

Website : https://amcen.razi.ac.ir

Online ISSN : 3060-7620



Assessment of Local Scour Patterns Around Bridge Piers and Optimal Placement in a 180-Degree Bend Using Experimental and Finite Volume Methods

Pooya Beyranvand¹^(D), Hamidreza Vosoughifar^{2⊠}^(D), Milad Khorani³^(D), Hamzeh Heidari Soureshjani⁴^(D)

- 1. Department of Civil Engineering, Islamic Azad University South Tehran Branch, Tehran, Iran. E-mail: Pooya_beyranvand@yahoo.com
- Corresponding author, Department of Civil and Environment, UH Manoa University of Hawai'i at Manoa, USA. E-mail: Vosoughi@hawaii.edu
- 3. Department of Civil Engineering, Islamic Azad University South Tehran Branch, Tehran, Iran. E-mail: Miladkhorani@gmail.com
- 4. Department of Civil Engineering, Islamic Azad University South Tehran Branch, Tehran, Iran. E-mail: Hamzehheidari2015@gmail.com

Article Info

Article type: Research Article

Article history: Received 2025-02-11 Received in revised form 2025-05-11 Accepted 2025-06-17 Available online 2025-06-28

Keywords: Channel bend, Bridge pier, Local scour, Sediment, Finite volume method In curved channels, secondary flows arise due to the balance between centrifugal and gravitational forces, causing a vertical redistribution of flow that significantly alters bed shear stress and sediment transport. The introduction of hydraulic structures such as bridge piers further intensifies the complexity of flow patterns and local scour processes. This study investigates the effects of pier placement in a 180-degree bend of a U-shaped channel using both experimental and numerical approaches. Six angular pier positions (0°, 30°, 60°, 90°, 120°, and 150°) were analyzed, with positions at 60° and 150° used for model validation. The study employed the finite volume method (FVM) via Fluent software and validated the results against physical experiments using ADV-based velocity profiling and bed morphology measurements. Results show that the magnitude of bed material removal is greater within the bend compared to straight reaches due to intensified helical flows. Notably, the most severe sediment deposition occurred at 30° and 60°, while reduced scour was observed at 150°. Based on flow behavior and scour depth analysis, optimal pier locations were identified to be within 0°–30° and 90°–180°, balancing flow stability and minimizing bed degradation.

ABSTRACT

Cite this article: Beyranvand, Pooya., Vosoughifar, Hamidreza., Khorani, Milad., & Heidari Soureshjani, Hamzeh. (2025). Assessment of Local Scour Patterns Around Bridge Piers and Optimal Placement in a 180-Degree Bend Using Experimental and Finite Volume Methods. *Advanced Modeling in Civil Engineering*, 2(1), 95-111.

DOI: 10.22126/amcen.2025.11383.1031



© The Author(s). DOI: 10.22126/amcen.2025.11383.1031 Publisher: Razi University

Advanced Modeling in Civil Engineering, Volume 2, Issue 1, 2025

Introduction

Local scour is a significant and persistent challenge in hydraulic engineering, particularly when it occurs around bridge piers. It is responsible for a substantial portion of structural failures in bridges worldwide, especially in fluvial environments where dynamic flow conditions interact with structural elements and sediment transport processes. Studies have estimated that over 60% of major bridge failures in the United States are related to hydraulic issues, including general and local scour, long-term bed degradation, and lateral migration. The presence of a bridge pier in a river alters the flow field by generating complex vortices such as horseshoe vortices (HSV) and wake vortices that can significantly accelerate sediment removal near the pier base. Most earlier investigations have focused on pier-induced scour in straight channels, where flow behavior is relatively simpler to model and predict. However, in natural rivers and curved artificial channels, the interaction of centrifugal and gravitational forces gives rise to secondary helical currents, redistributing shear stress across the bed and increasing the complexity of sediment transport. These secondary flows intensify in sharply curved bends, such as 180-degree meander loops, where they interact with pier-generated turbulence to amplify local scour depths. Moreover, the geometry of the pier, its alignment, and its location along the channel bend play critical roles in determining the extent and severity of scour. While some studies have examined pier shapes, collars, and protective measures, the spatial optimization of pier placement within bends remains inadequately explored, particularly using integrated numerical and physical methods. This research aims to address this gap by analyzing scour patterns across multiple angular positions of a cylindrical bridge pier within a 180° U-shaped bend. To accurately capture the interaction between complex flow structures and sediment dynamics, a hybrid approach combining experimental flume studies and three-dimensional computational fluid dynamics (CFD) modeling was adopted. The numerical simulations employ the finite volume method (FVM) and standard $k - \varepsilon$ turbulence closure in ANSYS Fluent, validated with velocity and bed morphology data acquired through advanced laboratory instrumentation. This investigation not only quantifies scour depth and sediment deposition at various pier positions but also provides practical insights for optimizing pier placement to enhance structural safety and minimize environmental impact in channel bends. By integrating experimental validation with advanced numerical modeling, the study contributes to the growing body of knowledge on hydraulicstructure interaction in non-uniform channel geometries.

Method

The study involved both experimental and numerical components. In the laboratory, a Ushaped open channel flume with a central radius of 2.6 meters and a uniform width of 0.6 meters was used to replicate a 180-degree bend. Cylindrical PVC piers of 60 mm diameter were placed at six angular positions: 0°, 30°, 60°, 90°, 120°, and 150°. A constant flow discharge of 35 L/s and a depth of 0.2 meters were maintained, and each test ran for two hours to ensure bedform stabilization. Velocity data were collected using an Acoustic Doppler Velocimeter (ADV), and bed profiles were measured with a precision rail-guided profiler. For the numerical simulation, a 3D RANS model was implemented using the standard $k - \varepsilon$ turbulence scheme. Structured and unstructured meshes were applied with refinements near the pier to resolve velocity gradients and shear layers accurately. The simulations solved the incompressible Navier–Stokes equations, and convergence was confirmed by residuals and mesh-independence tests. Results from positions at 60° and 150° were used for model validation, ensuring less than 7.5% error in key variables such as velocity and bed shear stress. The Mann-Whitney statistical test showed no significant differences between experimental and numerical results (p > 0.05).

