، جریان رو به پایینی را ایجاد می کند. جریان رو به پایین پس از برخورد به بستر در مختلف پراکنده می شود و بستر را حفر می کند. مقداری از جریان که به سمت بالادست بازگشت می کند، در برخورد با جریان اصلی کانال مجبور به حرکت در جهت امتداد یافته و شکلی شبیه نعل اسب^۱ به وجود می آورد (Raudkivi & Ettema, 1988).

بررسی الگوی جریان اطراف پایه استوانهای، با روش های آزمایشگاهی، تحلیلی و یا مدلسازی عددی انجام شده است. مطالعات آزمایشگاهی متعددی درخصوص جریان اطراف پایه ها وجود دارد که از جمله آن ها می توان به مطالعه (1998) Graf & Altinakar و (2001) Istiarto اشاره کرد. همچنین (1979) Baker و (1989) Dargahi به مطالعه رفتار گردابه های نعل اسبی پرداختند. رفتار گرداب های نعل اسبی، تعداد و دینامیک آن ها به علت تأثیر ویژه بر روی آبشستگی از اهمیت بسیاری برخوردار است. Aunay et (2017) aد و جریان پرداختند.

مدلسازیهای عددی نیز برای شبیهسازی جریان، ابزار مناسبی برای بررسی جریانهای آشفته با سطح آزاد در اطراف پایه است. در اغلب مدلسازیهای عددی تغییرات سطح آزاد جریان به جهت کاهش حجم محاسبات صرف نظر میگردد که اصطلاحا به آن جریان با سرپوش (بدون سطح آزاد) گفته میشود. (2015) Aghaee-Shalmani & Hakimzadeh در مطالعهای مدلسازی جریان را برای دو حالت حضور سطح آزاد و بدون سطح آزاد اطراف پایههای مخروطی با عدد فرود جریان برابر ۲/۰ انجام دادند. نتایج نشان دهنده اختلاف ناچیز بین الگوی جریان در دو حالت بود. (2005) Roulund et al کنو می این برابر ۲/۰ انجام دادند. نتایج اطراف پایه استوانهای را شبیهسازی کردند. این محققین در مدلسازیهای خود به این نکته اشاره کردند که در نظر گرفتن فرض بدون سطح آزاد در مدلسازیها برای حالاتی که عدد فرود جریان کمتر از ۲/۰ است، خطای قابل توجهی در محاسبات و نتایج ایجاد نمی کند.

(2015) Kara et al جریان اطراف پایه پل کناری را بهصورت عددی مدلسازی کردند. در مدلسازیها از روش شبیهسازی جریان گردابی بزرگ و هر دو حالت جریان با سطح آزاد و سطح آب ثابت، استفاده شده است. ایشان از دو روش (LES) و روش تعیین سطح (LSM) در تحقیق خود استفاده کردند. وضعیت جریان و مشخصات آن برای دو حالت جریان با سطح آزاد و جریان بدون سطح آزاد مورد مقایسه قرار گرفت. با بررسی خواص جریان بهدست آمده نشان داده شد که میدان سرعت و تنشهای برشی بستر در هر دو روش تا حدودی مشابهاند. بااین حال، ساختارهای آشفتگی بین دو شبیه سازی متفاوت بوده که باعث تفاوت قابل توجه در

¹ Horse shoe

انرژی جنبشی آشفته و تنش رینولدز می گردد. (2020) Kahraman et al. (2020) یه مدلسازی جریان اطراف پایه نوک تیز در دو حالت سطح آزاد و بدون سطح آزاد پرداختند. در پژوهش ایشان، اعداد فرود ۲۰، تا ۲۰ آزمایش شد و نتایج نشان داد که مدلسازیهای بدون سطح آزاد با نتایج آزمایشگاهی و مدلسازی با سطح آزاد دارد. (2024) Stipa et al. (2024 یک مدل شبیه سازی گردابه ای بزرگ (LES)برای بررسی تأثیر موجهای گرانشی جوی ناشی از مزارع بادی در لایه مرزی اتمسفری خنثی توسعه دادند. مدل پیشنهادی به طور ویژه برای بررسی اثرات متقابل بین مزارع بادی و ساختارهای موجی جو طراحی شده و در آن از مرز بالایی صلب-irigi (holle نیز مرز آزاد استفاده شده است. نتایج نشان می دهد که استفاده از مرز صلب می تواند برخی روندهای کلان مانند گرادیان فشار را بازتولید کند، اما در بازسازی دینامیک موجهای گرانشی و بازیابی جریان در پشت توربینها ناتوان است. در مقابل، مدل مرز آزاد قادر به بازنمایی دقیق تر سازوکارهای انتشار انرژی و واکنشهای لایه مرزی به اغتشاشهای ناشی از مزارع بادی است. نشار را بازتولید کند، اما در بازسازی دینامیک موجهای گرانشی و بازیابی جریان در پشت توربینها ناتوان است. در مقابل، مدل مرز نشان می دهند که مدل التوان است. در موانی موجهای گرانشی و بازیابی جریان در پشت توربینها ناتوان است. در مقابل، مدل مرز نشان می دهند که مدل این از ماز و سانات سطح آزاد را در جریانهای پیچیده (خمها و انشعابات رودخانهای) بررسی کند. نتایج نشان می دهند که مدل این این از سانات سطح آزاد را در جریانهای پیچیده (خمها و انشعابات رودخانهای) بررسی کند. نتایج نشان می دهند که مدل این این از ماز بازسازی می کند، اگرچه هزینه محاسباتی بالاتری داده. در حالی که مدل به رود.

