



Research Article

Scouring Depth Analytical Evaluation in Box Foundation Bridges Case Study: (The Zanjan River Bridge)

Esmail Abdollahi¹, Bahador Fatehi-Nobarian^{2*}

¹MS.c Student, Department of Civil Engineering, Ara.C., Islamic Azad University, Jolfa, Iran.

² Assistant Professor Department of Civil Engineering of Hydraulic Structures, Ara.C., Islamic Azad University, Jolfa, Iran. Correspondence: [ORCID:0000-0003-3535-9710](https://orcid.org/0000-0003-3535-9710)

Received: 22 July 2025; Revised: 25 August 2025; Accepted: 30 August 2025; Published: 23 September 2025

Abstract: Accurate design of bridge piers over rivers requires a clear understanding of scour behavior and the surrounding flow patterns. The selection of span length, number of openings, and minimum pier depth must consider the region's hydrological and hydraulic characteristics. In this study, the effects of flow discharge and river depth on scour depth around the Zanjanrud Bridge pier were investigated. Numerical methods and various empirical equations were employed to estimate the scour depth, and the results were compared with actual field data. A linear fit between observed and estimated scour depths, along with statistical analysis, showed that some empirical formulas provided higher accuracy than others. Additionally, the finite volume (FV) numerical method demonstrated good performance in predicting scour depth due to its ability to model complex flows while preserving conservation principles. The findings of this research can contribute to improved bridge pier design and help mitigate scour-related damages.

Keyword: Bridge, Foundation, Smooth Particle, Hydrodynamics, Vortex Scour, Depth River

Cite this article as: Abdollahi E., Fatehi-Nobarian B. (2025). 'Scouring Depth Analytical Evaluation in Box Foundation Bridges', *Civil and Project*, 7(7), e228046. <https://doi.org/10.22034/cpj.2025.542748.1395>
5.542748.1395ISSN: 2676-511X / Copyright: © 2025by the authors.

Open Access: This article is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License, which permits use, sharing, adaptation, distribution and reproduction in any medium or format, as long as you give appropriate credit to the original author(s) and the source, provide a link to the Creative Commons licence, and indicate if changes were made. The images or other third party material in this article are included in the article's Creative Commons licence, unless indicated otherwise in a credit line to the material. If material is not included in the article's Creative Commons licence and your intended use is not permitted by statutory regulation or exceeds the permitted use, you will need to obtain permission directly from the copyright holder. To view a copy of this licence, visit <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

Journal's Note: CPJ remains neutral with regard to jurisdictional claims in published maps and institutional affiliations.

*Corresponding author E-mail address: bfatehinobarian@iaau.ac.ir



نشریه عمران و پروژه
<http://www.cpjournals.com/>

ارزیابی تحلیلی عمق آب‌شستگی در پل‌ها با پایه‌های صندوقچه‌ای

(مطالعه موردی: پل زنجان رود)

اسماعیل عبدالهی^۱، بهادر فاتحی نوبریان^{۲*}

^۱ دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی عمران، واحد ارس، دانشگاه آزاد اسلامی، جلفا، ایران.

^۲ استادیار گروه مهندسی عمران، مهندسی آب و سازه‌های هیدرولیکی، واحد ارس، دانشگاه آزاد اسلامی، جلفا، ایران.

ORCID: ۰۰۰۰-۰۰۰۳-۳۵۳۵-۹۷۱

تاریخ دریافت: ۳۱ تیر ۱۴۰۴؛ تاریخ بازنگری: ۰۳ شهریور ۱۴۰۴؛ تاریخ پذیرش: ۰۸ شهریور ۱۴۰۴؛ تاریخ انتشار آنلاین: ۰۱ مهر ۱۴۰۴

چکیده :

طراحی دقیق پایه‌های پل بر رودخانه مستلزم شناخت رفتار آب‌شستگی و جریان اطراف آن است. انتخاب طول و تعداد دهانه‌ها و عمق حداقل پایه‌ها، اطلاعات هیدرولوژیکی و هیدرولیکی منطقه باید در نظر گرفته شود. در این پژوهش، تأثیر دبی جریان و عمق رودخانه بر عمق آب‌شستگی در پایه پل زنجان رود بررسی شده است. برای این منظور، از روش‌های عددی و روابط تجربی مختلف جهت تخمین عمق آب‌شستگی استفاده شد و نتایج با داده‌های واقعی مقایسه گردید. برازش خطی بین عمق واقعی و تخمینی همراه با تحلیل آماری نشان داد که برخی روابط تخمینی دقت بالاتری نسبت به دیگر روش‌ها دارند. همچنین، روش عددی حجم محدود (FV) به دلیل توانایی در مدل‌سازی جریان پیچیده و حفظ پایستگی، عملکرد مناسبی در پیش‌بینی عمق آب‌شستگی نشان داد. نتایج این مطالعه می‌تواند در بهبود طراحی پایه‌های پل و کاهش آسیب‌های ناشی از آب‌شستگی مؤثر باشد.

کلمات کلیدی: پایه پل، هیدرودینامیک ذرات هموار، گردابه، عمق آب‌شستگی، رودخانه

۱ - مقدمه

آب‌شستگی یکی از مهم‌ترین فرآیندهای ژئومورفولوژیکی در رودخانه‌هاست که در نتیجه تعامل میان جریان آب و مصالح بستر ایجاد می‌شود. این پدیده به‌ویژه در اطراف سازه‌های هیدرولیکی مانند پل‌ها، تأثیر مستقیمی بر پایداری و ایمنی آن‌ها دارد. عمق آب‌شستگی به‌عنوان شاخصی از میزان فرسایش بستر نسبت به وضعیت اولیه، همواره در طراحی و نگهداری سازه‌های رودخانه‌ای مورد توجه قرار گرفته است (Fernández et al., 2020). مطالعات متعددی به بررسی مکانیزم‌های مختلف آب‌شستگی پرداخته‌اند که از مهم‌ترین آن‌ها می‌توان به آب‌شستگی عمومی، آب‌شستگی ناشی از انقباض مقطع و آب‌شستگی موضعی اشاره کرد (Cui et al., 2017; Ismael et al., 2017; Helmi et al., 2021). در این میان، آب‌شستگی موضعی پیرامون پایه‌های پل‌ها، بیشترین سهم را در تخریب این سازه‌ها دارد (Zaid et al., 2019). نقش ویژگی‌های رسوب، به‌ویژه شکل و دانه‌بندی آن‌ها، در کنترل شدت و عمق آب‌شستگی به‌خوبی اثبات شده است (Man et al., 2023; Bento et al., 2019; al., 2019). نوع جریان (آب زلال یا بستر زنده) نیز یکی دیگر از عوامل تأثیرگذار است که در شرایط مختلف می‌تواند رفتار متفاوتی را از خود نشان دهد (Yang et al., 2020; Qi et al., 2020; Bordbar et al., 2021). آب‌شستگی در حالت آب زلال زمانی اتفاق می‌افتد که جریان فاقد رسوب معلق از بالادست باشد، در حالی که در حالت بستر زنده، جریان حاوی رسوب فعال است. مقایسه این دو وضعیت نشان می‌دهد که در حالت آب زلال، عمق آب‌شستگی می‌تواند تا ۱۰ درصد بیشتر باشد (Jia et al., 2018).

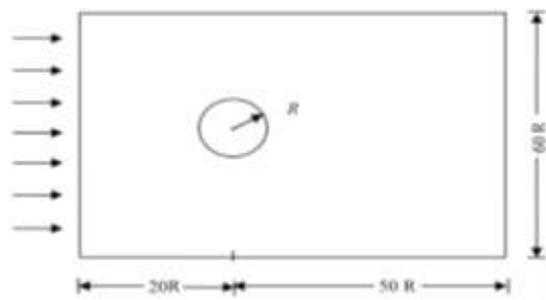
پژوهش‌های اخیر نیز تلاش کرده‌اند تا با استفاده از مدل‌های عددی و روابط تجربی، به تخمین دقیق‌تری از عمق آب‌شستگی دست یابند (Rasaei et al., 2020; Kumar et al., 2019). در این میان، ترکیب داده‌های صحرایی با مدل‌سازی نرم‌افزاری، به‌عنوان یک رویکرد نوین، توانسته است اعتبار نتایج را افزایش دهد. همچنین، بررسی اثر متغیرهایی نظیر عدد فرود، سرعت جریان، موقعیت استقرار آبشکن‌ها و مشخصات هندسی پل‌ها در مطالعات مختلف مورد تأکید قرار گرفته است (Tian et al., 2023; Dutta et al., 2022; Gautam et al., 2021; Gupta et al., 2023). با این حال، در بسیاری از مطالعات داخلی، به‌ویژه در زمینه پل‌های موجود در ایران، بررسی میدانی جامعی صورت نگرفته و همچنان خلأ اطلاعاتی درباره تأثیر پارامترهای بومی بر رفتار آب‌شستگی وجود دارد. به‌علاوه، استفاده از روش‌های مرسوم بدون ارزیابی عملکرد آن‌ها در شرایط واقعی رودخانه‌ها، می‌تواند به برآوردهای نادقیق منجر شود. بر این اساس، تحقیق حاضر با هدف بررسی و مقایسه عمق آب‌شستگی پایه‌های پل زنگان‌رود با استفاده از روش‌های تجربی و مدل‌سازی نرم‌افزاری انجام شده است.