Results

The analysis revealed significant variations in flow structures and scour depths depending on pier placement. The strongest helical currents and highest bed shear stress occurred near 60° and 120°, corresponding to regions with intensified secondary flows and velocity gradients. These conditions promoted deeper and more extensive scour holes, especially on the upstream side of the pier. Pier placements at 30° and 60°, located in the initial half of the bend, showed considerable sediment removal due to flow separation and increased near-bed velocities. In contrast, pier positions at 150°, near the bend exit, experienced significantly reduced scour depths and sediment disturbances. Velocity contour plots demonstrated that high-velocity cores shifted outward due to centrifugal forces, creating asymmetric bed stress patterns. This outward migration of maximum velocity also aligned with observed scour hole orientations. Furthermore, the vertical velocity profiles indicated that maximum flow velocity zones varied in depth depending on pier location, influencing the formation and geometry of scour cavities.

Conclusions

The position of a bridge pier within a channel bend plays a crucial role in determining local scour severity. This study finds that placing piers between $0^{\circ}-30^{\circ}$ and $90^{\circ}-180^{\circ}$ provides optimal conditions by minimizing local scour without significantly disrupting flow patterns. Conversely, positions between 30° and 90° should be avoided due to higher scour potential resulting from secondary flow concentration and increased bed shear stress. Validated numerical models demonstrated high fidelity in predicting flow fields and sediment behavior, supporting their use in future bridge design and river engineering applications. The integration of experimental and numerical methods proved essential for capturing the complex physics of flow-structure-sediment interaction in curved channels. These findings contribute practical guidelines for bridge designers seeking to reduce hydraulic vulnerability and improve infrastructure resilience in curved waterways.

Author Contributions

All authors participated in writing and revising the article.

Conflict of Interest

Authors declared no conflict of interest.



ارزیابی الگوی فرسایش موضعی پیرامون پایه پل و تعیین بهینهترین محل استقرار پایه در قوس ۱۸۰ درجه با استفاده از روش آزمایشگاهی و مدل حجم محدود

پویا بیرانوند^۱، حمیدرضا وثوقی فر^{۲⊠،} میلاد خورانی^۳، حمزه حیدری شورشجانی^۴

Pooya_beyranvand@yahoo.com بهران، ایران. رایانامه: ایران. رایانامه: Pooya_beyranvand@yahoo.com
 گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران جنوب، تهران، ایران. رایانامه: Vosoughi@hawaii.edu
 ۲. نویسنده مسئول، گروه مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه مانوا، هاوایی، امریکا. رایانامه: Miladkhorani@gmail.com
 ۳. گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران جنوب، تهران، ایران. رایانامه: Miladkhorani@gmail.com
 ۶. گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران جنوب، تهران، ایران. رایانامه: Hamzehheidari2015@gmail.com

چکیدہ	اطلاعات مقاله
در قوس کانالها، جریان ثانویهای به واسطه تعادل بین نیروهای گریز از مرکز و گرانشی شکل میگیرد که موجب حرکت لایههای سطحی آب به سوی لبه بیرونی و لایههای زیرین به سمت دیواره درونی	نوع مقاله: مقاله پژوهشی
میشود. این پدیده منجر به بازتوزیع سرعت جریان و تنش برشی در بستر کانال میگردد. پیچیدگی جریان زمانی افزایش مییابد که سازهای هیدرولیکی نظیر پایه پل در مسیر جریان قرار گیرد. در این تحقیق با بهرهگیری از روش عددی حجم محدود و آزمایشهای آزمایشگاهی، الگوی جریان ناشی از موقعیتهای مختلف پایه در قوس ۱۸۰ درجه کانال مورد بررسی قرار گرفت. پایه در شش موقعیت زاویهای شامل ۰۰، ۳۰۰، ۶۰۰، ۹۰۰، ۱۲۰۰ و ۱۵۰۰ در قوس نصب شد. موقعیتهای ۶۰۰ و ۱۵۰۰ برای اعتبارسنجی مدل عددی انتخاب گردید. نتایج نشان داد که میزان برداشت مصالح از بستر در بخش قوس	تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۱۱/۲۳ تاریخ بازنگری: تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۳/۲۷
نسبت به مسیر مستقیم بیشتر است که ناشی از افزایش تنش برشی و تشکیل جریان مارپیچی است. در موقعیتهای ۳ ^۰ ۰ و ⁹ ۶۰ که در نیمه اول قوس قرار دارند، تودههای رسوبی قابل توجهی شکل گرفت. بر اساس نتایج، بهترین موقعیت برای استقرار پایه ابتدا بین زوایای ۰ ^۰ تا ۳ ^{۰۰} و سپس در بازه ۹۰ ^۰ تا ۱۸۰ ^۰	تاریخ انتشار: ۱۴۰۴/۰۴/۰۷
است.	کلیدواژهها: قوس کانال، پایه پل، فرسایش موضعی،
	توده رسوبی، روش حجم محدود

استناد: بیرانوند، پویا؛ وثوقی فر، حمیدرضا؛ خورانی، میلاد؛ حیدری شورشجانی، حمزه. (۱۴۰۴). ارزیابی الگوی فرسایش موضعی پیرامون پایه پل و تعیین بهینه رین محل استقرار پایه در قوس ۱۸۰ درجه با استفاده از روش آزمایشگاهی و مدل حجم محدود. *مجله مدل سازی پیشرفته در مهندسی عمران*، ۱۱۱–۹۵. DOI: 10.22126/amcen.2025.11383.1031

@ 🖲 😒

۱. مقدمه

فرسایش موضعی اطراف پایههای پل یکی از مهمترین عوامل تهدیدکننده پایداری سازههای هیدرولیکی محسوب میشود. این پدیده پیچیده تحت تأثیر شرایط هیدرولیکی، هندسه پایه و مشخصات بستر رودخانه قرار دارد و تاکنون در مطالعات متعددی مورد بررسی قرار گرفته است. در ایالات متحده، عوامل هیدرولیکی مانند ناپایداری جریان، کاهش سطح بستر در بلندمدت، فرسایش عمومی و موضعی و جابهجاییهای محیطی در حدود ۶۰ درصد از خرابی های اساسی پلها نقش دارند[1]. این گزارش همچنین به رابطه بین افزایش عمق فرسایش و کاهش شدت گردابه نعل اسبی و نرخ انتقال رسوبات اشاره کرده است. شکل ۱ الگوی جریان و فرسایش اطراف پایه استوانهای را نشان میدهد.