از دیگر موارد، مقایسه عددی بین دو حالت سطح ثابت و حجم مایع، ساختارهای سیال در یک جریان کم عمق توسط . (2016) است. در این شبیه سازی، یک جریان در کانال باز به طول ۱۰ متر و عمق ۱/۳ متر و در نقطه تعیین شده یک صفحه عمودی قرار داده شده است. ساختارهای جریان نزدیک بستر و سطح آزاد درنظر گرفته شدهاند. در تحقیقی که . (2020) معودی قرار داده شده است. ساختارهای جریان نزدیک بستر و سطح آزاد درنظر گرفته شدهاند. در تحقیقی که . (2020) (2020) روی جریان اطراف پایه استوانهای شکل با عدد رینولدز ۲۰۰۰۰ و عدد فرود ۲/۸ انجام دادند، از روش حجم سیال برای شبیه سازی استفاده کردند. در نزدیکی سطح آزاد با آزمایش ها، از نظر شبیه سازی استفاده کردند. در نزدیکی سطح آزاد با آمایش معلم ریزش پیدا کرده و میانگین ارتفاع سطح آزاد با آزمایش ها، از نظر شبیه سازی استفاده کردند. در نزدیکی سطح آزاد، گردابهای منظم ریزش پیدا کرده و میانگین ارتفاع سطح آزاد با آزمایش ها، از نظر گردابهای چرخشی نزدیکی سطح کاهش و فقط در عمق قابل مشاهده هستند. مطالعه آزمایشگاهی و عددی جریان اطراف پایه استوانهای فقط در عمق قابل مشاهده هستند. مطالعه آزمایشگاهی و عددی جریان اطراف پایه استوانهای فقط در عمق قابل مشاهده هستند. مطالعه آزمایشگاهی و عددی جریان اطراف پایه استوانهای غوطهور مقایسه آنها مطالعهای با هدف ایجاد تعامل بین جریان سطح آزاد و سینماتیک اطراف سیند و مدلسازی جریان اطراف پایه استوانهای غوطهور مقایسه آنها مطالعهای با هدف ایجاد تعامل بین جریان سطح آزاد و سینماتیک اطراف سیند، بهترین نتایج با استفاده اوروش یو مور مقایسه آنها مطالعهای با هدف ایجاد تعامل بین جریان سطح آزاد و سیماتیک اطراف سیند و مدلسازی جریان اطراف پایه در ورش BNG و روش حجم سیال بدست آمده است (LTANASE et al., 2011). و تعیین تأثین سطح آزاد و آبشستگی مالما می در مطالعه ایشان، بهترین نتایج با استگاه مطالعه ی در ملای می خریان سطح آزاد متغیر را برای شبیه سازی جریان نیزد. در مالما یه در عدی با استفاده از روش کردند. ایشان تفاوت های را بین میدانهای جریان کوارش کردند، اما عمق مطالعه عددی با استفاده از LTANASE و معان مقایسه کردند. ایشان تفاوت هایی را بین میدانهای جریان کواره کی دریان میلی می میدی می را بین میدانهای جریان کوار ش کردند، اما عمق آبواف ی یکه گرمی می میابهی برای این دو مورد بهدسا آمد. (Lim در 2010) می میانوی ی د

در بسیاری از مدلسازیهای عددی جریان در اطراف پایه و موارد مشابه با آن برای کاهش حجم محاسبات از تغییرات سطح آزاد صرف نظر شده است. از اینرو بیشتر مطالعات موجود بر روی پایههای استوانهای باسطح آب ثابت انجام گرفته است. تا آنجایی که ما اطلاع داریم، تاکنون مطالعهای در خصوص تفاوت اثر در نظر نگرفتن سطح آزاد در مقایسه با سطح آزاد برای پایههای استوانهای انجام نشده است. در این پژوهش، اثرات سطح آزاد در مدلسازی با توجه به مقدار عدد فرود و تغییر آن در مدل عددی در شرایط زیر بحرانی بررسی خواهد شد. همچنین تفاوت نتایج مربوط به الگو و مشخصات جریان در دو حالت با سطح آزاد و بدون سطح آزاد بررسی میشود. علاوهبراین، شناخت تأثیر در نظر گرفتن سطح آزاد در مدلسازی در مطالعات آتی میتواند با اطمینان بیشتری انجام شده و همچنین مقدار خطای در نظر نگرفتن سطح آزد در مدلسازیهای آتی با توجه به عدد فرود مدل واضحتر و دقیقتر خواهد بود.