در این پژوهش، پس از برداشت میدانی از شیب رودخانه و مشخصات هندسی پل، عمق آب‌شستگی با استفاده از روابط شناخته‌شده‌ای نظیر ملویل، شن و همکاران، و بلنچ محاسبه و با نتایج مدل نرم‌افزاری مقایسه می‌شود. در ادامه، تأثیر متغیرهایی مانند دبی، دانه‌بندی بستر، نوسانات سطح آب و شرایط دمایی و بارشی بر شدت آب‌شستگی بررسی شده و بهترین مدل بر اساس شاخص‌های آماری چون RMSE، MAE و R^2 انتخاب می‌شود. نوآوری این تحقیق در استفاده هم‌زمان از داده‌های میدانی، تحلیل‌های آماری و شبیه‌سازی نرم‌افزاری برای ارائه روشی دقیق و بومی سازی شده جهت تخمین عمق آب‌شستگی در رودخانه‌های ایران است. پل‌ها از جمله زیرساخت‌های حیاتی در شبکه حمل‌ونقل هستند که پایداری آن‌ها نقش مهمی در تداوم خدمات شهری و روستایی ایفا می‌کند. یکی از مهم‌ترین تهدیدهای پایداری این سازه‌ها، پدیده آب‌شستگی در پایه‌های پل است. آب‌شستگی می‌تواند در مدت‌زمان کوتاهی موجب فرسایش شدید بستر رودخانه و بی‌ثباتی پایه‌های پل شود، به‌ویژه در زمان وقوع سیلاب‌ها که فشار هیدرولیکی جریان افزایش می‌یابد. علی‌رغم اهمیت این پدیده، در بسیاری از پروژه‌های عمرانی، ارزیابی دقیق عمق آب‌شستگی با استفاده از داده‌های بومی و میدانی نادیده گرفته می‌شود. از سوی دیگر، روابط تجربی مختلفی برای برآورد عمق آب‌شستگی ارائه شده‌اند که اغلب بر اساس شرایط خاص آزمایشگاهی یا رودخانه‌های غیرایرانی توسعه یافته‌اند. این مسئله باعث می‌شود که دقت این روابط در شرایط واقعی و بومی مانند رودخانه زنگان‌رود مورد تردید باشد. از این‌رو، شناخت دقیق رفتار آب‌شستگی در شرایط واقعی، مقایسه عملکرد مدل‌های تخمینی با نتایج مدل‌سازی نرم‌افزاری و یافتن دقیق‌ترین روش پیش‌بینی، مسئله‌ای ضروری و چالش‌برانگیز به‌شمار می‌آید. با توجه به افزایش تهدیدهای زیست‌محیطی، تغییرات اقلیمی، و افزایش وقوع سیلاب‌های شدید، بررسی دقیق پدیده آب‌شستگی در پل‌ها به‌ویژه در مناطق پرریسک، بیش از پیش اهمیت یافته است. پل زنگان‌رود به‌عنوان یکی از سازه‌های

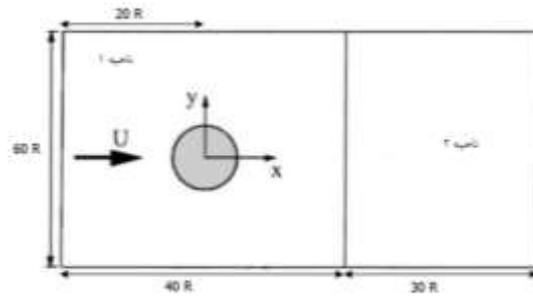
مهم حمل و نقل در منطقه شمال غرب ایران بر روی رودخانه زنگان رود احداث شده است. این پل طی سال‌های اخیر با پدیده‌ی فرسایش موضعی در اطراف پایه‌ها مواجه بوده که می‌تواند پایداری سازه را در درازمدت تهدید کند. انتخاب این پل به عنوان کیس مطالعاتی، علاوه بر اهمیت راهبردی آن، به دلیل ویژگی‌های هیدرولیکی خاص رودخانه، تغییرات قابل توجه دبی و در دسترس بودن داده‌های میدانی معتبر صورت گرفته است. بنابراین، مطالعه حاضر می‌تواند ضمن تحلیل دقیق رفتار جریان اطراف پایه‌ها، نتایج کاربردی برای مدیریت و کاهش خطرات ناشی از فرسایش در سازه‌های مشابه ارائه نماید. پل زنگان رود به عنوان یکی از سازه‌های حیاتی منطقه، با جریان‌های متغیر و رسوبات فعال روبه‌روست که ارزیابی دقیق عمق آب شستگی در آن می‌تواند از خسارات احتمالی در آینده جلوگیری کند. همچنین، نبود مطالعات بومی شده که شرایط هیدرولیکی و رسوبی خاص رودخانه‌های ایران را در نظر بگیرند، خلأ قابل توجهی در ادبیات علمی کشور ایجاد کرده است. این تحقیق با هدف مقایسه نتایج میدانی و نرم‌افزاری، سعی دارد روشی دقیق، سریع و قابل اطمینان برای تخمین عمق آب‌شستگی ارائه دهد تا در طراحی و نگهداری سازه‌های مشابه مورد استفاده قرار گیرد. افزون بر این، تحلیل تأثیر پارامترهایی نظیر دانه‌بندی بستر، دبی جریان، و شرایط اقلیمی (دما، بارش) می‌تواند افق‌های جدیدی را برای پیش‌بینی و مدیریت بهتر مخاطرات رودخانه‌ای فراهم آورد.

۲- بررسی مستقل بودن حل عددی از شبکه

در این بخش، استقلال و عدم وابستگی نتایج حل به شبکه‌ی محاسباتی در مطالعه‌ی جریان سیال اطراف سیلندر (پایه‌ی پل) بررسی می‌شود. برای ارزیابی میزان حساسیت و دستیابی به یک شبکه‌ی مناسب، چهار نوع شبکه‌ی محاسباتی برای هر روش در نظر گرفته شده و نتایج حاصل از آن‌ها با یکدیگر مقایسه شده است. در این پژوهش، تلاش شده است که موقعیت و فاصله‌ی مرزها نسبت به سیلندر به گونه‌ای تنظیم شوند که تأثیری بر جریان نداشته باشند و امکان شبیه‌سازی جریان با مرزهای نامحدود فراهم گردد. بدین منظور، مرزهای ورودی و خروجی در فواصل R20 و R50 از مرکز سیلندر قرار گرفته‌اند و فاصله‌ی مرزهای بالایی و پایینی نیز R30 در نظر گرفته شده است. قابل ذکر است که اگر فاصله‌ی مرزهای بالایی و پایینی از سیلندر کاهش یابد، ضرایب لیفت و درگ محاسبه شده نسبت به جریان با مرزهای نامحدود افزایش خواهند یافت. نمایی از مدل مذکور در شکل‌های (۱) و (۲) نشان داده شده است. همان‌طور که ذکر شد، چهار شبکه‌ی محاسباتی با اندازه‌های مختلف برای هر روش طراحی شده که جزئیات آن‌ها در جداول زیر آمده است. همچنین، هندسه‌ی موردنظر برای مدل عددی Flow3D در نرم‌افزار Gambit ایجاد شده و از طریق یک فایل واسطه که خروجی Gambit را به ورودی Flow3D تبدیل می‌کند، اطلاعات منتقل شده است. علاوه بر این، به دلیل ماهیت دایره‌ای مسئله، از المان‌های مثلثی شکل استفاده شده تا پوشش مناسبی در نواحی منحنی ایجاد گردد. مطلب دیگر اینکه چون الگوی جریان اطراف سیلندر مهم‌تر از قسمت‌های دیگر است اندازه‌ی مش آن در بررسی استقلال شبکه برای روش حجم محدود متغیر بوده (ناحیه ۱) و در فاصله‌ی R30 از مرز خروجی مش‌بندی ثابت می‌باشد (ناحیه ۲) که این مطالب در اشکال (۱) و (۲) نشان داده شده است. در روش SPH چون اعمال اندازه ذرات متغیر مشکل بوده از این موضوع صرف‌نظر می‌گردد. در اشکال (۳) و (۴) نمای کامل مش‌های ایجاد شده اطراف سیلندر (پایه پل)، در دو روش مذکور نشان داده شده است.