شکل ۱. الگوی جریان در اطراف پایه پل دایرهای [۲]

مطالعه سازوکار تشکیل گردابه نعل اسبی (HSV) و اثر آن بر فرسایش موضعی پیرامون پایهها از جمله موضوعات کلیدی در تحقیقات مربوط به هیدرولیک جریانهاست. شکل گیری این گردابه در نتیجه تجمع جریان در سمت بالادست پایه بین بستر و بدنه، موجب افزایش تنش برشی و در نتیجه افزایش ظرفیت انتقال رسوبات میشود [۳]. از همین رو، جریان پایین دست به عنوان عامل اصلی در تخریب بستر شناخته میشود[۴]. با توجه به پیچیدگی ساختار جریان در اطراف پایهها، به ویژه در شرایط آشفته، مدلهای عددی نقش قابل توجهی در تحلیل رفتار جریان ایفا کردهاند. در حالی که حتی در ساده ترین هندسههای هیدرولیکی، الگوهای جریان پیچیدهای به وجود میآید[۵]. مطالعات

آزمایشگاهی دیگری نیز با هدف بررسی شرایط مختلف هیدرولیکی، الگوهای فرسایش اطراف پایههای استوانهای را تحلیل کردهاند [۶]. پژوهشهای متعددی تلاش کردهاند با تغییر شکل پایه یا استفاده از روشهای حفاظتی، شدت فرسایش را کاهش دهند. پژوهشی دیگر با استفاده از روش تصویربرداری سرعت ذرات (PIV)، تأثیر عدد رینولدز را بر جریان اطراف پایهها بررسی کرده و دریافتند که افزایش عمق فرسایش با کاهش شدت جریان روبه پایین و پارامترهای گردابه همراه است [۷]. تحقیقات نشان داده است که در پایههای کروی و فرسایش دارد. همچنین، شکل و نحوه استقرار پایه بر توزیع تنش سیستمهای چندپایهای، ارتفاع پایه تأثیر زیادی بر افزایش عمق است ایش و عمق فرسایش تأثیر چشمگیری دارد[۸]. پژوهشگران با فرسایش را گزارش کردند. در کنار این موارد، روش های نوآورانه ای نیز برای کنترل فرسایش مورد بررسی قرار گرفتهاند[۹]. استفاده ای نیز برای کنترل فرسایش مورد بررسی قرار گرفتهاند[۹]. استفاده

بهبود عملکرد در کنترل فرسایش میشود[۱۰]. تمرکز دیگر تحقیقات، بهویژه در سالهای اخیر، بر رفتار جریان و فرسایش در قوس رودخانهها معطوف بوده است. در مطالعهای به تأثیر جریانهای ثانویه سلولی مرکزی در قوسهای تند کانال اشاره شده است[11]. مطالعات بعدی با اندازه گیریهای سهبعدی، تأیید کردند که این جریانها نقش عمدهای در توزیع شتاب و تنش برشی دارند[1۲،۱۳]. در بررسی جریان سهبعدی در کانال مستطیلی با قوس ۱۲۰ درجه، پیچیدگی رفتار جریان را با تغییر انحنای مسیر تحلیل شده است[14]. از نظر مدلسازی عددی، مقایسهای بین مدلهای LES و RANS صورت گرفته که دقت بیشتر مدل IES را در پیش بینی تنش برشی دیوارهها در کانالهای پیچدار نشان داده است قوس ۱۸۰ درجه شبیه سازی و عملکرد مدلهای مختلف آشفتگی در پیش بینی جریان ثانویه بررسی شده است [۱۴].

همچنین، مطالعات دیگری نیز به تحلیل ویژگیهای هیدرولیکی و ژئومتریک جریان در قوسها پرداختهاند و نشان دادهاند که شتابهای طولی و عمودی، توزیع تنش برشی، و پایداری جریان مارپیچی از عوامل کلیدی در این زمینه هستند[۱۷،۱۹،۱۹،۲۰۱]. مطالعات اخیر نیز با تمرکز بر اشکال پایه، راهکارهای کاهش فرسایش و

مدلسازی با نرمافزار SSIIM، نشان دادهاند که موقعیت، هندسه و تدابیر حفاظتی پیرامون پایهها میتواند بهطور مؤثری عمق فرسایش را کاهش دهد [۲۲،۲۳،۲۴،۲۵]. هدف و نوآوری تحقیق حاضر، بررسی رفتار فرسایش موضعی در اطراف پایه پل واقع در قوس رودخانه با استفاده از مدلسازی عددی پیشرفته میباشد. با وجود مطالعات متعدد در زمینه فرسایش در پایههای واقع در بسترهای مستقیم، بررسی دقیق و جامع در خصوص رفتار جریان، شکل گیری گردابهها و تأثیر آنها بر عمق فرسایش در شرایط پیچیده قوس های رودخانهای، بهویژه با بهرهگیری از مدل SSIIM و مقایسه آن با دادههای آزمایشگاهی، هنوز با کمبودهایی مواجه است. این تحقیق درصدد است با شبیهسازی سهبعدی جریان در قوس و بررسی تأثیر هندسه پایه، گامی در جهت پر کردن این خلأ علمی بردارد.

۲. مواد و روشها

۲–۱. معادلات حاکم

دینامیک سیالات محاسباتی CFD در اغلب برای شبیهسازی جریان هوا یا آب به کار می رود. یکی از اهداف آن، تعیین نیروهای ناشی از حرکت سیال و حمل گرما یا ذرات درون آن است. در مدل سازی فیزیکی، استفاده از اصل تشابه دینامیکی در بررسی جریانهای آشفته و پدیده فرسایش پیرامون پایه پل امری رایج است. در این تحقیق، شبیه سازی های عددی با هدف ارزیابی خطاهای حاصل از کاربرد تشابه فرود در مدل سازی فیزیکی جریانهای آشفته و فرسایش رسوبات پیرامون پایه پل انجام شده است. طی دهههای اخیر، مدل های عددی به ابزارهای اصلی برای بررسی جریانهای متلاطم تبدیل شدهاند. معادلات سهبعدی ناویر استوکس برای جریانهای ویسکوز و متلاطم و معادله پیوستگی (تداوم جرم) به صورت زیر تعریف می شوند:

$$\frac{\partial \overline{u}_i}{\partial x_i} = 0 \tag{1}$$

$$\rho \left(\frac{\partial \overline{u}_i}{\partial t} + \overline{u}_j \frac{\partial \overline{u}_i}{\partial x_j} \right) = -\frac{\partial \overline{P}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\mu \left(\frac{\partial \overline{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right] - \frac{\partial \rho \overline{u'_i u'_j}}{\partial x_i} \tag{1}$$