۲- مواد و روشها

۲–۱– مدلسازی عددی

در این مطالعه، از نرم افزار Flow-3D v 10.0.1 برای مدلسازی عددی جریانهای آشفته در اطراف پایه استوانهای با سطح آزاد و بدون سطح آزاد استفاده شد (Flow Science, 2011). بدین منظور با استفاده از امکانات موجود در نرمافزار، شبکه حلی ایجاد شده و شرایط مرزی مورد نیاز مسئله که بتواند شرایط واقعی را مدل کند، استفاده میگردد. در شکل (۱) نمای شماتیک از پایه، میدان محاسباتی و موقعیت پایه نشان داده شده است. طول کانال ٤ متر و پایه در فاصله ۱۰ برابر قطر پایه از ورودی کانال و در فاصله ۱۰ برابر قطر پایه از خروجی کانال قرار گرفته است. طول کانال بر این اساس انتخاب شده است که جریان هم در بالادست به توسعه یافتگی کامل رسیده باشد و همچنین جریان در پایین دست مستقل از اثرات انتهای کانال باشد & Aghaee-Shalmani) (Hakimzadeh, 2015. عرض کانال برابر ۱/۵ متر و عمق جریان در تمام مدل ها ثابت و برابر ۲۵/۰ متر است. قطر پایه در تمام مدلسازیها ثابت و برابر ۲/۰ متر است. شرایط مرزی مورد استفاده در دیوارهها و کف بهصورت مرز جامد تعریف شده است. شرایط مرزی سطح سیال به دو صورت آزاد و عمق ثابت و حرکت افقی سطح آزاد آب لحاظ شده است. بدین صورت که برای مدلسازی جریان با سطح آزاد از روش VOF² و برای مدلسازی سطح آزاد بهصورت Rigid-Lid از شرط مرزی تقارن در سطح آزاد استفاده شده است. شرط مرزی تقارن در مدلسازی Rigid-Lid حرکت سطح آزاد در راستای قائم را از بین برده و سطح آزاد تنها در راستای افقی امکان حرکت دارد. در مدلسازیها دیوارهها و کف کانال و سطح استوانه بهصورت مرز جامد تعریف شده است. جریان در کانال در تمامی مدلها بهصورت زیر بحرانی است. برای مدل عددی حاضر سه شبکهبندی مختلف با تعداد شبکه 10⁵ × 5 (شبکه درشت)، 10⁶ × 1 (شبکه متوسط) و 10⁶ × 1.5 (شبکه ریز) در نظر گرفته شد که نتایج نشان داد که تفاوت بین نتایج شبکه متوسط و ریز بسیار ناچیز بوده و با تقریب قابل قبول شبکه انتخابی شامل یک میلیون شبکه مکعب مستطیلی متعامد (شکل ۱)، برای شبیهسازیهای این پژوهش انتخاب شد. شبکهبندی به نحوی انجام شده است که تراکم شبکهها در مجاورت مرزهای جامد به اندازه کافی باشد.