شکل ۱- نمایی از هندسه و ابعاد استفاده شده در مدل



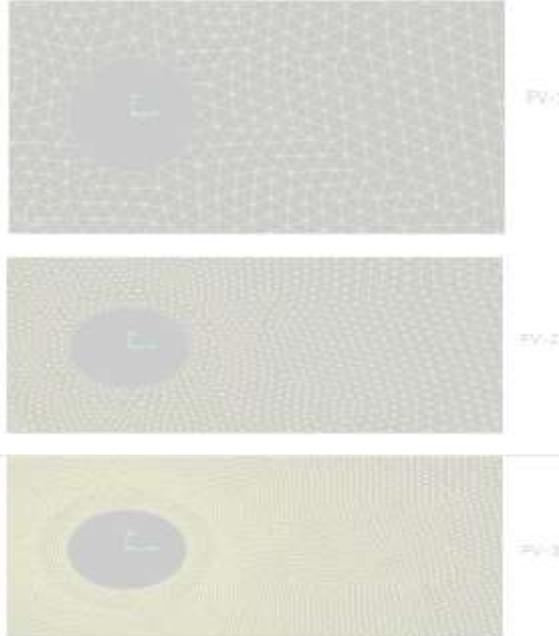
شکل ۲- نمایش محدوده‌ی ناحیه ۱ و ۲ برای مش‌بندی در روش حجم محدود

جدول ۱- جزییات اندازه ذرات در بررسی استقلال شبکه در روش SPH

نام شبکه	قطر ذرات (سانتیمتر)	تعداد ذرات مرزی	تعداد ذرات سیال	تعداد کل ذرات
SPH-1	۸	۸۲۸	۴۹۶۳	۵۷۹۱
SPH-2	۵	۱۳۳۷	۱۲۷۳۱	۱۴۰۶۸
SPH-3	۲	۳۳۷۰	۷۹۶۲۷	۸۲۹۹۷
SPH-4	۱	۶۷۵۸	۳۱۸۲۳۱	۳۲۴۹۸۹

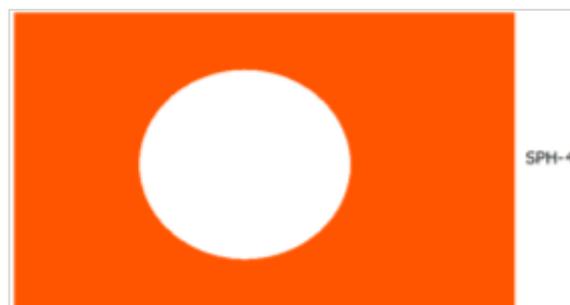
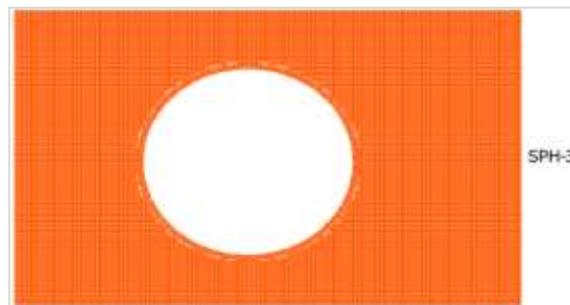
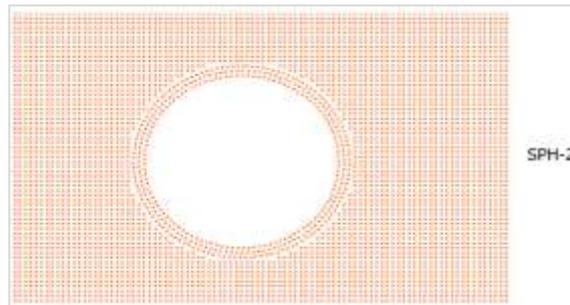
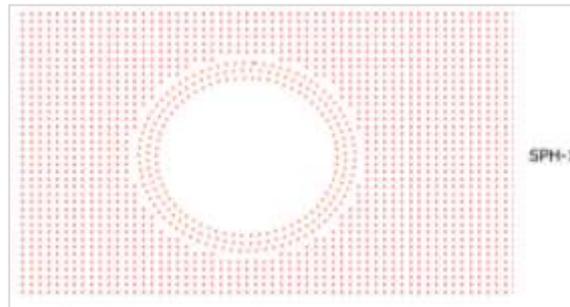
جدول ۲- جزییات تعداد سلول‌ها در نواحی ۱ و ۲ در روش حجم محدود

نام شبکه	تعداد سلول حول سیلندر	تعداد سلول در ناحیه ۱	تعداد سلول در ناحیه ۲	تعداد کل سلول
FV-1	۲۲	۱۰۸۳۶۴	۱۶۹۰۶	۱۲۵۲۷۰
FV-2	۴۵	۱۳۳۶۰۲	۱۶۹۰۶	۱۵۰۵۰۸
FV-3	۹۰	۲۰۸۳۶۸	۱۶۹۰۶	۲۲۵۲۷۴
FV-4	۱۲۵	۲۹۴۱۱۰	۱۶۹۰۶	۳۱۱۰۱۶





شکل ۳- شبکه‌بندی اطراف سیلندر در مدل عددی Gambit در روش حجم محدود (F.V)



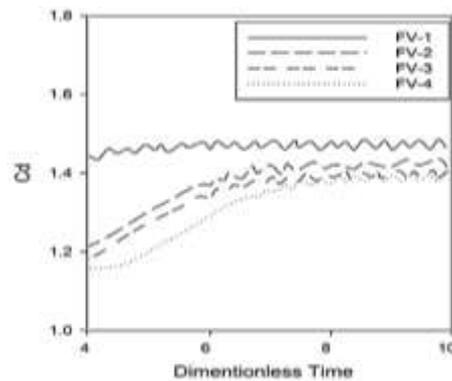
شکل ۴- اندازه ذرات مختلف اطراف سیلندر برای روش SPH

برای هر یک از مدل‌های گفته شده ضریب درگ سیلندر در رینولدز برابر ۱۰۰ مورد بررسی قرار گرفت. طبق پژوهش انجام گرفته توسط Tritton ضریب درگ برای رینولدز ۱۰۰ برابر ۱/۲۷ می‌باشد [۱۶] و این ضریب از رابطه‌ی (۱) بدست می‌آید:

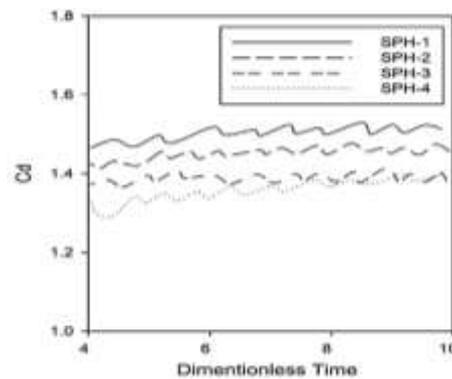
$$C_d = \frac{2F}{\rho u^2 D} \quad (1)$$

که در آن نیروی وارد بر سیلندر از طرف جریان، D قطر سیلندر، u سرعت ورودی متوسط جریان و ρ نیز چگالی سیال می باشد. برای تمامی مش بندی های بیان شده در هر دو روش حجم محدود و هیدرو دینامیک ذرات هموار ضریب درگ سیلندر عدد رینولدز ۱۰۰ در اشکال (۵) و (۶) ترسیم شده است. در این نمودارها زمان با استفاده از سرعت و قطر سیلندر به صورت $\frac{tU}{D}$ بی بعد شده است. برای انجام بررسی کمی در کنار تحلیل کیفی، درصد خطا تعریف شده و به مقایسه دقیق تر مش بندی های مختلف پرداخته می شود. در صورتی که مقدار ضریب درگ آزمایشگاهی به عنوان مقدار دقیق در نظر گرفته شود، درصد خطا می تواند با استفاده از رابطه (۲) محاسبه گردد:

$$\text{Error} = \left| \frac{C_d^{Num} - C_d^{Exp}}{C_d^{Exp}} \right| \times 100 \quad (2)$$



شکل ۵- تغییرات ضریب درگ برای شبکه های FV-1 تا FV-4



شکل ۶- تغییرات ضریب درگ برای شبکه های SPH-1 تا SPH-4

نتایج ضرایب درگ برای شبکه های محاسباتی مذکور در جدول (۳) نشان داده شده است.

جدول ۳- ضریب درگ و درصد خطا برای شبکه محاسباتی مختلف

نام شبکه	ضریب درگ برای اعداد رینولدز ۱۰۰	درصد خطا
FV-1	۱/۴۷	۱۵/۷
FV-2	۱/۴	۱۰/۲
FV-3	۱/۳۴	۵/۵
FV-4	۱/۳۲	۳/۹
SPH-1	۱/۴۶	۱۵
SPH-2	۱/۴۳	۱۲/۶

۸/۷	۱/۳۸	SPH-3
۶/۳	۱/۳۵	SPH-4

همان‌طور که مشاهده می‌شود برای روش حجم محدود ضرایب درگ دقیق‌تر از روش SPH محاسبه شده‌اند. اگرچه با ریزتر شدن شبکه محاسباتی دقت افزایش می‌یابد اما باید به این نکته نیز دقت داشت که این امر موجب افزایش زمان محاسبات شده و باید حد بهینه‌ای را یافت که تعادل بین دقت و هزینه محاسبات ایجاد گردد. بدین منظور با توجه به زمان اجرای بسیار زیاد مدل‌ها مخصوصاً در روش SPH شبکه‌های FV-3 و SPH-3 برای ادامه‌ی کار انتخاب می‌گردند.