که در آن i = 1, 2, 3 به ترتیب بیانگر جهت جریان، عرضی و عمودی
است،
$$\overline{u}$$
 مؤلفههای سرعت میانگین، \overline{P} فشار میانگین، ρ چگالی، μ
ویسکوزیته سینماتیکی سیال و τ تنشهای برشی رینولدز یا
تنشهای زیرشبکهای هستند. معادله بقای مومنتم برای جریانهای
ویسکوز و غیرقابل تراکم به صورت زیر بیان میشود (روتر، ۲۰۰۶):
 $\left(\frac{\mathrm{d}U_{\mathrm{i}}}{\mathrm{dt}} + U_{j}\frac{\mathrm{d}U_{\mathrm{i}}}{\mathrm{dx}_{\mathrm{j}}}\right) = \frac{1}{\rho}\frac{\partial}{\partial x_{j}}(-P\delta_{ij} - \rho\overline{U_{i}U_{\mathrm{j}}}),$
(i, j = 1,2,3)

که در آخرین عبارت ρŪ_tU₁ تنش رینولدز است که نشاندهنده انتقال مومنتوم ناشی از آشفتگی است.

$$-\overline{U_{l}U_{j}} = \vartheta_{t}\left(\frac{\partial U_{i}}{\partial X_{i}} + \frac{\partial U_{j}}{\partial X_{i}}\right) - \frac{2}{3}K\delta_{ij} \tag{(f)}$$

در این پژوهش از مدل آشفتگی استاندارد ٤-k استفاده شد. این مدل با وجود سادگی و هزینه محاسباتی پایین، توانایی قابل قبولی در پیش بینی الگوی جریان و توزیع تنش برشی در هندسههای پیچیده مانند قوس کانال دارد. مطالعات پیشین نظیر قبادیان و همکاران ۲۰۱۱ و نیکنژاد و همکاران ۲۰۲۳ نشان داده شده است که این مدل در مقایسه با سایر مدلهای (RANS) مانند (ه-k) در شرایط مشابه، دقت مناسبی دارد و پایداری عددی بالاتری در حل معادلات جریان فراهم میکند. مدل ٤-۶ مقدار ویسکوزیته آشفته را بر اساس انرژی جنبشی آشفتگی k و نرخ اتلاف انرژی ٤ محاسبه میکند:

$$\vartheta_t = c'_{\mu} \frac{k^2}{\varepsilon} \tag{(a)}$$

$$K = \frac{1}{2} \left(\overline{u'^2} + \overline{v'^2} + \overline{\omega'^2} \right) \tag{9}$$

متر در بالادست و ۵.۲ متر در پاییندست قوس تعبیه گردید. پایه استوانهای از جنس PVC با قطر ۶۰ میلیمتر به عنوان پایه پل استفاده شده و در شش موقعیت زاویهای ۰[°]، ۳۰[°]، ۶۰[°]، ۹۰[°]، ۱۲۰[°] و ۱۵۰° نسبت به مرکز قوس قرار گرفت. موقعیتهای زاویهای ۶۰° و ۱۵۰° به منظور اعتبارسنجی و کالیبراسیون مدل عددی انتخاب شدند. عمق جریان در تمامی آزمایشها ثابت و برابر با ۲۰ سانتیمتر بوده و نرخ دبی برابر با ۳۵ لیتر بر ثانیه در نظر گرفته شد. مدت زمان هر آزمایش ۲ ساعت تعیین گردید زیرا طی این زمان بستر به پایداری مناسبی خواهد رسید. دیوارههای کانال از جنس پلکسی گلاس شفاف و صلب بوده و ضریب زبری مانینگ آن ۰.۰۰۸ در نظر گرفته شده است. طبق پیشنهاد مطالعات آزمایشگاهی گذشته برای حفظ دقت مدل فیزیکی، قطر پایه نباید از ۱۰٪ عرض کانال تجاوز کند، همچنین برای حفظ پایداری عددی در شبیهسازیهای عددی و کاهش تأثیر دیوارههای جانبی، نسبت قطر پایه به عرض کانال معمولاً بین ۱:۶ تا ۱:۱۰ توصیه می شود. (مسجدی و همکاران ۲۰۱۰). در این تحقیق، مقدار ۱:۱۰ به عنوان حد حداکثری و نسبت ۱:۶۰۲۵ به عنوان مقدار بهینه در نظر گرفته شده است. از این رو، پایهای با قطر ۶۰ میلیمتر انتخاب گردید. هرچند در منابع مختلف نسبت ۲۵ تا ۳۰ به عنوان بازهی متعارف توصیه شده است، در این تحقیق، نسبت ۴۶ بهصورت هدفمند و با هدف کاهش تشکیل ریپل و بهبود پایداری عددی مدل انتخاب گردید. این مقدار در محدودهای است که در پژوهشهای مشابه نیز استفاده شده و نتایج پایدار و قابل اعتمادی ارائه کردهاند. (نیکنژاد و همکاران ۲۰۲۳: آناگار و هاگر ۲۰۰۷). ذرات رسوبی مورد استفاده دارای قطر متوسط ($d_{50} = 1.28mm$)، ($d_{84} = 1.65mm$)، ($d_{50} = 1.28mm$)، ا.۳ ($d_{16} = 0.97mm$) هستند. انحراف معیار دانهبندی برابر با محاسبه شد. پس از انجام آزمایشهای طولانیمدت، ضخامت لایه رسوبی در کل طول کانال برابر با ۲۰ سانتیمتر تثبیت شد. شکل۲ ویژگیهای کانال آزمایشگاهی را نشان میدهد. همچنین ویژگیهای هیدرولیکی آزمایشها نیز در جدول ۱ آورده شدهاند. برای اندازه گیری سرعت جریان از دستگاه ADV مدل (Nortek) استفاده شد که دادههای سهبعدی سرعت را در نقاط مختلف مقطع ثبت می کرد. عمق جریان با استفاده از خط کش فلزی مدرج با دقت یک میلیمتر اندازهگیری شد. همچنین برای برداشت یروفیل

$$\frac{D_k}{D_t} = P_k - \varepsilon + diffusion \ terms \tag{Y}$$

$$\frac{D_{\varepsilon}}{D_{t}} = C_{\varepsilon 1} \frac{\varepsilon}{\kappa} P_{K} - C_{\varepsilon 2} \frac{\varepsilon^{2}}{\kappa} + diffusion \ terms \tag{A}$$

$$σ_{\varepsilon} = 1.3$$
 ε $σ_k = 1$ ε $C_{\varepsilon 2} = 1.92$ ε $C_{\varepsilon 1} = 1.44$ ε $C_{\mu} = 0.09$