Fig 1. Schematic view of the pier, numerical domain and pier location

² Volume of Fluid

۲-۲- کاربرد معادلات و صحتسنجی

در مدلسازی تحقیق حاضر، از معادلات ناویر- استوکس و برای مدلسازی آشفتگی از مدل.های آشفتگی RNG استفاده شد. موفقیت مدل RNG در پژوهش های سایر محققین در مدلسازی جریان اطراف پایههای استوانهای شکل نیز بیان شده است که از جمله آن می توان به نتایج (Salaheldin et al. (2004) و Wang (2010) اشاره کرد. برای جلوگیری از توقف حل عددی بهدلیل ناپایداریهای ایجاد شده در ابتدای مدلسازی، مقدار گام زمانی به ^۸-۱×۱۰ ثانیه محدود شده است. علاوهبراین، نرمافزار با توجه به مقدار پایداری و روند حل عددی، با تغییرات گام زمانی شرایط پایداری را برای حل ایجاد میکند. مدت زمان مدلسازی ۱۲۰ ثانیه بوده و همگرایی حل با بررسی حداقل شدن تغییرات جریان در گامهای پایانی است. مدت زمان مورد نیاز برای یکبار عبور کامل جریان از میدان محاسباتی با توجه به طول میدان محاسباتی و سرعت جریان در کمترین سرعت ورودی جریان، ۲۵/۵ ثانیه است. مدت زمان ۱۲۰ ثانیه تقریبا معادل ۵ بار عبور کامل جریان از میدان محاسباتی بوده و شرایط پایدار جریان را حاصل میکند. برای مدلسازی سطح آزاد از روش VOF استفاده شده است. صحتسنجی مدل عددی پژوهش حاضر در حالت وجود سطح آزاد با مقایسه نتایج حاصل از مدل عددی با نتایج آزمایشگاهی استخراج شده از پژوهش (Salaheldin et al. (2004) مربوط به کار آزمایشگاهی(Dargahi (1989) انجام شده است. برای صحتسنجی، ابعاد میدان محاسباتی و مشخصات پایه، عمق جریان و سرعت جریان ورودی کاملا مشابه شرایط مدل آزمایشگاهی در نظر گرفته شده است. در مدل آزمایشگاهی طول کانال ۲۲ متر، عرض ١/٥ متر، عمق جریان ٢/٢ متر، سرعت متوسط جریان ورودی ٢٦/٢ متر بر ثانیه و قطر پایه ١/١٥ متر است. مرکز مختصات در مرکز پایه واقع شده است. مقایسه توزیع مولفه افقی سرعت جریان u در محور تقارن جریان در مدل عددی و آزمایشگاهی در دو مقطع قبل از پایه (x/D = -0.73, -2.5) و دو مقطع در پاییندست پایه (x/D = 2.1,8) انجام شده است. تغییرات سرعت u در عمق جریان در شکل (۲⊣لف) در بالادست پایه مشاهده می شود. در موقعیت x/D = −2.5 تطابق مناسبی بین پروفیل سرعت در مدلسازی عددی پژوهش حاضر و نتایج آزمایشگاهی مشاهده می شود. در مو قعیت x/D = -0.73 همچنان نتایج مدل عددی با مدل آزمایشگاهی تطابق دارد ولی سرعت منفی در نزدیک کف نشان دهنده جریان برگشتی در جلوی پایه است که در مدل عددی مشاهده می شود. این سرعت منفی و اختلاف آن با مدل آزمایشگاهی نشان میدهد که مدل عددی طول گردابه نعل اسبی در بالادست پایه را بزرگتر از نتایج آزمایشگاهی پیش بینی کرده است. این اختلاف می تواند بهدلیل کم بودن تعداد شبکه محاسباتی در این ناحیه و همچنین عدم توانایی مدلهای RANS در پیشبینی دقیق فرآیندهای آشفتگی در مجاورت بستر باشد. شکل (۲–ب) مقایسه مولفه افقی سرعت *u* در پاییندست پایه را نشان میدهد. در این شکل در موقعیت x/D = 2.1 و x/D = 8 شکل کلی پروفیل سرعت و مقادیر آن با نتایج آزمایشگاهی تطابق خوبی را نشان میدهد. مقایسه نتایج مدلسازی عددی تنها برای پروفیل سرعت بوده و مقایسهای بین عمق جریان در مدلسازی عددی با نتایج آزمایشگاهی بهدلیل عدم اندازه-گیریهای سطح آب در مدل آزمایشگاهی انجام نشده است. نتایج صحتسنجی نشاندهنده تطابق قابل قبول مدل عددی حاضر با اختلاف جذر میانگین مربعات ۵ تا ۱۰ درصد مربوط به پروفیل سرعت در عمق جریان در بالادست و پاییندست پایه است. همچنین طول جدایش جریان در بالادست پایه که گرداب نعل اسبی در آن ناحیه ایجاد می شود نیز با نتایج آزمایشگاهی تطابق خوبی دارد. در تحقیق حاضر برای بررسی اثر وجود یا عدم وجود سطح آزاد در مدلسازی جریان، پنج عدد فرود جریان = Fr) در نظر گرفته شده است که درآن U_0 سرعت متوسط ورودی جریان، g شتاب جاذبه و h عمق جریان است. مقادیر U_0 / \sqrt{gh} عدد فرود، ۰/۱۰ ، ۰/۱۰ ، ۰/۲۰ ، ۲۵/۰ و ۳۰/۰ است. دلیل انتخاب این اعداد این است که اکثر جریان های مورد بررسی در تحقیقات سایر محققین مدلسازی های آزمایشگاهی و یا عددی در این محدوده بوده است (& Aghaee-Shalmani Hakimzadeh, 2015; Baker, 1979; Dargahi, 1989; Roulund et al., 2005; Salaheldin et al., 2004). علاوهبراين، انتخاب این محدوده از عدد فرود به این دلیل است که بسیاری از محققین از اثر تغییر سطح آب در مدلسازی عددی در عددهای فرود کوچک صرف نظر کردهاند. در صورتی که به نظر میرسد استفاده از این فرض ساده شونده میتواند خطاهای قابل توجهی در نتایج ایجاد کند. در جدول (۱) مشخصات جریان مورد استفاده در حالات مختلف نشان داده شده است. در ستون اول جدول، شماره مدلسازی عددی و ستون دوم Q دبی جریان بر حسب متر مکعب بر ثانیه و سایر ستونها بهترتیب نشان دهنده سرعت متوسط جریان ورودی، عمق جریان و قطر پایه است. در مدلسازیهای این پژوهش برای هر عدد فرود و عمق جریان، سرعت جریان ورودی محاسبه و در ورودی کانال لحاظ شده است.



شکل ۲– مقایسه نتایج پروفیل سرعت قائم در عمق جریان در پژوهش حاضر با نتایج آزمایشگاهی مندرج در (2004) . الف) بالادست یایه ب) یایین دست یایه

Fig 2. Comparison of the results of the vertical velocity profile at the flow depth in the present study with the experimental results reported in (Salaheldin et al., 2004). a) Upstream of the pier, and b) Downstream of the pier

No. of numerical test	Fr (-)	Q (m ³ /s)	U ₀ (m/s)	<i>h</i> (m)	D (m)
Verification	•/\\٦	•/•VA	•/٢٦	•/٢•	•/10
١	•/\•	•/•OAV	•/1077	۰/۲٥	٠/٢٠
۲	•/10	•/•AA•	•/٣٤٩	۰/۲٥	•/٢•
٣	•/٢•	•/1172	•/٣١٣٢	۰/۲٥	•/٢•
٤	•/٢٥	•/127٨	•/٣٩١٥	۰/۲٥	٠/٢٠
٥	٠/٣٠	•/١٧٦١	•/2٦٩٨	•/٢٥	•/٢•

جدول ۱- مشخصات جریان در کانال برای مدلسازی های مختلف Table 1. Flow characteristics in the channel for different modeling

۳- نتايج و بحث

در اثر عبور جریان از اطراف پایه تغییراتی در سطح آب ایجاد می گردد. شکل شماتیک تغییرات سطح آب در صفحه تقارن جریان در هنگام عبور از اطراف پایه در شکل (۳) نشان داده شده است. در مدلسازی با جریان سطح آزاد، سطح آزاد در جلوی پایه بالا آمده و در پشت و کنارههای پایه فروافتادگی در سطح آزاد ایجاد می شود.



Fig 3. Changes in the free surface of the flow around a cylindrical pier

در شکل (٤)، تغییرات سطح آزاد جریان در محور تقارن جریان، در بالادست و پاییندست پایه بهازای اعداد فرود ۲۰۱۰، ۱۰، ۲۰۱۰، ۲۰۱۰ و ۲۳۰۰ نشان داده شده است. همانطور که در این شکل مشاهده می شود، بیشینه ارتفاع سطح آزاد جریان با افزایش عدد فرود افزایش پیدا می کند. در پاییندست و در پشت پایه ارتفاع سطح آزاد جریان کاهش می یابد؛ اما تقریبا سطح جریان ابتدا و انتهای کانال یکسان است. افزایش عمق آب در جلوی پایه می تواند ناشی از افزایش فشار در جلوی پایه و تغییرات فشار دینامی کی راکد در عمق جریان در مجاورت پایه باشد (Aghace-Shalmani & Hakimzadeh, 2015; Salaheldin et al., 2004). به همین ترتیب کاهش عمق در پشت پایه ناشی از ایجاد میدان کم فشار در پشت پایه است. در جلوی پایه با توجه به افزایش عمق، یک موج کمانی کوچک ایجاد می شود. مقادیر بیشینه و کمینه سطح آب در بالادست و پاییندست پایه در حالت سطح آزاد در جدول (۲) ارائه شده است. بر اساس جدول (۲) بیشترین بالا آمدگی سطح آب در بالادست و پاییندست پایه مربوط به عدد فرود ۲۰/۰، مقدار آن ۲۲۲/۰ متر است و کمترین عمق آب در پشت پایه نیز مربوط به همین عدد فرود و مقدار آن ۵۵/۰، متر است. اختلاف سطح آب در جلو و پشت پایه برای اعداد فرود ۲۰۱۰، ۲۰۱۰، ۲۰۱۰، و ۲۰/۰ به ترتیب برابر ۲۰۰۰، ۲۰۱۰، ۲۰۰۰، ۲۰۱۰، ۲۰۱۰،



Fig 4. Changes in free surface level upstream and downstream of the pier

Fr	The highest free-surface level at upstream (m)	The lowest free-surface level at downstream (m)
•/1•	•/٣٤٩٤	•/720•
•/10	• /٢٥٣٠	•/YEVV
•/٢•	•/\00•	•/1270
•/٢٥	•/٢٥٨١	•/7209
۰/۳۰	•/7772	•/7207

جدول ۲- بیشینه و کمینه تراز سطح آب در بالادست و پاییندست پایه در حالت سطح آزاد Table 2. Maximum and minimum free-surface level upstream and downstream of the pier in free surface mode

در شکل (۵)، تغییرات سطح آب در مقطع عرضی کانال در صفحه y-z و در مختصات x=0 نمایش داده شده است. همانگونه که از شکل پیدا است، عمق جریان در کناره های پایه کاهش مییابد. افزایش عدد فرود جریان باعث افزایش فروافتادگی سطح آب در کناره های پایه شده است. علت کاهش عمق جریان، کاهش فشار در کناره های پایه است. محدوده این کاهش فشار از کناره های پایه و تا پشت پایه گسترش مییابد (۵)، بیشترین کاهش عمق آب (فروافتادگی سطح آب) در عدد فرود ۳۰ رخ داده است که تغییرات تراز سطح آزاد آب نسبت به تراز اولیه، ٤ درصد است.

شکل ۵– تغییرات سطح آزاد جریان آزاد به ازای اعداد فرود متفاوت در صفحه y-z و در مختصات x=0



Fig 5. Changes in the free surface for different Froude numbers in the y-z plane and at the x=0 coordinate

در شکل (٦)، تغییرات سرعت جریان رو به پایین در جلوی پایه برای مقادیر مختلف عدد فرود در دو مدلسازی با سطح آزاد و ثابت با یکدیگر مقایسه شدهاند. با توجه به این شکل در هر دو حالت، حداکثر سرعت جریان رو به پایین در مجاورت بستر رخ میدهد و قدر مطلق آن با افزایش عدد فرود افزایش مییابد. علاوهبراین، این مورد برای مدلسازیهای با سطح آزاد، جریان رو به بالا (با سرعت قائم مثبت) در نزدیک سطح آب مشاهده میشود و در مدلسازی بدون سطح آزاد چنین جریانی وجود ندارد. با توجه به شکل، مدلسازی با سطح آزاد و ثابت تفاوتهایی را در مقدار سرعت ۷۷ در جلوی پایه نشان میدهد. کمترین تفاوت میان دو مدلسازی در عدد فرود ۱۰/۰ رخ داده و بیشترین تفاوت در عدد فرود ۲۵/۰ و ۲۰/۰ رخ میدهد. همچنین بیشترین اختلاف بین سرعت در مجاورت بستر برای عدد فرود ۲۵/۰ با اختلاف ۱۷ درصد است. این اختلاف در تراز نزدیک سطح آزاد برای عدد فرود ۲۰۳۰ در حالت با سطح آزاد نسبت به بدون سطح آزاد قابل توجه است.

نمودار تغییرات سرعت افقی u در صفحه افقی x-y و در مختصات x=0 در عرض کانال در شکل (۷) نشان داده شده است. مطابق با منحنی های رسم شده، در هر دو حالت مدلسازی جریان با و بدون سطح آزاد در مجاورت پایه استوانهای تا لبههای دیوار کانال، سرعت افقی با روند کمی در حال کاهش است؛ زیرا جریان بعد از عبور از کنارههای پایه به حداکثر سرعت خود رسیده و مقدار این سرعت با نزدیک شدن به سمت دیوارههای کانال کاهش مییابد و به مقدار سرعت جریان دست نخورده در ابتدای کانال نزدیک می شود. مدلسازی جریان با استفاده از سطح آزاد، مقادیر بزرگتری از سرعت را در مقایسه با مدلسازی با سطح ثابت نشان میدهد که در تطابق نتایج مدلسازی عددی (Kara et al. (2015) است. اگرچه در مطالعه (2015) Kara et al. جریان اطراف یک پایهی کناری با مقطع مربع بررسی شده است. همچنین نتایج مربوط به سرعت افقی با نتایج مدلسازی عددی Khsronejd et al. (2019 & 2020) همخوانی دارد. با مقایسه سرعتهای افقی کناره پایهها در اعداد فرود متفاوت در دو حالت جریان با سطح آزاد و ثابت مشخص می گردد که در عدد فرود ۰/۱۰ کمترین تفاوت میان مقادیر سرعت در این دو نوع مدلسازی دیده میشود. با افزایش عدد فرود، تفاوت بین نتایج مدلسازی در حداکثر سرعت جریان بیشتر میگردد. در جدول (۳) مقادیر مربوط به حداکثر سرعت افقی جریان برای دو حالت جریان با سطح آزاد و ثابت ارائه شده است. سرعتهای مذکور در این جدول، در دو موقعیت مختلف نسبت به خط تقارن پایه (y=0.09 m و y=0.2 m) استخراج شدهاند که در آنها بیشترین اختلاف بین سرعتها در دو حالت با سطح آزاد و بدون سطح آزاد مشاهده شده است. افزایش شدید سرعت در موقعیت y=0.07 ناشی از ایجاد جریان برشی و جریان انقباضی در کنارههای پایه است. همچنین اختلاف سرعتها در موقعیت y=0.09 m مي تواند بهدليل امواج شوک ناشي از برخورد و عبور جريان از اطراف پايه باشد (;Wang, 2010; Kahraman et al., 2020) Geng et al., 2020). بیشترین تفاوت بین دو مدلسازی برای عدد فرود ۰/۳۰ رخ داده است که مقدار تقریبی آن در هر دو مختصات ذكر شده بطور تقريبي ۲۰ درصد است.



شکل ۶- تغییرات سرعت قائم جریان سطح آزاد و ثابت در بالادست پایه بهازای اعداد فرود متفاوت

Fig.6. Changes in the vertical velocity of the free-surface and rigid-lid flow upstream of the pier for different Froud numbers



شکل ۷- تغییرات سرعت افقی u در مدلسازی جریان با سطح آزاد و ثابت در عرض کانال در مختصات x=0 بهازای اعداد فرود متفاوت

Fig 7. Changes in horizontal velocity u in modeling flow with a free surface and rigid-lid across the channel at coordinates x=0 for different Froude numbers

جدول ۳ – تغییرات عددی سرعت قائم بهازای اعداد فرود متفاوت در هر دو حالت با و بدون سطح آزاد

Table 3. Numerical changes in vertical velocity for different landing numbers in both cases with and without a free surface

Fr	Mode	<i>u</i> (m/s) <i>y</i> =0.09 m	<i>u</i> (m/s) <i>y</i> =0.2 m
•/\•	Rigid-Lid	•/710	•/179
	Free-Surface	•/٢••	•/١٣•
•/\0	Rigid-Lid	• /٣٥٥	•/1/0
	Free-Surface	•/٣٦•	•/71•
•/٢•	Rigid-Lid	•/٤٨٠	•/70•
	Free-Surface	•/01•	•/79•
•/٢٥	Rigid-Lid	•/09•	•/79•
	Free-Surface	•/٦٦•	•/٣٧•
• /٣•	Rigid-Lid	• /V0	•/٣٧•
	Free-Surface	•/	•/20•

در شکل (۸)، تغییرات سرعت در طول میدان محاسباتی در محور تقارن پایه 0=y در مجاورت کف (m 2.0025 m) در بالادست و پاییندست پایه برای دو مدلسازی با و بدون سطح آزاد رسم شده است. همانگونه که در شکل ملاحظه میگردد، سرعت جریان در نزدیک شدن به پایه کاهش یافته و به صفر میرسد و پس از آن یک مقدار منفی را تجربه میکند. این مقدار منفی نشانگر جریان برگشتی در بالادست پایه در مجاورت بایه در محاورت بستر است که باعث ایجاد گردابه نعل اسبی میشود. با توجه به این مقدار شکی نشانگر جریان برگشتی در بالادست پایه بایه در محاورت بایه می کردد، سرعت جریان در نزدیک شدن به پایه کاهش یافته و به صفر میرسد و پس از آن یک مقدار منفی را تجربه میکند. این مقدار منفی نشانگر جریان برگشتی در بالادست پایه در مجاورت بستر است که باعث ایجاد گردابه نعل اسبی میشود. با توجه به این شکل، مقدار سرعت جریان در جلوی پایه مورت میگیرد. در پشت پایه تغییرات سرعت از مقدار منفی در مجاورت پایه تا معاد مرود افزایش یافته است. این افزایش با توجه به این سرعت شکل، مقدار سرعت جریان در جلوی پایه میرد. در پشت پایه تغییرات سرعت از مقدار منفی در مجاورت پایه تا می در میران بای می در میرد. با توجه به این شکل مقدار سرعت جریان برگشتی در جلوی پایه با افزایش عده فرود افزایش یافته است. این افزایش با توجه به این جریان بری می در محاورت پایه تغییرات سرعت این افزایش با توجه به افزایش سرعت

در فواصل دور از پایه است. با توجه به ناحیه سرعت منفی در پشت پایه می توان طول جدایش در پایین دست پایه در مجاورت بستر را بدست آورد. نتایج حاصل از دو مدلسازی با و بدون سطح آزاد نشان می دهد که مقادیر سرعت در این مقطع دارای اختلاف با یکدیگر است. مقدار این اختلاف در پایین دست بیشتر است. طول جدایش در پایین دست پایه در مجاورت بستر برای مدلسازی با سطح آزاد برای اعداد فرود ۳۰،۰ و ۲۰۱۰ بزرگتر از مدلسازی جریان بدون سطح آزاد است و در بقیه اعداد فرود این طول برای مدلسازی با سطح آزاد کوچکتر از مدلسازی بدون سطح آزاد است. طول جدایش در بالادست تفاوت چشمگیری بین دو نوع مدلسازی نشان نمی دهد. اگرچه که طول جدایش برای مدلسازی بدون سطح آزاد کمی از مدلسازی با سطح آزاد بر یا سطح است. تفاوت دیگر در پروفیل سرعت در پایین دست پایه، به نوسانات سرعت در مدلسازی بدون سطح آزاد در مقایسه با مدلسازی با سطح آزاد است. این نوسانات می تواند ناشی از نوسانات فشار در پشت پایه و عدم تغییرات سطح آزاد باشد که در جریان با سطح آزاد است. این نوسانات می تواند ناشی از نوسانات فشار در پشت پایه و عدم تغییرات سطح آزاد باشد که در جریان با



شکل ۸- تغییرات سرعت افقی u جریان سطح آزاد و ثابت در عرض کانال در مختصات y=0 و z = 0.0025 x بهازای اعداد فرود متفاوت

Fig 8. Variations of horizontal velocity u of free-surface and rigid-lid flow across the channel at coordinates y=0and z = 0.0025 for different Froude numbers

٤- نتيجه گيرى

در مطالعه حاضر به بررسی جریان اطراف پایههای استوانهای در دو حالت با سطح آزاد و بدون سطح آزاد پرداخته شد. نتایج حاصل از مدلسازی با روش RANS و مدل آشفتگی RNG برای جریانهای زیر بحرانی در اطراف پایه نشان داد که با افزایش عدد فرود جریان، نتایج حاصل از مدلسازی با سطح آزاد و بدون سطح آزاد اختلاف بیشتری با هم دارند. از جمله اختلاف بین سرعت جریان رو به پایین در جلوی پایه، اختلاف بین مولفه سرعت افقی در خط تقارن پایه و همچنین سرعت افقی در مجاورت بستر در خط تقارن میدان محاسباتی در راستای جریان اشاره کرد. تفاوت بین سرعت جریان رو به پایین در جلوی پایه برای عدد فرود مرکا، برابر ۱۷ درصد است. مولفه سرعت افقی در صفحه y-x در دو مدلسازی برای عدد فرود ۰۰/۰۰ دارای بیشترین تفاوت است و مقدار آن برابر ۱۷ درصد است. طول جدایش در بالادست جریان در مجاورت بستر در دو مدل تفاوت است و مقدار آن برابر ۱۰ درصد است. طول جدایش در بالادست جریان در مجاورت بستر در دو مدل تفاوت است و مقدار آن برابر ۱۰ درصد است. طول جدایش در بالادست جریان در مجاورت بستر در دو مدل تفاوت است و مقدار آن برابر ۱۰ درصد است. طول جدایش در بالادست جریان در مجاورت بستر در دو مدل تفاوت است و مقدار آن برابر ۱۰ درصد است. طول مدایش در بالادست جریان در مجاورت استر در دو مدل تفاوت است و مقدار آن برابر ۱۰ درصد است. طول مدایش در بالادست می از در مجاورت بستر در دو مدل تفاوت این نشان نمی دهد؛ و مقدار آن برابر ۱۰ درصد است. طول مدایش در بالادست می از در مجاورت است. نتایج حاصل از این پژوهش نشان داد که اما این طول برای مدلسازی بدون سطح آزاد از مدلسازی با سطح آزاد کمی بزرگتر است. نتایج حاصل از این پژوهش نشان داد که عدم در نظر گرفتن سطح آزاد در مدلسازیهای عددی می تواند تفاوتهایی را در الگوی جریان اطراف پایهها نسبت به مدلسازی

تضاد منافع نویسندگان

نویسندگان این مقاله اعلام میدارند که هیچ تضاد منافعی در رابطه با نویسندگی و یا انتشار این مقاله ندارند.

دسترسی به دادهها

دادهها و نتايج استفاده شده در اين پژوهش از طريق مكاتبه با نويسندهٔ مسئول در اختيار قرار خواهد گرفت.

مشارکت نویسندگان

مهدی اسمعیلزاده فریدنی و یاسین آقایی شلمانی: نگارش، روششناسی، تحقیق و جمعآوری دادهها و نرمافزار. **یاسین آقایی شلمانی**: تحلیل، راهنمایی و نظارت، ویرایش متن، تکمیل و جمعآوری دادهها.

منابع

Aghaee-Shalmani, Y., and Hakimzadeh, H. (2015). Investigation of the local scouring pier of the bridge with variable cross-section. Ph.D. Thesis, Sahand University of Technology, Tabriz, 268p. (In Persian)

Baker, C. J. (1979). The laminar horseshoe vortex. *Journal of fluid mechanics*, 95(2), 347-367. https://doi.org/10.1017/S0022112079001506

Chen, S., Zhao, W., & Wan, D. (2020). CFD study of free surface effect on flow around a surface-piercing cylinder. In *ISOPE Pacific/Asia Offshore Mechanics Symposium* (pp. ISOPE-P). ISOPE.

Dargahi, B. (1989). The turbulent flow field around a circular cylinder. *Experiments in fluids*, 8, 1-12. https://doi.org/10.1007/BF00203058

Flow Science, Inc. FLOW-3D® Version 10.0 (Computer software). https://www.flow3d.com(2011)

Geng, Y. F., Guo, H. Q., & Ke, X. (2020). The flow characteristics around bridge piers under the impact of a ship. Journal of *Hydrodynamics*, *32*(6), 1165-1177. https://doi.org/10.1007/s42241-020-0082-5

Graf, W.H. and Altinakar, M.S. (1998). Flow and transport processes in channels of simple geometry. New York, 678P.

Istiarto, I. (2001). Flow around a cylinder in a scoured channel bed. Lausanne, Switzerland: Ecole Polytechnique Federale de Lausanne, Master's Thesis, 263p.

Kahraman, R., Riella, M., Tabor, G. R., Ebrahimi, M., Djordjević, S., & Kripakaran, P. (2020). Prediction of flow around a sharp-nosed bridge pier: influence of the Froude number and free-surface variation on the flow field. *Journal of*

Hydraulic Research, 58(4), 582-593. https://doi.org/10.1080/00221686.2019.1631223

Kara, S., Kara, M. C., Stoesser, T., & Sturm, T. W. (2015). Free-surface versus rigid-lid LES computations for bridgeabutment flow. *Journal of Hydraulic Engineering*, 141(9), 04015019. https://doi.org/10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.000102

Khosronejad, A., Ghazian Arabi, M., Angelidis, D., Bagherizadeh, E., Flora, K., & Farhadzadeh, A. (2019). Comparative hydrodynamic study of rigid-lid and level-set methods for LES of open-channel flow. *Journal of Hydraulic Engineering*, *145*(1), 04018077. https://doi.org/10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.0001546

Khosronejad, A., Arabi, M. G., Angelidis, D., Bagherizadeh, E., Flora, K., & Farhadzadeh, A. (2020). A comparative study of rigid-lid and level-set methods for LES of open-channel flows: Morphodynamics. *Environmental Fluid Mechanics*, 20, 145-164. https://doi.org/10.1007/s10652-019-09703-y

Launay, G., Mignot, E., Rivière, N., & Perkins, R. (2017). An experimental investigation of the laminar horseshoe vortex around an emerging obstacle. *Journal of Fluid Mechanics*, 830, 257-299. https://doi.org/10.1017/jfm.2017.582

Li, D., Yang, Q., Ma, X., & Dai, G. (2018). Free surface characteristics of flow around two side-by-side circular cylinders. *Journal of Marine Science and Engineering*, 6(3), 75. https://doi.org/10.3390/jmse6030075

Nasif, G., Balachandar, R., & Barron, R. M. (2016). Mean characteristics of fluid structures in shallow-wake flows. *International Journal of Multiphase Flow*, *82*, 74-85. https://doi.org/10.1016/j.ijmultiphaseflow.2016.03.001 Raudkivi, A. J., & Ettema, R. (1983). Clear-water scour at cylindrical piers. *Journal of hydraulic engineering*, *109*(3), 338-350. https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(1983)109:3(338)

Roulund, A., Sumer, B. M., Fredsøe, J., & Michelsen, J. (2005). Numerical and experimental investigation of flow and scour around a circular pile. *Journal of Fluid mechanics*, 534, 351-401. https://doi.org/10.1017/S00221120050045079

Salaheldin, T. M., Imran, J., & Chaudhry, M. H. (2004). Numerical modeling of three-dimensional flow field around circular piers. *Journal of Hydraulic Engineering*, *130*(2), 91-100. https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(2004)130:2(91)

Shaheed, R., Mohammadian, A., & Shaheed, A. M. (2025). Numerical Simulation of Turbulent Flow in River Bends and Confluences Using the k-ω SST Turbulence Model and Comparison with Standard and Realizable k-ε Models. *Hydrology*, *12*(6), 145. https://doi.org/10.3390/hydrology12060145

Stipa, S., Ahmed Khan, M., Allaerts, D., & Brinkerhoff, J. (2024). A large-eddy simulation (LES) model for wind-farminduced atmospheric gravity wave effects inside conventionally neutral boundary layers. Wind Energy Science, 9(8), 1647-1668. https://doi.org/10.5194/wes-9-1647-2024, 2024

TĂNASE, N. O., BROBOANĂ, D., & BĂLAN, C. (2014). Flow around an immersed cylinder in the presence of free surface. *Scientific Bulletin, Series D, UPB*, *76*(2), 259-266.

Wang, J. S. (2010). Flow around a circular cylinder using a finite-volume TVD scheme based on a vector transformation approach. *Journal of Hydrodynamics, Ser. B*, 22(2), 221-228. https://doi.org/10.1016/S1001-6058(09)60048-2