۲-۱- آماده سازی و انطباق مدل‌ها

در این پژوهش، دو روش عددی حجم محدود و SPH برای مدل‌سازی فرآیند آب‌شستگی اطراف پایه‌های پل زنجان رود به کار گرفته شده است. هر دو روش برای اجرا نیاز به مجموعه‌ای از داده‌های ورودی دارند که می‌توانند از طریق آزمون و خطا به دست آیند یا از نتایج تحقیقات پیشین استخراج شوند. در این بخش، اطلاعات مربوط به هر یک از این روش‌ها و نحوه استفاده از آن‌ها برای شبیه‌سازی و تحلیل مدل‌ها ارائه می‌شود. در روش SPH، برای تعیین مرزهای بالا، پایین و همچنین سیلندر، از شرط مرزی دینامیکی بهره گرفته شده است. این شرط مرزی نسبت به ذرات دافع قابلیت بیشتری در برآورد شرایط عدم لغزش دارد. برای افزایش دقت در محاسبه نیروهای وارد بر جسم، لایه‌های بیشتری از ذرات مرزی در نظر گرفته شده‌اند. علاوه بر این، مرزهای جانبی به صورت پرئودیک شبیه‌سازی شده و برای ذرات ورودی، شرط سرعت ثابت اعمال شده است. در این مدل‌سازی، از کرنل درجه پنجم استفاده شده و تکنیک‌های مقداردهی اولیه‌ی چگالی و تصحیح کرنل در هر ۳۰ گام زمانی اعمال گردیده‌اند. همچنین، طول هموار برابر با $h=1.3dx$ در نظر گرفته شده که در آن dx فاصله اولیه بین ذرات است. به منظور شبیه‌سازی پدیده‌های آشفته‌گی جریان و تشکیل گردابه‌ها در اطراف سیلندر، مدل ویسکوزیته آشفته به کار گرفته شده است. برای ایجاد جریان در SPH، می‌توان از شتاب یا سرعت اولیه استفاده کرد. در صورت اعمال سرعت اولیه، تمامی ذرات سیال در لحظه شروع مقدار اولیه‌ی دریافت کرده و این مقدار به ذرات ورودی از مرز ورودی اختصاص می‌یابد. در صورت اعمال شتاب، شتاب مصنوعی به ذرات اعمال می‌شود که بسته به سرعت متوسط ذرات ورودی تنظیم می‌شود. در مدل حجم محدود، تنظیمات شرایط اولیه و مرزی در فایل‌های مربوطه انجام می‌شود. در فایل مربوط به فشار روی سطح سیلندر، گرادیان فشار صفر و همچنین گرادیان فشار در مرز ورودی صفر و در مرز خروجی فشار برابر فشار اتمسفر می‌باشد. برای سرعت نیز فرض بر این است که سیال در حال سکون است و نوسان در جریان به صورت طبیعی رخ می‌دهد. روی سیلندر شرط عدم لغزش حاکم بوده و برای مرزهای بالا و پایین سرعت عمودی برابر صفر در نظر گرفته می‌شود. برای مرز ورودی نیز سرعت ثابت و یکنواخت و برای مرز خروجی گرادیان سرعت برابر صفر منظور می‌گردد. در این مدل، از نرم‌افزار Flow3D برای شبیه‌سازی شرایط مرزی و تعیین رفتار جریان استفاده می‌شود.

۳- اعتبارسنجی مدل‌های عددی

برای اعتبارسنجی نتایج مدل‌های عددی، مقایسه با داده‌های آزمایشگاهی یا میدانی ضروری است. در این تحقیق، برای ارزیابی صحت نتایج مدل‌های عددی حجم محدود و SPH، نتایج حاصل از شبیه‌سازی‌ها با داده‌های تجربی موجود در منابع معتبر مقایسه شده‌اند. به‌ویژه، ضرایب درگ به دست آمده از شبیه‌سازی‌ها با داده‌های آزمایشگاهی موجود در مقالات و گزارشات مشابه مقایسه و تحلیل شده‌اند. این مقایسه‌ها شامل ارزیابی دقیق‌تر الگوی جریان ایجاد شده در اطراف پایه پل نیز می‌شود.

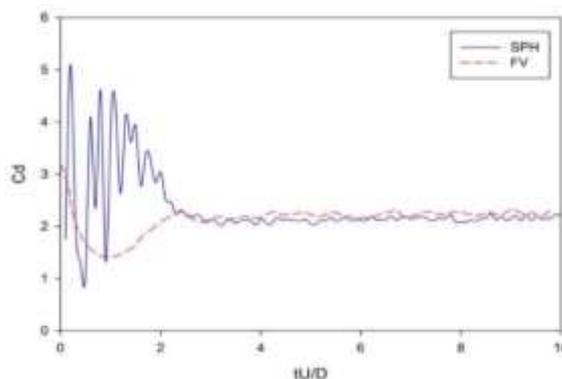
۳-۱ انتخاب پارامترهای شبکه‌بندی

در هر دو مدل SPH و حجم محدود، انتخاب پارامترهای شبکه‌بندی از جمله اندازه ذرات (در SPH) یا تعداد سلول‌ها (در حجم محدود) باید با دقت انجام شود. برای این منظور، تحلیل همگرایی شبکه انجام شده است. این تحلیل به منظور اطمینان از اینکه تغییرات اندازه ذرات یا تعداد سلول‌ها تأثیر معناداری بر نتایج شبیه‌سازی ندارد، انجام می‌گیرد. معیارهای استاندارد تحلیل همگرایی برای هر یک از روش‌ها اعمال شده و اطمینان حاصل شده که نتایج به دست آمده از دقت کافی برخوردار است.

۴- ضریب درگ در اعداد رینولدز مختلف

انتخاب بازه عدد رینولدز از ۲۰ تا ۲۰۰ بر اساس اهداف مشخصی صورت گرفته است. این بازه، محدوده‌ای از جریان‌های لامینار تا آستانه انتقالی را شامل می‌شود که در آن، روند شکل‌گیری گردابه‌ها، پایداری جریان، و رفتار ضریب درگ به صورت بنیادین تغییر می‌کند. عدد رینولدز ۲۰ بیانگر شرایطی است که در آن هنوز گردابه‌ای تشکیل نمی‌شود و جریان کاملاً پایدار است. با افزایش عدد رینولدز به حدود ۴۰ تا ۸۰، گردابه‌های پایدار متقارن شکل می‌گیرند و از رینولدز حدود ۱۰۰ به بالا، پدیده رهاشدگی گردابه آغاز می‌شود. این مرحله از نظر دینامیک سیالات، بسیار حائز اهمیت بوده و پایه‌ی تحلیل‌های مرتبط با شروع آشفتگی و رفتار دینامیکی در ناحیه پشت مانع می‌باشد. از سوی دیگر، در عدد رینولدز ۲۰۰، جریان در مرز بین لایه‌ای و انتقالی قرار دارد. بررسی دقیق رفتار جریان در این بازه امکان مقایسه‌ی مدل‌های عددی مختلف (مانند SPH و FV) را در حساس‌ترین نقاط تغییر رژیم جریان فراهم می‌سازد، که برای ارزیابی دقت و پایداری این روش‌ها بسیار کلیدی است.

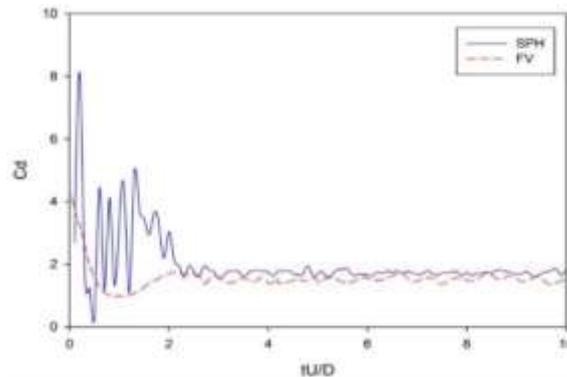
در این مطالعه، مدل‌های عددی برای رینولدزهای ۲۰، ۵۰، ۸۰، ۱۰۰ و ۲۰۰ اجرا شده و نتایج حاصل به صورت کیفی و کمی مورد بررسی قرار گرفته است. از آنجا که در رینولدزهای بالاتر از ۲۰۰ تغییرات الگوی جریان و ضریب درگ در مقایسه با محدوده‌های مشخص‌شده کمتر بوده است، این محدوده‌ها مورد بررسی قرار نگرفته‌اند. در نمودارهای (۷) تا (۱۱)، روند تغییرات ضریب درگ در طول زمان نمایش داده شده است. برای هر مقدار رینولدز، نتایج به دست آمده از دو مدل موردنظر در یک نمودار نشان داده شده تا امکان مقایسه‌ی دقیق‌تری فراهم شود. در بیشتر مقادیر رینولدز، روش حجم محدود عملکرد دقیق‌تری نسبت به روش SPH داشته که این موضوع در نمودارها نیز مشاهده می‌شود. برای تحلیل دقیق‌تر، مقادیر ضریب درگ آزمایشگاهی و ضرایب محاسبه‌شده توسط دو مدل در قالب یک جدول با یکدیگر مقایسه شده‌اند. یکی از نکات قابل توجه، نوسانات شدید ضریب درگ در روش SPH است که در مراحل اولیه بسیار زیاد بوده اما با گذشت زمان به تعادل و پایداری می‌رسد. این رفتار ناشی از آن است که ذرات در ابتدا بدون سرعت بوده و باید در بازه‌ی زمانی کوتاهی به سرعت مطلوب برسند که این فرآیند باعث افزایش برخورد و اندرکنش بین ذرات شده و نوسانات فشار را تشدید می‌کند. این نوسانات فشار در نمودارهای ضریب درگ نیز منعکس شده‌اند. شایان ذکر است که حتی پس از رسیدن به تعادل و تشکیل گردابه‌های پشت سیلندر، نوسانات فشار همچنان مانع از ایجاد یک روند کاملاً خطی در ضریب درگ می‌شود. در روش SPH، به دلیل طبیعت لاگرانژی این روش و برجسته‌تر بودن اثر اندرکنش بین ذرات، میزان نوسانات بیشتر است. در رینولدزهای بالاتر از ۲۰۰، با افزایش رینولدز و تشکیل گردابه‌های بیشتر، انتظار می‌رود این نوسانات به مراتب چشمگیرتر باشد. ضریب درگ پس از رسیدن نمودار به تعادل، با محاسبه‌ی میانگین مقادیر آن در زمان‌های مختلف تعیین شده و به عنوان مقدار ضریب درگ برای هر عدد رینولدز معرفی گردیده است.



شکل ۷- نمودار ضریب درگ برای رینولدز ۲۰

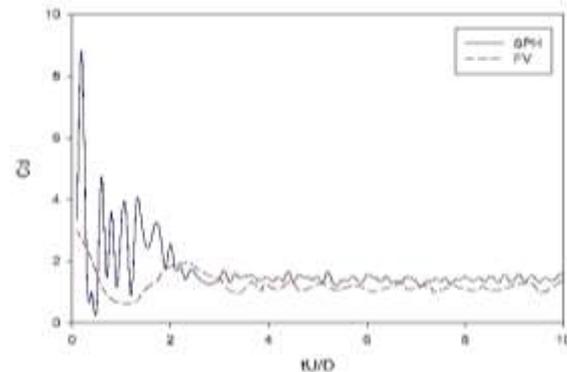
در نمودار ۷، ضریب درگ در جریان با رینولدز پایین نمایش داده شده که نشان‌دهنده جریان آرام و فاقد پدیده رهاشدگی گردابه است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، مقدار ضریب درگ در روش SPH نسبت به FV نوسانات بیشتری دارد که ناشی از طبیعت ذره‌ای این روش و

حساسیت آن به تنظیمات مرزی و چگالی اولیه است. روش FV مقدار پایدارتری ارائه می‌دهد که با داده‌های تجربی تطابق بهتری دارد. در این عدد رینولدز، به دلیل نبود آشفتگی، دقت مدل‌سازی وابستگی زیادی به شرایط اولیه دارد.



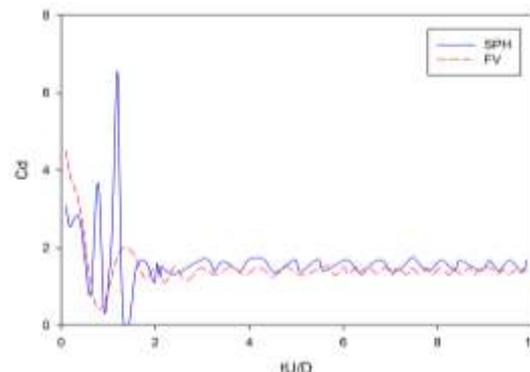
شکل ۸- نمودار ضریب درگ برای رینولدز ۵۰

با افزایش رینولدز به ۵۰، الگوی جریان وارد ناحیه‌ای می‌شود که در آن یک جفت گردابه پایدار در پشت پایه شکل می‌گیرد. در این شرایط، هر دو مدل شروع به نمایش نوسانات ضریب درگ می‌کنند. در مدل SPH نوسانات گسترده‌تری دیده می‌شود، که نشان از چالش این روش در رسیدن سریع به حالت پایدار دارد. با این حال، مقدار میانگین ضریب درگ به دست آمده، هنوز در محدوده نتایج تجربی قابل قبول قرار می‌گیرد. روش حجم محدود هم در این شرایط عملکرد بهتری دارد و به مقدار تثبیت‌شده‌تری دست پیدا می‌کند.



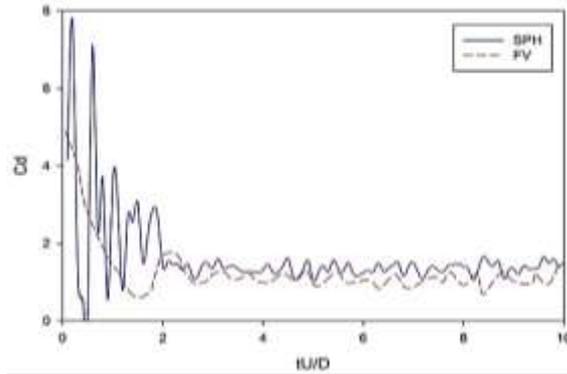
شکل ۹- نمودار ضریب درگ برای رینولدز ۸۰

در عدد رینولدز ۸۰، فرآیند رهاسازی گردابه‌ها آغاز شده و جریان وارد ناحیه ناپایدار می‌شود. نمودار روش SPH نشان‌دهنده نوسانات منظم‌تر ولی با دامنه نسبتاً بالا است. این رفتار مطابق با ویژگی‌های عددی این روش در جریان‌های دارای ناپایداری است. روش FV مقدار ضریب درگ یکنواخت‌تری را نشان می‌دهد، اما همچنان افت‌وخیزهایی مرتبط با فرکانس تشکیل گردابه‌ها دیده می‌شود. تحلیل عدد استروهمال در این مرحله می‌تواند به توجیه رفتار نوسانی کمک کند.



شکل ۱۰- نمودار ضریب درگ برای رینولدز ۱۰۰

در رینولدز ۱۰۰، جریان کاملاً وارد فاز ناپایدار شده و گردابه‌ها با فرکانس مشخصی از پشت پایه جدا می‌شوند. این موضوع در هر دو مدل قابل مشاهده است. نمودار SPH همچنان نوسان دارد، ولی پس از مدتی به تعادل نسبی می‌رسد. در مقابل، مدل FV با دامنه نوسان کمتر و رفتار نزدیک‌تر به نتایج آزمایشگاهی عملکرد بهتری از خود نشان می‌دهد. این مسئله، دقت بالاتر روش اویلری در مدلسازی آشفتگی‌های متوسط را تأیید می‌کند.



شکل ۱۱- نمودار ضریب درگ برای رینولدز ۲۰۰

در عدد رینولدز ۲۰۰، فرایند رهاشدگی گردابه‌ها شتاب بیشتری می‌گیرد و جریان کاملاً آشفته و غیرپایدار می‌شود. تفاوت عملکرد دو مدل در این وضعیت آشکارتر است؛ روش SPH دچار نوسانات پر دامنه‌تری می‌شود که نشان‌دهنده چالش در شبیه‌سازی دقیق دینامیک ذرات در جریان‌های آشفته است. در حالی که مدل FV همچنان مقدار میانگین ضریب درگ قابل اتکایی ارائه می‌دهد. در این حالت، تحلیل آماری داده‌ها (مثل انحراف معیار نوسانات) می‌تواند دید عمیق‌تری نسبت به پایداری نتایج فراهم کند.

جدول ۴- مقادیر ضریب درگ برای رینولدزهای مختلف و مقایسه با نتایج سایر محققان

نتایج محققان گذشته	FV		SPH		عدد رینولدز
	درصد خطا	ضریب درگ	درصد خطا	ضریب درگ	
۲/۱۱	۴/۷۴	۲/۲۱	۱/۹	۲/۱۵	۲۰
۱/۶	۸/۱	۱/۷۳	۱۰/۶	۱/۷۷	۵۰
۱/۳۳	۴/۵	۱/۳۹	۱۰/۵	۱/۴۷	۸۰
۱/۲۷	۶/۳	۱/۳۵	۱۱	۱/۴۱	۱۰۰
۱/۱۶	۱/۱۸	۸/۶	۶/۸	۱/۲۶	۲۰۰
			۱۳/۸	۱۱/۹	

در جدول (۴) ارائه‌شده، مقادیر ضریب درگ محاسبه‌شده برای روش‌های SPH و FV با داده‌های محققان پیشین مقایسه شده است. درصد خطای هر روش نیز نشان می‌دهد که روش حجم محدود (FV) در تمامی اعداد رینولدز خطای کمتری نسبت به SPH داشته و به نتایج مرجع نزدیک‌تر است. در عدد رینولدز ۲۰۰، SPH با خطای ۹٫۱٪ عملکرد نسبتاً قابل‌قبولی دارد، اما FV با خطای تنها ۴٫۷۴٪ دقیق‌تر است. در رینولدزهای بالاتر (۸۰ و ۱۰۰) فاصله روش SPH از مقدار مرجع بیشتر می‌شود و نوسانات شدیدی در ضریب درگ مشاهده می‌شود که نشان‌دهنده تأثیر رفتار ناپایدار جریان و حساسیت SPH به شرایط اولیه است. نوسانات بالا در SPH، بخصوص در رینولدزهای بالاتر، به دلیل

ویژگی لاگرانژی آن است که اندرکنش ذرات را تقویت می‌کند. این ویژگی باعث افزایش فشارهای موضعی در گام‌های اولیه شبیه‌سازی شده در نهایت به تغییرپذیری بیشتر ضریب درگ منجر می‌گردد. با افزایش عدد رینولدز، الگوی جریان دستخوش تغییرات چشمگیری می‌شود. به طوری که برای مقادیر رینولدز تا ۵، هیچ‌گونه جداسدگی جریان رخ نمی‌دهد. اما در بازه‌ی رینولدز ۵ تا ۴۰، یک جفت گردابه‌ی پایدار در پشت پایه تشکیل می‌شود که با افزایش عدد رینولدز، طول این گردابه‌ها نیز افزایش می‌یابد. با ادامه‌ی روند افزایش رینولدز، ناحیه‌ی پشت پایه ناپایدار شده و پدیده‌ای به وقوع می‌پیوندد که به آن **رها شدن گردابه‌ای** گفته می‌شود. بدین ترتیب که گردابه‌های تشکیل شده به ترتیب با یک فرکانس خاص از پشت پایه خارج می‌شوند. این حالت تا رینولدز برابر با ۲۰۰ لایه‌ای و از ۲۰۰ تا ۳۰۰ حالت انتقالی پیدا می‌کند. در این وضعیت فرکانس تشکیل گردابه‌ها توسط عدد استروهل^۱ بیان می‌شود که با سرعت و قطر پایه‌ی پل نرمال شده است.

$$St = \frac{fD}{U} \quad (3)$$

که در آن St عدد استروهل، f فرکانس تشکیل گردابه و D معیار قطر (بر حسب متر)، و همچنین U سرعت جریان (بر حسب متر بر ثانیه) می‌باشد. نتایج حاصل از تحلیل عددی ضریب درگ، تطابق نسبتاً خوبی با داده‌های تجربی دارد؛ به‌ویژه روش حجم محدود (FV) با خطای متوسط کمتر از ۶٪ عملکرد دقیق‌تری نسبت به روش SPH نشان داده است. در بررسی الگوهای جریان، هر دو روش قادر به شبیه‌سازی گردابه‌های پشت پایه بوده‌اند، اما در روش SPH نوسانات بیشتری مشاهده شد. همچنین، ارتباط بین عدد رینولدز و ضریب درگ از طریق تحلیل رگرسیون نمایی و محاسبه عدد استروهل بررسی گردیده که نتایج آن تأییدکننده اعتبار مدل عددی هستند.

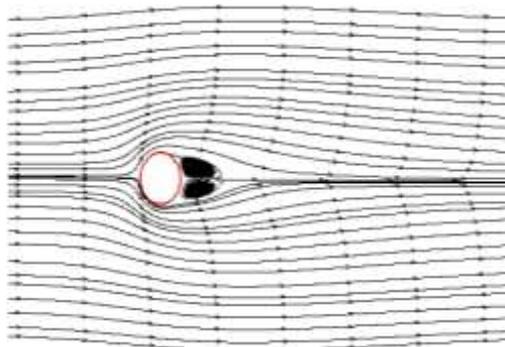
جدول ۵- مقایسه نتایج آماری بین دو روش SPH و FV

شاخص آماری	SPH	FV
MAE	۰/۱۱۸	۰/۰۶۸
RMSE	۰/۱۳۲	۰/۰۸۰
R ²	۰/۹۱۸	۰/۹۷۵

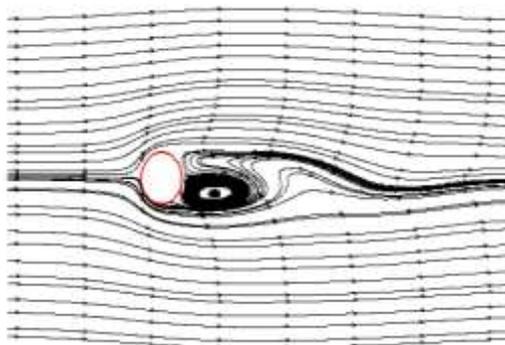
مقدار **MAE** و **RMSE** برای روش FV نسبت به SPH پایین‌تر است، که نشان‌دهنده دقت عددی بالاتر این روش است. مقدار **R²** بالا برای هر دو روش بیانگر همبستگی قوی با داده‌های مرجع است، اما FV تطابق بهتری با روند تجربی دارد. در رینولدزهای بالاتر، خطای نسبی SPH بیشتر می‌شود که با تفسیر فیزیکی ناپایداری جریان سازگار است.

۳-۱- روند الگوی جریان اطراف پایه‌ی پل

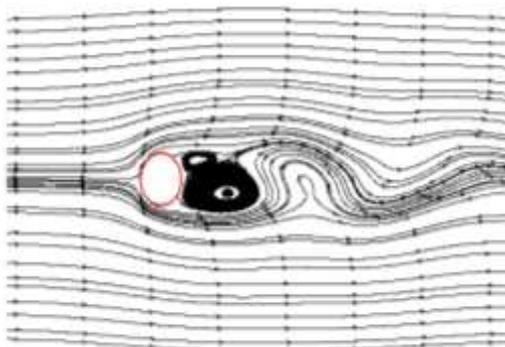
هدف از این بخش، نمایش این پدیده از طریق گردابه‌های تشکیل‌شده و خطوط جریان اطراف پایه‌ی پل است. نتایج حاصل از مدل SPH و روش حجم محدود برای رینولدزهای مشخص‌شده، به‌صورت نمونه در اشکال (۱۲) تا (۱۶) ارائه شده است. همان‌طور که در تصاویر مشاهده می‌شود، خطوط جریان پیرامون پایه‌ی پل در مقادیر مختلف عدد رینولدز مورد بررسی قرار گرفته‌اند. در عدد رینولدز ۲۰، یک جفت گردابه‌ی پایدار و متقارن در پشت پایه تشکیل شده که به‌خوبی قابل مشاهده است. با افزایش عدد رینولدز، این تقارن از بین می‌رود و گردابه‌ها به تدریج از پایه فاصله می‌گیرند. این تغییرات در اشکال مربوط به رینولدزهای ۸۰ تا ۲۰۰ به‌خوبی نشان داده شده است. گردابه‌ها در بالای خط تقارن به‌صورت ساعتگرد و در پایین خط تقارن به‌صورت پادساعتگرد چرخیده و به سمت پایین‌دست حرکت می‌کنند، و مراحل شکل‌گیری آن‌ها نیز نمایش داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، پس از رسیدن جریان به حالت تعادل، گردابه‌ها با فرکانسی ثابت در پشت پایه‌ی پل تشکیل شده و به‌طور نامتقارن به سمت پایین‌دست جابه‌جا می‌شوند. در رابطه با روند مدل‌سازی عددی، می‌توان بیان کرد که هر دو روش به‌خوبی توانسته‌اند گردابه‌های اطراف سیلندر (پایه‌ی پل) و حرکت آن‌ها به سمت پایین‌دست را شبیه‌سازی کنند و تفاوت قابل‌توجهی از نظر ساختار کلی مدل‌سازی میان این دو روش مشاهده نمی‌شود.



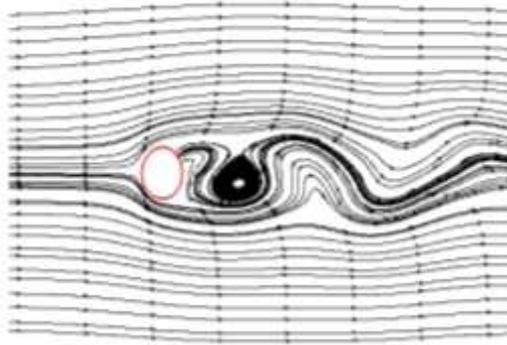
شکل ۱۲- خطوط جریان اطراف پایه ی پل برای رینولدز ۲۰



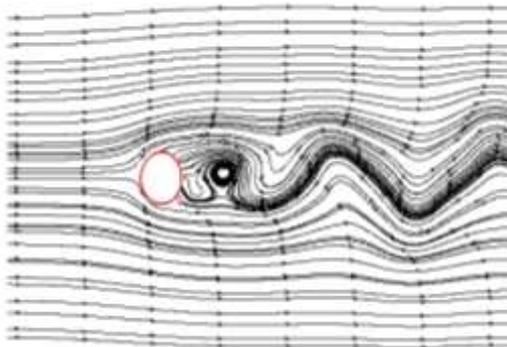
شکل ۱۳- خطوط جریان اطراف پایه ی پل برای رینولدز ۵۰



شکل ۱۴- خطوط جریان اطراف پایه ی پل برای رینولدز ۸۰



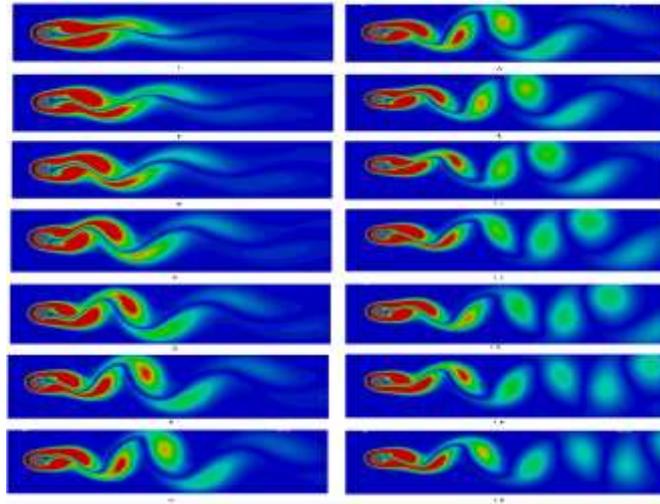
شکل ۱۵- خطوط جریان اطراف پایه پل برای رینولدز ۱۰۰



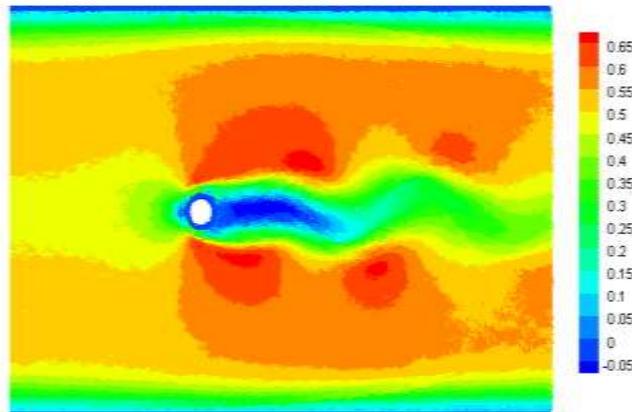
شکل ۱۶- خطوط جریان اطراف پایه پل برای رینولدز ۲۰۰

۴- میدان سرعت اطراف پایه های پل

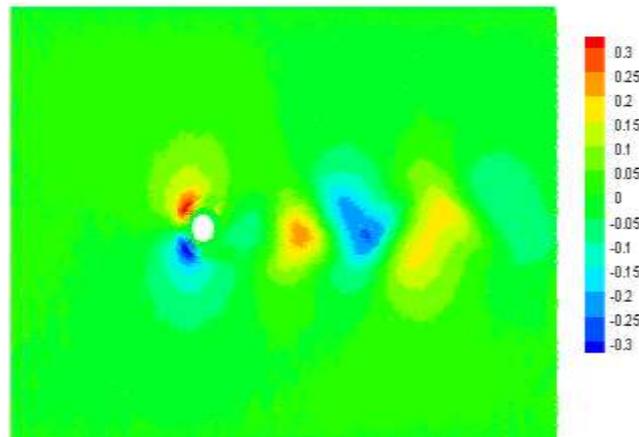
در کنتور نمایش داده شده در شکل (۱۷)، میدان سرعت افقی و قائم اطراف پایه‌ی پل برای عدد رینولدز ۱۰۰ نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، سرعت جریان افقی در ناحیه‌ی پشت پایه تقریباً یکنواخت است، اما با برخورد جریان به مانع و کاهش عرض جریان آزاد، مطابق با قانون پیوستگی، سرعت افزایش می‌یابد. در پشت پایه‌ی پل، به دلیل تشکیل جریان ساکن و وجود گردابه‌هایی که پیش‌تر در بخش معادلات پایه و مقدمه به آن‌ها اشاره شد، سرعت جریان صفر یا حتی منفی است. در مورد سرعت قائم، پس از برخورد جریان به مانع، این سرعت به صورت متقارن از بالا و پایین آن عبور کرده و در ادامه، میزان تغییرات آن کاهش می‌یابد، به طوری که تنها در نواحی تشکیل گردابه‌ها، تغییرات جزئی مشاهده می‌شود. همچنین، سرعت افقی و قائم برای عدد رینولدز ۲۰ نیز مورد بررسی قرار گرفته است. در این حالت، به دلیل عدم تشکیل گردابه‌ها، افزایش سرعت افقی تنها در دو سمت مانع (بالا و پایین) دیده می‌شود و تغییرات سرعت قائم نیز فقط در محل برخورد جریان با مانع اتفاق می‌افتد. نتایج مربوط به رینولدز ۱۰۰ از روش SPH و برای رینولدز ۲۰ از روش حجم محدود به دست آمده‌اند که در مدل عددی Tecplot ترسیم شده است.



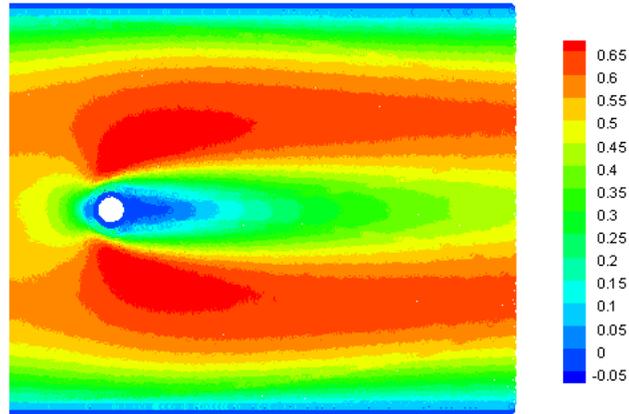
شکل ۱۷- نحوه تشکیل گردابه‌ها از شروع تا رسیدن به حالت تعادل در محیط Flow3D



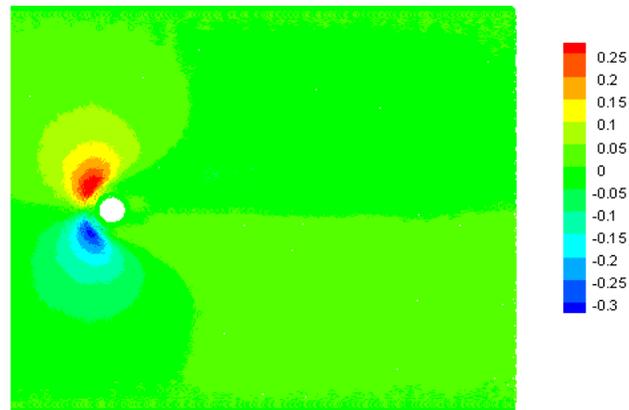
شکل ۱۸- طیف سرعت افقی جریان برای رینولدز ۱۰۰



شکل ۱۹- طیف سرعت قائم جریان برای رینولدز ۱۰۰



شکل ۲۰- طیف سرعت افقی جریان برای رینولدز ۲۰



شکل ۲۱- طیف سرعت قائم جریان برای رینولدز ۲۰

۵- نتیجه گیری

پدیده‌ی آب‌شستگی در اطراف پایه‌ی پل‌ها از جمله مسائل چالش‌برانگیز در مهندسی رودخانه و هیدرولیک است که همواره نیازمند تحلیل دقیق‌تری از رفتار جریان و نیروهای وارد بر سازه می‌باشد. در این تحقیق، با بهره‌گیری از دو روش عددی متفاوت روش لاگرانژی SPH و روش اویلری حجم محدود (FV) مدل‌سازی جریان عبوری از پایه‌ی پل زنجان رود انجام شده و عملکرد هر دو روش در بازه‌ای از اعداد رینولدز (۲۰ تا ۲۰۰) بررسی گردید. از نوآوری‌های اصلی پژوهش، می‌توان به استفاده همزمان از دو رویکرد عددی با ماهیت‌های مختلف و بررسی تطبیقی آن‌ها در شرایطی نزدیک به واقعیت اشاره کرد. همچنین، بررسی دقیق رفتار گردابه‌ها، میدان سرعت و ضریب درگ در شرایط مختلف، به‌ویژه در روش SPH که کمتر در این زمینه به کار رفته، از دیگر وجوه نوآورانه‌ی این پژوهش است. نتایج نشان دادند که هر دو مدل توانایی مناسبی در شبیه‌سازی گردابه‌ها و تحلیل میدان جریان دارند، اما دقت و پایداری مدل FV در محاسبه‌ی ضریب درگ، خصوصاً در رینولدزهای بالا، بالاتر بوده است. این تفاوت به ویژگی‌های ذاتی روش حجم محدود و شبکه‌بندی منظم آن بازمی‌گردد که کنترل بهتری بر ناپایداری‌های عددی فراهم می‌کند. در مقابل، روش SPH به دلیل لاگرانژی بودن و محاسبات مبتنی بر ذره، نوسانات اولیه‌ی بیشتری را در نتایج نشان می‌دهد اما در شرایط جریان‌های پیچیده و تغییرات تراز سطح آزاد، انعطاف‌پذیری قابل توجهی دارد. محدودیت‌های پژوهش شامل عدم استفاده از داده‌های آزمایشگاهی جهت صحت‌سنجی مدل‌ها، فرض ساده‌شده‌ی جریان دوبعدی، و صرف‌نظر از اثرات رسوب و بستر متحرک بوده‌اند. همچنین، تنظیم پارامترهای مدل SPH تا حدی مبتنی بر آزمون و خطا انجام شده که ممکن است باعث کاهش دقت نتایج در برخی رینولدزها شده باشد. مدل اول به نام SPHysics بوده است. این مدل عددی در واقع حل‌کننده معادلات جریان با استفاده از روش SPH می‌باشد. SPHysics دارای قابلیت‌های بسیاری بوده و معادلات جسم شناور را نیز دارا می‌باشد که برای استفاده از آن ابتدا هندسه و شکل

موردنظر در مدل عددی و سپس مدل اجرا گردید. مدل دوم که بر مبنای معادلات روش حجم محدود نوشته شده است، و امکانات بیشتری را نسبت به SPHysics دارا بوده، به دلیل وجود مطالعات آزمایشگاهی و عددی انجام شده در گذشته برای مسئله جریان عبوری از سیلندر (پایه پل)، از صحت سنجی مدل های عددی مذکور صرف نظر گردید و مستقیماً به مدل سازی پدیدهی موردنظر پرداخته شد. بعد از ساخت مدل بررسی عدم وابستگی حل به شبکه مورد بررسی قرار گرفت و با انتخاب ۴ نوع شبکهی حل با استفاده از هر دو روش به انتخاب بهترین شبکه که هم از دقت مطلوبی برخوردار بوده و همچنین هزینه محاسباتی کمتری را به همراه داشته باشد، پرداخته شد. بعد از انتخاب شبکه حل مناسب مدل عددی در محدوده اعداد رینولدز مختلف اجرا گردید، و نتایج با پژوهش های گذشته مورد مقایسه قرار گرفت. ضریب درگ بدست آمده از هر دو مدل تطابق نسبتاً خوبی با نتایج آزمایشگاهی و عددی داشته و روش حجم محدود در برآورد ضریب درگ بهتر عمل کرده است. کاهش درصد خطا در مدل عددی FV نسبت به SPH برای اعداد رینولدز ۱۰۰ در حدود ۴۳٪ بوده که عمده دلیل آن وجود سرعت افقی زیاد در رینولدز های بالا و به دلیل ماهیت روش عددی حجم محدود در میدان سرعت، توان کاهش در صد خطا افزایش پیدا میکند، و میتوان بیان کرد که روش FV به دلیل استفاده از حجم های کنترلی، انعطاف پذیری بیشتری برای برخورد با مرزهای پیچیده هندسی دارد. این ویژگی در مدل سازی آب شستگی پایه های پل که شامل هندسه های نامنظم است، بسیار مفید خواهد بود. همچنین در اعداد رینولدز پایین تر مانند ۲۰، درصد خطا در مدل عددی SPH نسبت به روش FV به دلیل پایین بودن سرعت قائم، در ۶۰٪ کاهش را نشان می دهد. میدان سرعت، خطوط جریان و نحوه تشکیل گردابه ها و حرکت آنها به سمت پایین دست نیز توسط هر دو مدل به خوبی انجام پذیرفت و تفاوت چندانی بین دو روش از این حیث، مشاهده نگردید. با این حال، روش FV نسبت به روش های لاگرانژی مانند SPH در برخی موارد، مانند تعامل بین ذرات رسوبی و سیال، ممکن است نیاز به تنظیمات بیشتری داشته باشد، در نهایت روش حجم محدود در مدل سازی جریان های سطح آزاد (مثل جریان های رودخانه ای و سیلاب ها) عملکرد مناسبی داشته و در ترکیب با مدل های عددی آب شستگی قابل اتکا می باشد. از لحاظ سرعت محاسباتی نیز می توان گفت مدل Flow3D به دلیل اجرای تحت لینوکس دارای سرعت بیشتری نسبت به کد SPHysics برخوردار است و به طور کلی نیز روش SPH به دلیل طبیعت لاگرانژی و حل معادلات برای همه ی ذرات میدان حل از هزینه ی محاسباتی بیشتری برخوردار است.

برای تحقیقات آینده، پیشنهاد می شود:

مدلسازی سه بعدی با حضور بستر رسوب پذیر و متحرک بررسی گردد تا امکان پیش بینی عمق واقعی آب شستگی فراهم شود؛ صحت سنجی عددی با داده های میدانی یا آزمایشگاهی به عنوان بخش جدانشدنی از تحلیل لحاظ گردد، اثرات نوسانات سطح آزاد، موج، و بارگذاری دوره ای نیز در چارچوب مدل سازی های پیشرفته تر گنجانده شود، و نهایتاً استفاده از مدل های ترکیبی که مزایای روش های SPH و FV را در قالب یک چارچوب تلفیق می کنند، می تواند مسیر مناسبی برای توسعه های بعدی باشد.

۶- مراجع

- Bento, A. M., Pêgo, J. P., Viseu, T., & Couto, L. (2023). *Scour Development Around an Oblong Bridge Pier: A Numerical and Experimental Study*. Water, 15(16), 2867. <https://doi.org/10.3390/w15162867>
- Bordbar, A., Sharifi, S., & Hemida, H. (2021). *Investigation of the flow behaviour and local scour around single square-shaped cylinders at different positions in live-bed*. Ocean Engineering, 238, 109772. DOI:10.1016/j.oceaneng.2021.109772
- Bordbar, A., Sharifi, S., & Hemida, H. (2021). *Prediction of scour around single vertical piers with different cross-section shapes*. Ocean Systems Engineering, 11(1), 43-58. <https://doi.org/10.12989/ose.2021.11.1.043>
- Cui, W. Z., Zhang, X. T., Li, Z. X., Li, H., & Liu, Y. (2017). *Three-dimensional numerical simulation of flow around combined pier based on detached eddy simulation at high Reynolds numbers*. International journal of heat and technology, 35(1), 91-96. DOI:10.18280/ijht.350112.

- Dutta, D., Bihs, H., & Afzal, M. S. (2022). *Computational Fluid Dynamics modelling of hydrodynamic characteristics of oscillatory flow past a square cylinder using the level set method*. Ocean Engineering, 253, 111211. <http://dx.doi.org/10.1016/j.oceaneng.2022.111211>
- Fernández, M. C., & Skurtys, O. (2020). *Three-dimensional numerical modelling of the flow around a circular bridge pier: a scaling analysis*. Progress in Computational Fluid Dynamics, an International Journal, 20(5), 273-283. DOI : [10.1504/PCFD.2020.109904](https://doi.org/10.1504/PCFD.2020.109904).
- Gautam, S., Dutta, D., Bihs, H., & Afzal, M. S. (2021). *Three-dimensional Computational Fluid Dynamics modelling of scour around a single pile due to combined action of the waves and current using Level-Set method*. Coastal Engineering, 170, 104002. <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2021.104002>
- Gupta, L. K., Pandey, M., & Anand Raj, P. (2023). *Numerical simulation of local scour around the pier with and without airfoil collar (AFC) using FLOW-3D*. Environmental Fluid Mechanics, 1-19 <http://dx.doi.org/10.1007/s10652-023-09932-2>.
- Helmi, A. M., & Shehata, A. H. (2021). *Three-dimensional numerical investigations of the flow pattern and evolution of the horseshoe vortex at a circular pier during the development of a scour hole*. Applied Sciences, 11(15), 6898. <https://doi.org/10.3390/app11156898>.
- Helmi, A. M., Shehata, A. H., Abbas, M. M., & El-manadely, M. S. (2019). *Experimental assessment of circular collar effect on local scour around single cylindrical pier and numerical investigation of flow structure*. Al-Azhar University Civil Engineering Research Magazine, 41(3).
- Ismael, A., Hussein, H., Tareq, M., & Gunal, M. (2017). *Simulation of Three-Dimensional Flow Field around Unconventional Bridge Piers*. Eurasian Journal of Science and Engineering, 3(2), 90-99. <https://doi.org/10.23918/eajse.v3i2p90>.
- Jbara, L., Ghigo, A., & Wachs, A. (2023). *Steady three-dimensional unbounded flow past an obstacle continuously deviating from a sphere to a cube*. Physics of Fluids, 35(1). <https://doi.org/10.1063/5.0133499>
- Jia, Y., Altinakar, M., & Guney, M. S. (2018). *Three-dimensional numerical simulations of local scouring around bridge piers*. Journal of Hydraulic Research, 56(3), 351-366. <https://doi.org/10.1080/00221686.2017.1356389>
- Kumar, P., P Manelil, N., & Tiwari, S. (2019). *Effects of shear intensity and aspect ratio on three-dimensional wake characteristics of flow past surface mounted circular cylinder*. Physics of Fluids, 31(4). <https://doi.org/10.1063/1.5081795>
- Man, C., Zhang, G., Hong, V., Zhou, S., & Feng, Y. (2019). *Assessment of turbulence models on bridge-pier scour using Flow-3D*. World Journal of Engineering and Technology, 7(2), 241-255. DOI: [10.4236/wjet.2019.72016](https://doi.org/10.4236/wjet.2019.72016)
- Namaee, M. R., Sui, J., Wu, Y., & Linklater, N. (2021). *Three-dimensional numerical simulation of local scour around circular side-by-side bridge piers with ice cover*. Canadian Journal of Civil Engineering, 48(10), 1335-1353. <https://doi.org/10.1139/cjce-2019-0360>
- Qi, H., Zheng, J., & Zhang, C. (2020). *Numerical simulation of velocity field around two columns of tandem piers of the longitudinal bridge*. Fluids, 5(1), 32. <https://doi.org/10.3390/fluids5010032>
- Rasaei, M., & Nazari, S. (2020). *Experimental and Numerical Investigation of Local Scouring around Bridge Piers in Different Geometric Shapes at a 90 Convergent meander*. Journal of Hydraulic Structures, 6(2), 34-55. <https://doi.org/10.22055/jhs.2020.34428.1144>
- Tian, Z., & Liao, Z. (2023). *Three-Dimensional Numerical Simulation of the Water Flow Effect on a Temporary Pier with Three Columns in Series*. Applied Sciences, 13(21), 11683. <https://doi.org/10.3390/app132111683>
- Yang, H., Yang, W., Yang, T., & Li, Q. (2020). *Experimental investigation of flow around a square cylinder with very small aspect ratios*. Ocean Engineering, 214, 107732. DOI: [10.1016/j.oceaneng.2020.107732](https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2020.107732).

Zaid, M., Yazdanfar, Z., Chowdhury, H., & Alam, F. (2019). *Numerical modeling of flow around a pier mounted in a flat and fixed bed*. Energy Procedia, 160,51-59. DOI:[10.1016/j.egypro.2019.02.118](https://doi.org/10.1016/j.egypro.2019.02.118).