در مرز ورودی جریان، شرط مرزی دیریکله اعمال میشود (در شرط مرزی دیریکله، مقدار تابع در مرز معلوم است). برای تعیین مقدار انرژی جنبشی آشفتگی در مرز ورودی، تنش برشی و سرعت مشخص شده در ورودی مورد استفاده قرار میگیرد:

$$k = \frac{\tau}{\rho \sqrt{C_{\mu}}} \tag{9}$$

سپس با داشتن k و v_t، مقدار *ع* نیز محاسبه می شود. در مرز خروجی، شرط گرادیان صفر اعمال می گردد. سطح آزاد آب با استفاده از روش (سطح دربسته ثابت) محاسبه شده و موقعیت آن با استفاده از معادله برنولی تعیین می گردد. شرط مرزی بستر و دیواره های سخت نیز از قانون دیواره اشلیختینگ (۱۹۷۹) پیروی می کند:

$$U^{+} = \frac{1}{k} \ln \left(\frac{y^{+}}{k_{s}^{+}} \right) \tag{(1.1)}$$

که در آن U^+ سرعت اصطکاکی، U سرعت در مرکز سلول نزدیک ترین سطح به دیواره، k=0.4 (ثابت فون کارمان) و y فاصله از دیواره میباشد.

۲-۲. مدل آزمایشگاهی

در این مطالعه، یک کانال آزمایشگاهی با مقطع U شکل و زاویه مرکزی ۱۸۰ درجه مورد استفاده قرار گرفت. عرض و ارتفاع کانال برابر با ۰.۶ متر و شعاع انحنای آن ۲.۶ متر در نظر گرفته شد. به منظور ایجاد شرایط پایدار جریان، بخش مستقیم با طولهای ۷،۲

فرسایش، از یک پروفیل بردار مکانیکی ریلی با دقت یک میلیمتر استفاده گردید که با حرکت خطی روی ریل در امتداد طول کانال، تغییرات سطح بستر را در فواصل ۵ سانتیمتری ثبت میکرد.

در شبیه سازی عددی، شبکه ترکیبی (Structured/Unstructured) بکار گرفته شد. اطراف پایه پل و نواحی مرزی از مش مثلثی و چهاروجهی نامنظم با ریزشدگی تدریجی استفاده شد. تعداد کل سلولهای دامنه حدود ۱.۲ میلیون بود. برای افزایش دقت مدل در اطراف پایه، از لایه های مرزی با رشد تدریجی استفاده شد. گام زمانی مدل برابر با ۰۰.۱ ثانیه در نظر گرفته شد و شرط همگرایی برای معادلات پیوستگی و مومنتم، مقدار باقیمانده کمتر از ۰۰۰ تعیین گردید. برای اطمینان از بی تأثیری اندازه شبکه بر نتایج، آزمون حساسیت مش با سه سطح مختلف انجام شد. اختلاف کمتر از ۲٪ در مقادیر کلیدی (سرعت و تنش برشی) بین دو مش نهایی، نشان دهنده استقلال نتایج از اندازه شبکه بود.







شکل ۲. مدل آزمایشگاهی و محل قرارگیری پایهها در زوایای مختلف

رديف	دبی ورودی (Q)(lit/s)	سرعت جریان ورودی (V) (m/s)	عدد	عدد
			فرود (Fr)	رينولدز (Re)
١	٣٠	۰.۲۵	۰.۱۸	۵۰۰۰
٢	۳۵	٠.٢٩٢	٠.٢١	۵۸۴۰۰
٣	۴.	۳۳۳. ۰	۰.۲۴	<i>\$</i> \$\$
۴	47	۰.۳۵۰	۰.۲۵	γ

جدول ۱. ویژگیهای هیدرولیکی آزمایشها

۲-۳. مدل عددی و روند تحلیل

در این پژوهش، از روش عددی حجم محدود (FVM) برای شبیه سازی عددی جریان استفاده شده است. این روش یکی از تکنیک های متداول در دینامیک سیالات محاسباتی (CFD) است که با استفاده از آن، معادلات ناویر –استوکس میانگین گیری شده به منظور مدل سازی جریان های آشفته پیرامون پایه در قوس کانال حل می شود. نرم افزار Fluent به عنوان بستر عددی انتخاب و برای شبیه سازی جریان در قوس ۱۸۰ درجه به کار گرفته شده است.

۲-۳-۱. مقایسه نتایج عددی و مدل آزمایشگاهی

مقادیر سرعت در موقعیتهای مختلف در مناطق بالادست و پاییندست برای بررسی اثرات الگوی جریان بر پایه پل، در شکلهای ۳ تا ۶ ارائه شدهاند که مقاطع مختلف جریان قبل، در محل، و بعد از

پایه را در زوایای ۶۰ و ۱۵۰ درجه نمایش می دهند. در این پژوهش، به منظور تحلیل موقعیت نسبی مقاطع مختلف نسبت به محل پایه، پارامتر $q \theta \theta$ تعریف شده است، که در آن θ زاویه موقعیت مقطع مورد نظر در قوس و $q \theta$ زاویه استقرار پایه در قوس (بر حسب درجه) می اشد. پایه ها در زوایای ۰۰، ۳۰۰، ۶۰، ۹۰۰، ۲۰۱۰^o و ۱۵۰^o نسبت به مرکز قوس قرار داده شدند. شکلهای ۳ تا ۶، توزیع بردارهای سرعت جریان را در سه ناحیه (قبل از پایه، محل پایه، و بعد از پایه) برای زوایای ۶۰ و ۱۵۰ درجه به صورت آزمایشگاهی و عددی نمایش می دهند.



شکل۳. نتایج آزمایشگاهی مربوط به الگوی جریان پایه پل در موقعیت ۶۰ درجه: (الف) ۳۰ سانتی متر قبل از پایه، (ب) در محل پایه، (ج) ۳۰ سانتی متر بعد از یایه





(ج)



شکل ۶. نتایج مدل عددی مربوط به الگوی جریان پایه پل در موقعیت ۱۵۰ درجه: (الف) قبل از پایه، (ب) در محل پایه، (ج) بعد از پایه

شکل ۵. نتایج آزمایشگاهی مربوط به الگوی جریان پایه پل در موقعیت ۱۵۰ درجه: (الف) قبل از پایه، (ب) در محل پایه، (ج) بعد از پایه

۲-۴. اعتبارسنجی حداکثر تنش برشی

قرارگیری پایه در درون جریان منجر به تغییر در الگوی جریان پیرامون آن میشود و یکی از پارامترهای کلیدی تأثیرگذار در این زمینه، تنش برشی بستر است. تعیین مقدار حداکثر تنش برشی می تواند نقش مهمی در انتخاب روشهای مناسب برای حفاظت بستر در برابر پدیده آبشستگی موضعی ایفا کند. نتایج ارائهشده در شکل ۷ نشاندهنده تغییرات حداکثر تنش برشی در موقعیتهای مختلف استقرار پایه میباشند. به منظور اعتبارسنجی مدل عددی با دادههای آزمایشگاهی، آزمون آماری Mann-Whitney مورد استفاده قرار گرفت که نتایج آن نشان دهنده عدم تفاوت معنی دار میان دو مجموعه داده بود. P-value > 0.05 نش برشی در آزمایشگاه بر مبنای دادههای هیدرولیکی و در برخی نقاط با استفاده از گرادیان سرعت نزدیک بستر محاسبه شد. برای اعتبارسنجی مدل عددی، علاوه بر آزمون آماریMann-Whitney، میانگین خطای نسبی بین دادههای عددی و آزمایشگاهی نیز محاسبه گردید. مقادیر میانگین خطا برای سرعت و تنش برشی به ترتیب ۶.۲٪ و ۷.۵٪ بهدست آمد که نشان دهنده دقت مناسب مدل عددی در بازنمایی شرایط آزمایشگاهی است..علاوه بر این، تحلیلها حاکی از آن است که بیشینه تنش برشی در مجاورت پایههایی که در زوایای ۶۰ و ۱۲۰ درجه قرار گرفتهاند، رخ میدهد، در حالی که کمینه آن در زاویه ۱۵۰ درجه مشاهده شده است. مقدار پايين تنش برشي در اين زاويه با كاهش قابل توجه آبشستگي موضعي همراه بوده است.



شکل ۷. حداکثر تنش برشی در مجاورت پایه در شرایط مختلف

۲-۵. مسیر سرعت حداکثر

شکل ۸ موقعیت حداکثر سرعت جریان را در محل قوس نشان می دهد. دبی و عمق جریان به ترتیب ۳۰ لیتر بر ثانیه و ۲.۰ متر است. حداکثر سرعت در طول مسیر برای هریک از پایهها در شکل های بعدی به طور جداگانه ارائه شده است. با ورود جریان به داخل قوس بعدی به طور جداگانه ارائه شده است. با ورود جریان به داخل قوس می مروح و در مقطع 70 = θ درجه به دیواره بیرونی نزدیک می شود و سپس موقعیت آن تا انتهای قوس ثابت می ماند. با ورود مریان به قوس، مسیر حداکثر سرعت به تدریج به سمت دیواره بیرونی مریان به قوس، مسیر حداکثر سرعت به تدریج به سمت دیواره بیرونی منتقل می شود. در مقاطع انتهایی قوس، با مقایسه پروفیل های عمودی سرعت در دو مقطع متوالی مشاهده شد که تغییرات بین آنها کمتر از ۵٪ است. این پایداری در الگوی سرعت نشان دهنده رسیدن جریان به حالت «کاملاً توسعه یافته» است.

در این تحقیق، معیار توسعه یافتگی جریان، ثبات نسبی پروفیل سرعت و کاهش تغییرات عرضی آن در طول مسیر در نظر گرفته شده است. در انتهای قوس، جریان به وضعیت نیمه پایدار یا تقریبا پایدار در بخش انتهایی قوس می رسد. در موقعیت $\theta p = 30$ درجه حداکثر سرعت جریان در ناحیه نزدیک به دیواره داخلی نسبت به سایر موقعیت ها بیشتر مشاهده شد. این موقعیت بیشترین تاثیر را بر افزایش سرعت نزدیک بستر و در نتیجه پتانسیل آغاز فرسایش موضعی داشته است.. بنابراین تحت تأثیر جدا شدن جریان و تنگ شدگی به دلیل موقعیت پایه در مسیر جریان، حداکثر سرعت جریان از مسیر نوسانی می گذرد. در موقعیت ۶۰ درجه، جریان ثانویه به حداکثر می رسد. بنابراین جریان ثانویه بر حداکثر سرعت مسیر و افزایش سرعت در اطراف پایهها تاثیر گذار است. بیشترین نرخ انتقال رسوب در موقعیت $\theta = 90$ درجه مشاهده شد. این نتیجه بر اساس تحلیل پروفیلهای فرسایش و حجم توده رسوبی بهدست آمد که طی مدت زمان ۲ ساعت آزمایش در موقعیتهای مختلف اندازه گیری و مقایسه شدهاند. حجم بیشتر مصالح برداشت شده در این موقعیت، نشاندهنده شدت بیشتر فرآیند انتقال رسوب است. در دو بخش ۱۲۰ درجه و ۱۵۰ درجه، نتایج یکسانی مشاهده می شود. نتایج نشان میدهد که جریان ثانویه کمی قوی تر از مقطع ۹۰ درجه است. در نهایت می توان بیان کرد که اثر پایه پل بر اساس سرعت در تمام مسیر در امتداد خم کانال عموماً موضعی بوده و بر اساس توان جریان ثانویه، کم و بیش یکسان است.



h/H = 0.95 مقایسه موقعیت سرعت حداکثر مسیر نزدیک به سطح آب h/H = 0.95 شکل ۸. مقایسه موقعیت سرعت حداکثر مسیر نزدیک به سطح آب

۲-۶. حداکثر سرعت جریان در اطراف پایهها

شکل ۹ حداکثر سرعت جریان را در سطوح مختلف عمقی و مقاطع متنوع، متناسب با موقعیتهای مختلف پایه در قوس کانال نمایش میدهد. به طور خاص، این نمودارها حداکثر سرعت جریان در زاویه ۹۰ درجه و در تراز عمقی h/H = 0.07 را نشان میدهند، که مقدار آن برابر با ۳۷۹. متر بر ثانیه اندازه گیری شده است. در تصاویر (الف) تا (هـ)، مشاهده میشود که میانگین سرعت در لایههای میانی معمولاً بیشتر از سرعت در نزدیکی سطح آب یا کف بستر است. با نزدیک شدن جریان به پایه، افزایش قابل توجهی در سرعت و انحراف مسیر جریان در تمامی سطوح دیده می شود. این تغییرات ناشی از کاهش عرض مؤثر کانال به دلیل وجود پایه و در نتیجه باریک شدن مسیر جریان است. پس از عبور از پایه، گرچه افزایش سرعت ادامه دارد، اما در بیشتر مقاطع، مقدار حداکثر سرعت به وضعیت تقریباً ثابتی می سد. در شکل ۹(الف)، بیشینه سرعت در نزدیکی سطح آب مشاهده می شود، در حالی که با نزدیک شدن به پایه، اختلاف بین سرعت در نزدیکی سطح و بستر کاهش می یابد. در شکل ۹(ب)، بیشینه سرعت به سطح نزدیک بستر منتقل شده است. شکل ۹(ج) نشاندهنده وقوع حداكثر سرعت در ناحیه میانی عمق جریان است، و در شکل ۹(د)، این بیشینه مجدداً به ناحیه سطحی متمایل است. نهایتاً، در شکل ۹(هـ)، بیشترین سرعت در نزدیکی بستر ثبت شده است، که این پدیده می تواند عاملی مؤثر در تشدید فرسایش موضعی در این ناحیه باشد.





۳. شکلگیری حفره آبشستگی

پارامترهای اصلی مورد نیاز برای محاسبهی ابعاد حفرهی آبشستگی در شکل ۱۱ نشان داده شدهاند.









شکل ۹. حداکثر سرعت در مقاطع و سطوح مختلف برای پایهها در موقعیتهای مختلف درون قوس خم: (الف) موقعیت ۳۰ ب) موقعیت ۶۰ ج) موقعیت ۹۰ د) موقعیت ۱۲۰ ه) موقعیت ۱۵۰

شکل ۱۰ نسبت حداکثر سرعت جریان در موقعیتهای مختلف پایه را نسبت به حداکثر سرعت جریان در مسیر مستقیم، در ترازهای مختلف، نمایش میدهد. به طور کلی، تفاوت قابل توجهی میان حداکثر سرعت جریان در مقاطع مستقیم و قوسی مشاهده نمیشود. موقعیت عمقی محل وقوع حداکثر سرعت جریان میتواند به عنوان یکی از عوامل مؤثر در تشدید یا کاهش فرآیند آبشستگی در نواحی مختلف پیرامون پایه تفسیر شود. بر اساس نتایج حاصل، بیشترین میزان آبشستگی در موقعیتهای ۶۰ و ۱۲۰ درجه و کمترین آن در موقعیتهای ۹۰ و ۱۵۰ درجه پایه مشاهده شده است، که این امر با مقادیر حداکثر سرعت جریان در مجاورت پایه در این موقعیتها همخوانی دارد.



شکل ۱۲. پروفیلهای طولی و عرضی حفره در بالای پایه در زاویههای خمیدگی ۶۰ و ۱۵۰ درجه و در دبیهای مختلف: (الف) مقطع طولی در زاویه ۶۰ درجه، (ب) مقطع طولی در زاویه ۱۵۰ درجه، (ج) مقطع عرضی در زاویه ۶۰ درجه، (د) مقطع عرضی در زاویه ۱۵۰ درجه

مقادیر کمی پارامترها و جزییات فرمهای آبشستگی در شکل ۱۳ برای تمامی موقعیتها ارائه شده است. دادههای شکل مذکور تأیید میکنند که با افزایش دبی، طول پایه حفره و تودهی رسوبی افزایش مییابد. پارامتر W_h در هر مقطع با افزایش دبی افزایش مییابد و d_s نیز در تمام زمانها و مقاطع با افزایش دبی رشد میکند.





شکل ۱۳. پارامترهای حداکثر آبشستگی برای پایه پایه در مقاطع و دبیهای مختلف: (الف) طول حفره آبشستگی، (ب) عرض عمق آبشستگی، (ج) طول توده رسوبی، (د) عمق حفره آبشستگی

شکل ۱۳ (الف) بیشترین طول حفره آبشستگی را در موقعیتهای مختلف پایه و دبیهای متفاوت نمایش می دهد. مطابق این نتایج، بیشترین طول حفره در نیمه اول قوس کانال مشاهده می شود، در حالی که کمترین مقدار آن در مسیر مستقیم ($\theta p = 0^{0}$) ثبت شده است. در دبیهای پایین، مقادیر L_h در موقعیتهای مختلف تفاوت چشمگیری ندارند، اما در دبی ۴۲ لیتر بر ثانیه، آستانه یحرکت رسوبات در قوس ایجاد شده و افزایش قابل توجهی نسبت به دبی ۴۰ لیتر بر ثانیه مشاهده می شود. نمودارهای شکل ۱۳ (ب)، (ج) و (د) نیز همین روند افزایشی را برای پارامترهای W_h ، $s^b e_{a}$ تأیید می کنند.

۴. نتیجه گیری

در این پژوهش، تأثیر موقعیت زاویهای پایه پل بر الگوی فرسایش موضعی در قوس ۱۸۰ درجه یک کانال با بهره گیری از مدلسازی عددی به روش حجم محدود و آزمایشهای فیزیکی بررسی شد. نتایج نشان داد که الگوی جریان در قوس تحت تأثیر جریانهای ثانویه قرار گرفته و بیشینه سرعت جریان به سمت دیواره بیرونی کانال منحرف میشود؛ این پدیده با افزایش زاویه پایه تا ۶۰ درجه شدت بیشتری مییابد. حضور پایه پل موجب تشکیل گردابههای موضعی و افزایش

سرعت جریان در اطراف آن می شود، هر چند این تأثیر بیشتر به صورت موضعی بوده و الگوی کلی جریان را بهطور چشمگیری تغییر نمیدهد. بررسی میزان آبشستگی نشان داد که بیشترین عمق و گسترش حفره در موقعیتهای زاویهای ۶۰ و ۱۲۰ درجه و کمترین آن در موقعیتهای ۹۰ و ۱۵۰ درجه رخ میدهد؛ این تفاوتها با الگوی توزيع سرعت و تنش برشی در اطراف پايه همخوانی دارد. همچنين مشخص شد که در موقعیتهایی با بیشینه تنش برشی، عمق و طول حفره آبشستگی بهطور معناداری افزایش می یابد و بیشینه عمق معمولاً در نيمه اول قوس ديده مي شود. مقايسه نتايج عددي و آزمایشگاهی با استفاده از آزمون آماری Mann-Whitney نشان داد که مدل عددی با میانگین خطای نسبی کمتر از ۸ درصد از دقت مناسبی برخوردار است. بر اساس تحلیل دادهها، موقعیتهای زاویهای بین ۰ تا ۳۰ درجه و ۹۰ تا ۱۸۰ درجه بهعنوان بازههای مناسب برای نصب پایه پیشنهاد می شوند، در حالی که موقعیت بین ۳۰ تا ۹۰ درجه بیشترین پتانسیل فرسایش موضعی را دارد. این نتایج میتوانند بهعنوان مبنایی برای بهینهسازی مکانیابی پایه پلها در مسیرهای قوسی، بهویژه در طراحیهایی با هدف کاهش خطر فرسایش موضعی، مورد استفاده قرار گیرند.

- [11] Blanckaert, K., Graf, W.H., 2004. Momentum transport in sharp open-channel bends. Journal of Hydraulic Engineering. 130 (3): 186–198. https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(2004)130:3(186).
- [12] Blanckaert K, Buschman F.A, Schiele R, Wijbenga, J.H. A (2008) Redistribution of velocity and bed-shear stress in straight and curved open channels by means of a bubble screen: Laboratory experiments. 134(2): 184-195. https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(2008)134:2(184)
- [13] Rasaei M. and Nazari S. (2023) Experimental and numerical evaluation of local scouring around different bridge piers at a 90 convergent meander. Sadhana. 48:116. https://doi.org/10.1007/s12046-023-02140-0.
- [14] Lee, S.H., Choun, Y.S., Kim, J.H., Kim, D.Y.
 (2016) Effect of pier shape and alignment on equilibrium scour. Journal of Hydraulic Engineering, 142(8), 04016021. https://doi.org/10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.0001135
- [15] Pasiok R, Stilger-Szydło E (2010) Sediment particles and turbulent flow simulation around bridge piers. Archives of Civil and Mechanical Engineering. 10(2): 67-79. https://doi.org/10.1016/S1644-9665(12)60051-X
- [16] Ghobadian R, Mohammadi K (2011) Simulation of subcritical flow pattern in 180uniform and convergent open-channel bends using SSIIM 3-D model, Water Science and Engineering. 4(3): 270– 283. https://doi.org/10.3882/j.issn.1674-2370.2011.03.004
- [17] Booij R (2003) Measurements and large eddy simulations in some curved flumes. Journal of Turbulence, 4(1): 8–16. https://doi.org/10.1088/1468-5248/4/1/008
- [18] Olsen N R B, Melaaen M C (1993) Threedimensional calculation of elution around cylinders. Journal of Hydraulic Engineering. 119 (9): 1048–54. http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(1993)119:9(1048)
- [19] Masjedi, A, ShafaeBejestan M, Esfandi M (2010) Experimental study on local elution around single oblong pier fitted with a collar in a 180-degree flume

References

- [1] Lagasse P F, Richardson E V (2001) ASCE compendium of stream stability and bridge elution papers. Journal of Hydraulic Engineering, ASCE. 127(7): 531–533. https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(2001)127:7(531)
- [2] Yang, Y.,Melville, B.W.,Macky, G.H. and Shamseldin, A.Y. (2020). Experimental study on local scour at complex bridge pier under combined waves and current. Coastal Engineering 160, 103730.
- [3] Pal M.N, Singh K, Tiwari N.K (2012) M5 model tree for pier elution prediction using field data set. Journal of Civil Engineering. 16(6): 1079–1084.
- [4] Kamil H. M, Karim O (2002) Simulations of flow around piers. Journal of Hydraulic Research. 40(2): 161–174.

https://doi.org/10.1080/00221680209499859

- [5] Graf W.H, Istiarto I (2002) Flow pattern in the elution hole around a cylinder. Journal of Hydraulic Research. 40(1): 13–20. https://doi.org/10.1080/00221680209499869
- [6] Shen H W, Schneider V R, Karaki S S (1966) Mechanics of local scour, Colorado State University, Civil Engineering Department, Fort Collins, Colorado.
- [7] Unger J, Hager WH., 2007. Down-flow and horseshoe vortex characteristics of sedimentembedded bridge piers. Experiments in Fluids. 42: 1-19. https://doi.org/10.1007/s00348-006-0209-7
- [8] Kumar, A., Kothyari, U.C. (2012) Temporal variation of scour around circular compound bridge piers. Journal of Hydraulic Research, 50(3), 291– 300. https://doi.org/10.1080/00221686.2011.645251
- [9] Abdel-Aal, Y.A., Mohamed, M.D. (2006) Experimental study of local scour around a bridge pier with foundation collars. Scientific Bulletin, Faculty of Engineering, Ain Shams University, 41(2), 87–98.
- [10] Zarrati A.M, Nazariha M, Mashahir M.B (2006) Reduction of Local Scour in the Vicinity of Bridge Pier Groups Using Collars and Riprap. Journal of Hydraulic Engineering. 132(2): 154–162. https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(2006)132:2(154)

bend. International Journal of Sediment Research. 25: 304-312.

- [20] Abdulrazaq K. A and Maatooq J. S. (2023) Experimental investigation of local scour under two oblong piers of a bridge crossing a sharp bend river. Journal of water and land development. No. 58 (VII– IX): 129–135. DOI: 10.24425/jwld.2023.146605
- [21] Ali A. M and Khaled F. (2023) Optimizing Pier Design to Mitigate Scour: A Comprehensive Review and Large Eddy Simulation Study. Journal of Applied Fluid Mechanics, Vol. 16, No. 7, pp. 1296-1315. https://doi.org/10.47176/jafm.16.07.1691
- [22] Niknezhad F., Mahmoudi A., Vaghefi M., Zangeneh M., Merajie S. H. (2023) Numerical Study of Scouring pattern around Bridge pier in 180-degree bend Divergent and Convergent Using SSIIM software. J. Hydraul. Struct., 2023; 9(2):1-13. DOI: 10.22055/jhs.2023.43705.1252
- [23] Cristina F, Rui L. António C (2016) Effect of pier shape and pier alignment on the equilibrium elution depth at single piers, International Journal of Sediment Research. 31(3): 244-250. https://doi.org/10.1016/j.ijsrc.2016.04.001
- [24] Yang, Y.,Melville, B.W.,Macky, G.H. and Shamseldin, A.Y. (2020). Experimental study on local scour at complex bridge pier under combined waves and current. Coastal Engineering 160, 103730.
- [25] Khosronejad A. Kang S, Sotiropoulos F (2012) Experimental and computational investigation of local elution around bridge piers. Advances in Water Resources 37: https://doi.org/73-85.
 10.1016/j.advwatres.2011.09.013
- 27. Mansouri, A.R. (2006) 3-D Numerical Simulation of Bed Changes in 180 Degree Bends. M.S. Thesis, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran.