

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

Pooya Beyranvand¹ , Hamidreza Vosoughifar^{2✉} , Milad Khorani³ ,
Hamzeh Heidari Soureshjani⁴

1. Department of Civil Engineering, Islamic Azad University South Tehran Branch, Tehran, Iran. E-mail: Pooya_beyranvand@yahoo.com
2. 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

ABSTRACT

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.

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

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 hydraulic-structure interaction in non-uniform channel geometries.

Method

The study involved both experimental and numerical components. In the laboratory, a U-shaped 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

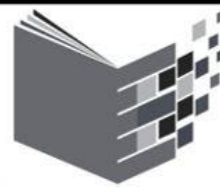
The position of a bridge pier within a channel bend plays a crucial role in determining local scour severity. This study finds that placing piers between 0°–30° and 90°–180° provides optimal conditions by minimizing local scour without significantly disrupting flow patterns. Conversely, positions between 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 بهینه ترین محل استقرار پایه در قوس ۱۸۰ درجه با استفاده از روش آزمایشگاهی و مدل حجم محدود

پویا بیرانوند^۱، حمیدرضا وثوقی^۲✉، میلاد خورانی^۳، حمزه حیدری شورشجانی^۴

۱. گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران جنوب، تهران، ایران. رایانامه: Pooya_beyranvand@yahoo.com

۲. نویسنده مسئول، گروه مهندسی عمران و محیط زیست، دانشکده مهندسی، دانشگاه مانوا، هاوایی، امریکا. رایانامه: Vosoughi@hawaii.edu

۳. گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران جنوب، تهران، ایران. رایانامه: Miladkhorani@gmail.com

۴. گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران جنوب، تهران، ایران. رایانامه: Hamzehheidari2015@gmail.com

چکیده

اطلاعات مقاله

نوع مقاله:

مقاله پژوهشی

تاریخ دریافت:

۱۴۰۳/۱۱/۲۳

تاریخ بازنگری:

۱۴۰۴/۰۲/۲۱

تاریخ پذیرش:

۱۴۰۴/۰۳/۲۷

تاریخ انتشار:

۱۴۰۴/۰۴/۰۷

کلیدواژه‌ها:

قوس کانال،

پایه پل،

فرسایش موضعی،

توده رسوبی،

روش حجم محدود

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 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 ۰°، ۳۰°، ۶۰°، ۹۰°، ۱۲۰° و ۱۵۰° در قوس نصب شد. موقعیت‌های ۶۰° و ۱۵۰° برای اعتبارسنجی مدل عددی انتخاب گردید. نتایج نشان داد که میزان برداشت مصالح از بستر در بخش قوس نسبت به مسیر مستقیم بیشتر است که ناشی از افزایش تنش برشی و تشکیل جریان مارپیچی است. در موقعیت‌های ۳۰° و 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° تا ۳۰° و سپس در بازه ۹۰° تا ۱۸۰° است.

استناد: بیرانوند، پویا؛ وثوقی، فر، حمیدرضا؛ خورانی، میلاد؛ حیدری شورشجانی، حمزه. (۱۴۰۴). ارزیابی الگوی فرسایش موضعی پیرامون پایه پل و تعیین بهینه ترین محل استقرار پایه در قوس ۱۸۰ درجه با استفاده از روش آزمایشگاهی و مدل حجم محدود. *مجله مدل سازی پیشرفته در مهندسی عمران*، ۲(۱)، ۹۵-۱۱۱. DOI: 10.22126/amcen.2025.11383.1031

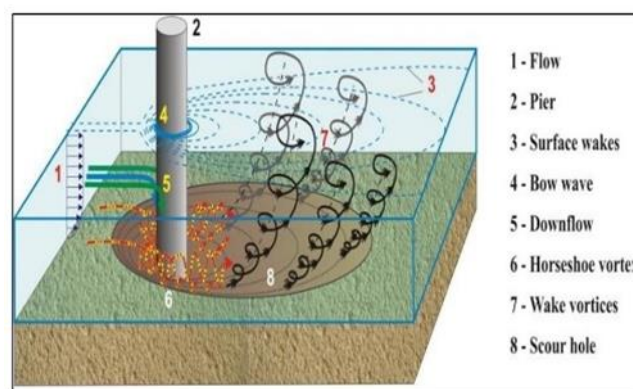


© نویسندگان.

ناشر: دانشگاه رازی.

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 خرابی‌های اساسی پل‌ها نقش دارند [۱]. 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. شکل‌گیری 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 ساده‌ترین 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 دریافته‌اند که افزایش عمق فرسایش با کاهش شدت جریان روبه‌پایین و پارامترهای گردابه همراه است [۷]. تحقیقات نشان داده است که در پایه‌های کرووی و سیستم‌های چندپایه‌ای، ارتفاع پایه تأثیر زیادی بر افزایش عمق فرسایش دارد. همچنین، شکل و نحوه استقرار پایه بر توزیع تنش برشی و عمق فرسایش تأثیر چشمگیری دارد [۸]. پژوهشگران با استفاده از طوق در اطراف پایه‌های چندگانه، کاهش ۶۵ درصدی در عمق فرسایش را گزارش کردند. در کنار این موارد، روش‌های نوآورانه‌ای نیز برای کنترل فرسایش مورد بررسی قرار گرفته‌اند [۹]. استفاده از صفحات گشتاوری (Torque) و ترکیب آن‌ها با ریپ‌راپ موجب 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 [۱۱]. مطالعات بعدی با اندازه‌گیری‌های سه‌بعدی، تأیید کردند که این جریان‌ها نقش عمده‌ای در توزیع شتاب و تنش برشی دارند [۱۲، ۱۳]. در بررسی جریان سه‌بعدی در کانال مستطیلی با قوس ۱۲۰ درجه، پیچیدگی رفتار جریان را با تغییر انحنای مسیر تحلیل شده است [۱۴]. از نظر مدل‌سازی عددی، مقایسه‌ای بین مدل‌های LES و RANS صورت گرفته که دقت بیشتر مدل LES را در پیش‌بینی تنش برشی دیواره‌ها در کانال‌های پیچدار نشان داده است [۱۵]. در پژوهشی دیگر، با استفاده از مدل SSHIM، الگوی جریان در قوس ۱۸۰ درجه شبیه‌سازی و عملکرد مدل‌های مختلف آشفتگی در پیش‌بینی جریان ثانویه بررسی شده است [۱۶].

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، ۱۸، ۱۹، ۲۰، ۲۱]. مطالعات اخیر نیز با تمرکز بر اشکال پایه، راهکارهای کاهش فرسایش و

که در آن $i = 1, 2, 3$ به ترتیب بیانگر جهت جریان، عرضی و عمودی است، $\overline{u_i}$ مؤلفه‌های سرعت میانگین، $\overline{P}$ فشار میانگین، ρ چگالی، μ ویسکوزیته سینماتیکی سیال و τ تنش‌های برشی رینولدز یا تنش‌های زیر شبکه‌ای هستند. معادله بقای مومنتم برای جریان‌های ویسکوز و غیرقابل تراکم به صورت زیر بیان می‌شود (روترو، ۲۰۰۶):

$$\left(\frac{d\overline{u_i}}{dt} + \overline{u_j} \frac{d\overline{u_i}}{dx_j} \right) = \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial x_j} (-P\delta_{ij} - \rho \overline{u_i u_j}), \quad (i, j = 1, 2, 3) \quad (3)$$

که در آخرین عبارت $\rho \overline{u_i u_j}$ تنش رینولدز است که نشان‌دهنده انتقال مومنتم ناشی از آشفتگی است.

$$-\overline{u_i u_j} = \nu_t \left(\frac{\partial \overline{u_i}}{\partial x_j} + \frac{\partial \overline{u_j}}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} K \delta_{ij} \quad (4)$$

در این پژوهش از مدل آشفتگی استاندارد $k-\varepsilon$ استفاده شد. این مدل با وجود سادگی و هزینه محاسباتی پایین، توانایی قابل قبولی در پیش‌بینی 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 $(k-\omega)$ در شرایط مشابه، دقت مناسبی دارد و پایداری عددی بالاتری در حل معادلات جریان فراهم می‌کند. مدل $k-\varepsilon$ مقدار ویسکوزیته آشفتگی را بر اساس انرژی جنبشی آشفتگی k و نرخ اتلاف انرژی ε محاسبه می‌کند:

$$\nu_t = c_\mu' \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (5)$$

که در آن k انرژی جنبشی آشفتگی بوده و به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$K = \frac{1}{2} (\overline{u'^2} + \overline{v'^2} + \overline{\omega'^2}) \quad (6)$$

مدل‌سازی k به صورت زیر صورت می‌گیرد:

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، شکل‌گیری گردابه‌ها و تأثیر آن‌ها بر عمق فرسایش در شرایط پیچیده قوس‌های 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 به‌کار می‌رود. یکی از اهداف آن، تعیین نیروهای ناشی از حرکت سیال و حمل گرما یا ذرات درون آن است. در مدل‌سازی فیزیکی، استفاده از اصل تشابه دینامیکی در بررسی جریان‌های آشفتگی و پدیده فرسایش پیرامون پایه پل امری رایج است. در این تحقیق، شبیه‌سازی‌های عددی با هدف ارزیابی خطاهای حاصل از کاربرد تشابه فرود در مدل‌سازی فیزیکی جریان‌های آشفتگی و فرسایش رسوبات پیرامون پایه پل انجام شده است. طی دهه‌های اخیر، مدل‌های 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 می‌شوند:

$$\frac{\partial \overline{u_i}}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

$$\rho \left(\frac{\partial \overline{u_i}}{\partial t} + \overline{u_j} \frac{\partial \overline{u_i}}{\partial x_j} \right) = - \frac{\partial \overline{P}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\mu \left(\frac{\partial \overline{u_i}}{\partial x_j} + \frac{\partial \overline{u_j}}{\partial x_i} \right) \right] -$$

$$\frac{\partial \rho \overline{u_i' u_j'}}{\partial x_i} \quad (2)$$

متر در بالادست و ۵.۲ متر در پایین دست 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 پلکسی‌گلاس 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 می‌شود. (مسجدی و همکاران ۲۰۱۰). در این تحقیق، مقدار ۱:۱۰ به عنوان حد حداکثری و نسبت ۱:۶.۲۵ 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 به صورت هدفمند و با هدف کاهش تشکیل ریزل 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 $(d_{50} = 1.28mm)$ ، $(d_{84} = 1.65mm)$ ، $(d_{16} = 0.97mm)$ هستند. انحراف معیار دانه‌بندی برابر با ۱.۳ محاسبه شد. پس از انجام آزمایش‌های طولانی‌مدت، ضخامت لایه رسوبی در کل طول کانال برابر با ۲۰ سانتی‌متر تثبیت شد.

شکل ۲ ویژگی‌های کانال آزمایشگاهی را نشان می‌دهد. همچنین ویژگی‌های هیدرولیکی آزمایش‌ها نیز در جدول ۱ آورده شده‌اند. برای اندازه‌گیری سرعت جریان از دستگاه ADV مدل Vectrino (Nortek) استفاده شد که داده‌های سه‌بعدی سرعت را در نقاط مختلف مقطع ثبت می‌کرد. عمق جریان با استفاده از خط‌کش فلزی مدرج با دقت یک میلی‌متر اندازه‌گیری شد. همچنین برای برداشت پروفیل

$$\frac{Dk}{Dt} = P_k - \varepsilon + \text{diffusion terms} \quad (7)$$

و نرخ اتلاف انرژی به صورت زیر بیان می‌شود:

$$\frac{D\varepsilon}{Dt} = C_{\varepsilon 1} \frac{\varepsilon}{K} P_K - C_{\varepsilon 2} \frac{\varepsilon^2}{K} + \text{diffusion terms} \quad (8)$$

مقادیر تجربی ثابت‌ها به شرح زیرند (اسپالدینگ و لندر، ۱۹۷۴):

$$\sigma_\varepsilon = 1.3 \text{ و } \sigma_K = 1 \text{ و } C_{\varepsilon 2} = 1.92 \text{ و } C_{\varepsilon 1} = 1.44 \text{ و } C_\mu = 0.09$$

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:

$$k = \frac{\tau}{\rho \sqrt{C_\mu}} \quad (9)$$

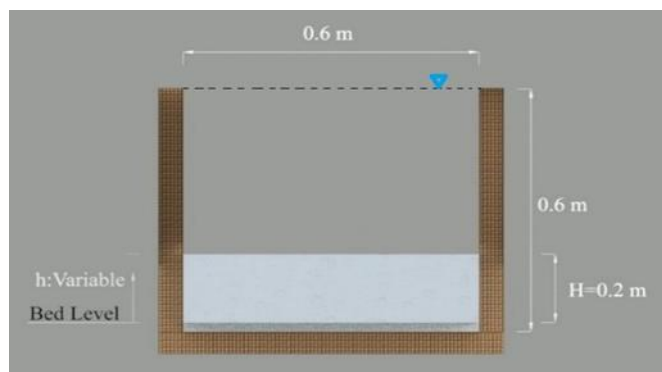
سپس با داشتن k و V_t ، مقدار ε نیز محاسبه می‌شود. در مرز خروجی، شرط گرادیان صفر اعمال می‌گردد. سطح آزاد آب با استفاده از روش (سطح درسته ثابت) محاسبه شده و موقعیت آن با استفاده از معادله برنولی تعیین می‌گردد. شرط مرزی بستر و دیواره‌های سخت نیز از قانون دیواره اشلیختینگ (۱۹۷۹) پیروی می‌کند:

$$U^+ = \frac{1}{k} \ln \left(\frac{y^+}{k_s^+} \right) \quad (10)$$

که در آن U^+ سرعت اصطکاکی، U سرعت در مرکز سلول نزدیک‌ترین 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



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

جدول ۱. ویژگی‌های هیدرولیکی آزمایش‌ها

ردیف	دبی ورودی (Q)(lit/s)	سرعت جریان ورودی (V) (m/s)	عدد فرود (Fr)	عدد رینولدز (Re)
۱	۳۰	۰.۲۵	۰.۱۸	۵۰۰۰
۲	۳۵	۰.۲۹۲	۰.۲۱	۵۸۴۰
۳	۴۰	۰.۳۳۳	۰.۲۴	۶۶۶۰
۴	۴۲	۰.۳۵۰	۰.۲۵	۷۰۰۰

۳-۲. مدل عددی و روند تحلیل

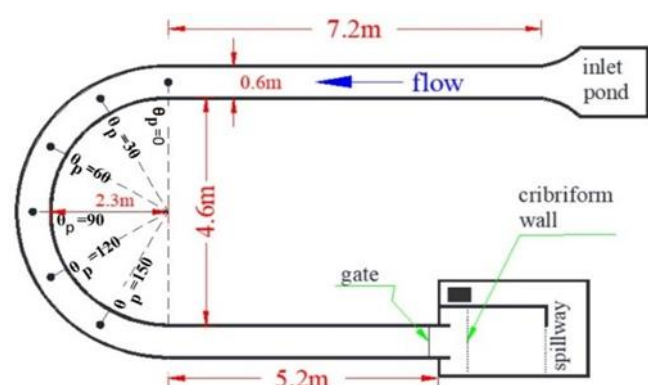
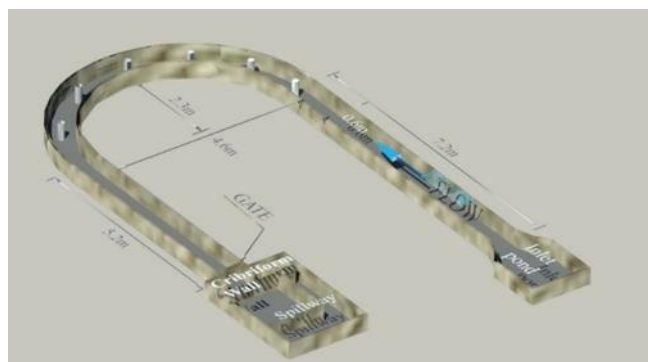
در این پژوهش، از روش عددی حجم محدود (FVM) برای شبیه‌سازی عددی جریان استفاده شده است. این روش یکی از تکنیک‌های متداول در دینامیک سیالات محاسباتی (CFD) است که با استفاده از آن، معادلات ناویر-استوکس میانگین‌گیری شده به منظور مدل‌سازی جریان‌های آشسته پیرامون پایه در قوس کانال حل می‌شود. نرم‌افزار Fluent به عنوان بستر عددی انتخاب و برای شبیه سازی جریان در قوس ۱۸۰ درجه به کار گرفته شده است.

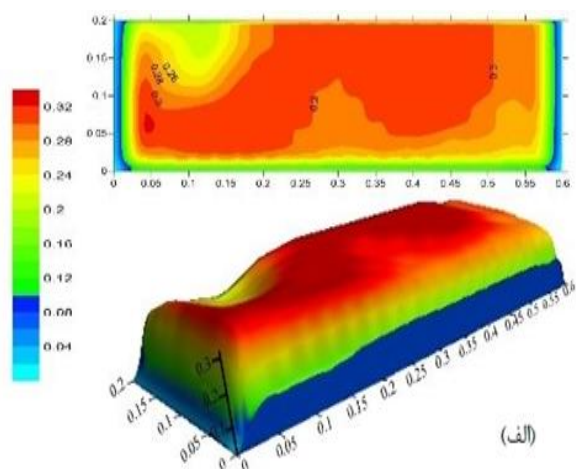
۳-۲-۱. مقایسه نتایج عددی و مدل آزمایشگاهی

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

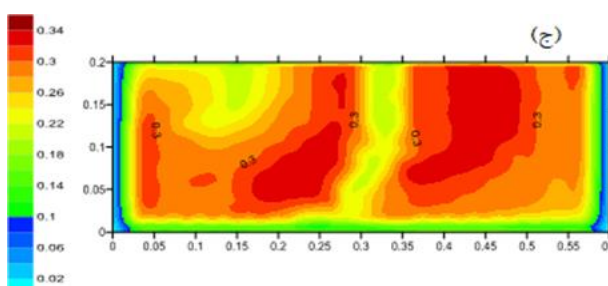
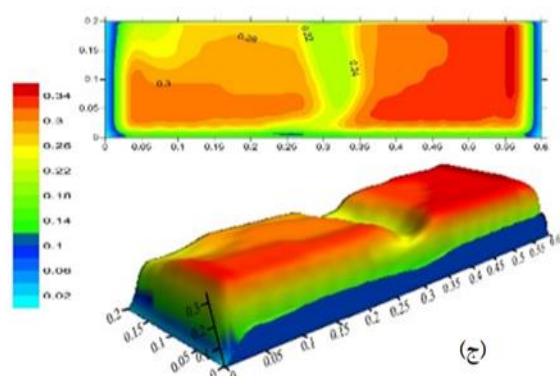
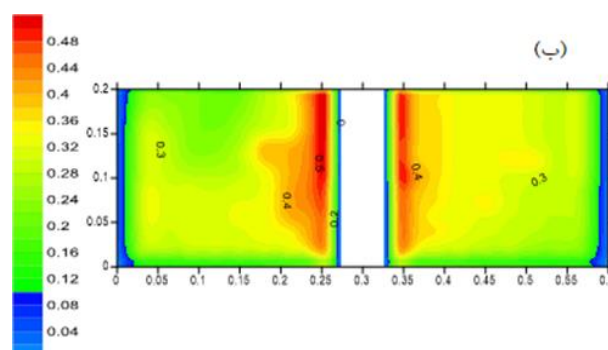
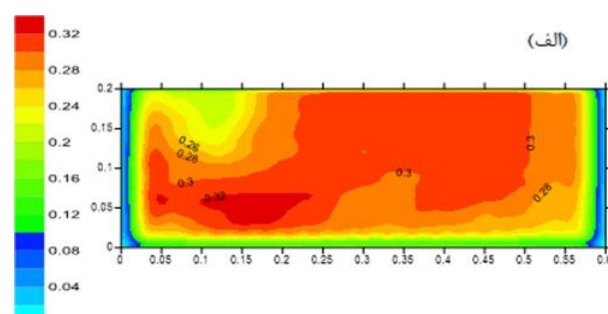
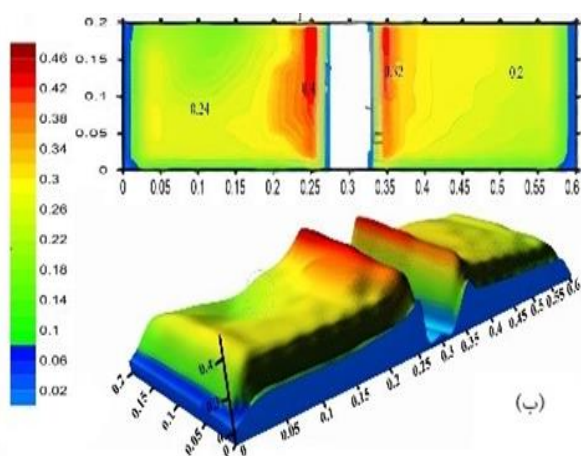
فرسایش، از یک پروفیل بردار مکانیکی ریلی با دقت یک میلی‌متر استفاده گردید که با حرکت خطی روی ریل در امتداد طول کانال، تغییرات سطح بستر را در فواصل ۵ سانتی‌متری ثبت می‌کرد.

در شبیه‌سازی 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 لایه‌های مرزی با رشد تدریجی استفاده شد. گام زمانی مدل برابر با ۰.۰۱ ثانیه در نظر گرفته شد و شرط همگرایی برای معادلات پیوستگی و مومنتم، مقدار باقیمانده کمتر از 10^{-5} تعیین گردید. برای اطمینان از بی‌تأثیری 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، نشان‌دهنده استقلال نتایج از اندازه شبکه بود.



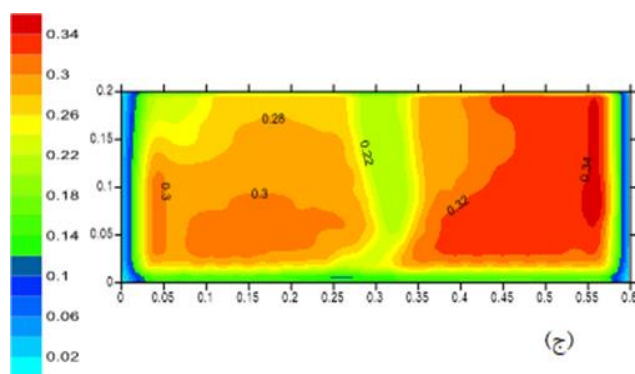
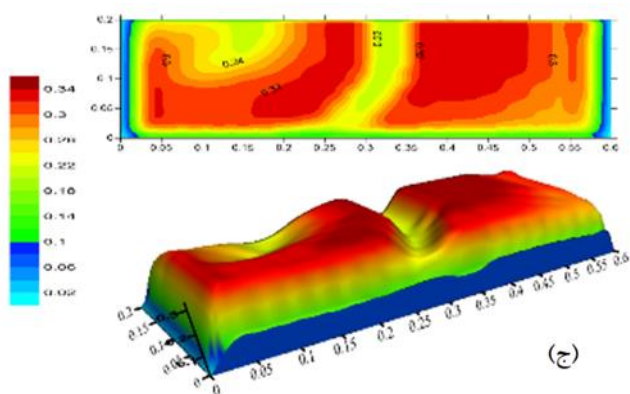
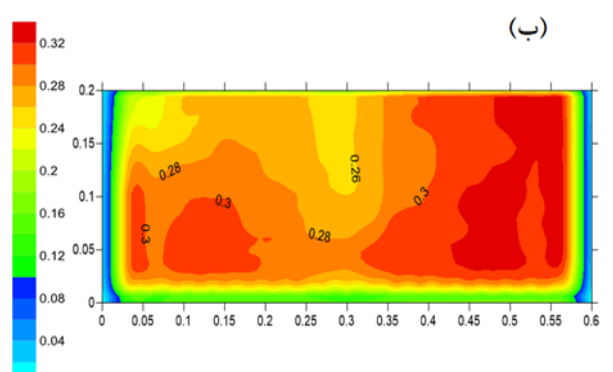
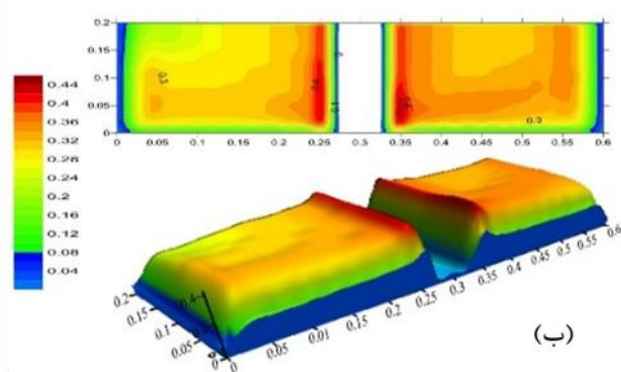
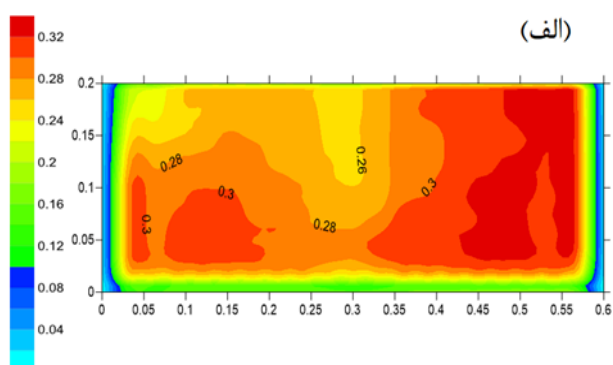
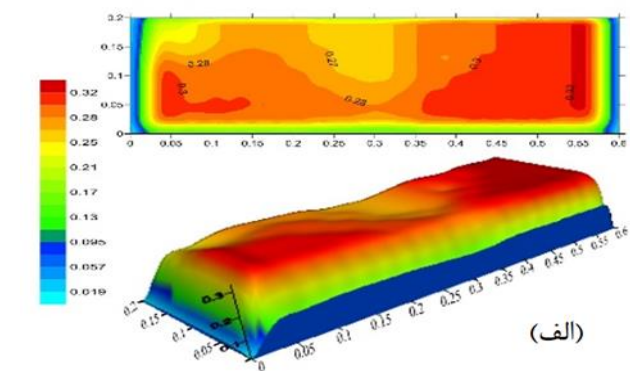


پایه را در زوایای ۶۰ و ۱۵۰ درجه نمایش می‌دهند. در این پژوهش، به‌منظور تحلیل موقعیت نسبی مقاطع مختلف نسبت به محل پایه، پارامتر θ_p تعریف شده است، که در آن زاویه موقعیت مقطع مورد نظر در قوس و θ_p زاویه استقرار پایه در قوس (بر حسب درجه) می‌باشد. پایه‌ها در زوایای ۰، ۳۰، ۶۰، ۹۰، ۱۲۰ و ۱۵۰ نسبت به مرکز قوس 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 به‌صورت آزمایشگاهی و عددی نمایش می‌دهند.



شکل ۴. نتایج مدل عددی 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 پایه

شکل ۳. 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 پایه

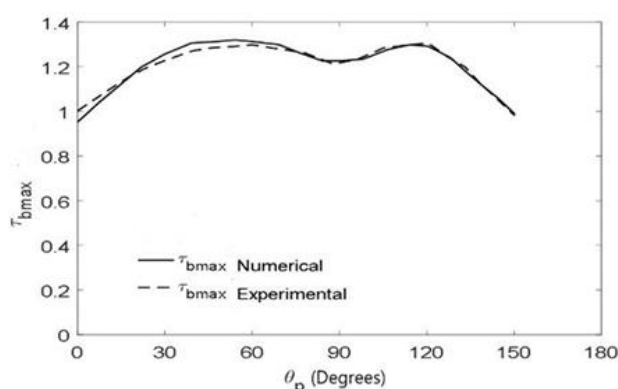


شکل ۶. نتایج مدل عددی مربوط به الگوی جریان پایه پل در موقعیت ۱۵۰ درجه: (الف) قبل از پایه، (ب) در محل پایه، (ج) بعد از پایه

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

۴-۲. 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 می‌تواند 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 نشان‌دهنده عدم تفاوت معنی‌دار میان دو مجموعه داده بود. $P\text{-value} > 0.05$ 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 آماری Mann-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 نشان‌دهنده 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 پایین تنش برشی در این زاویه با کاهش قابل توجه آبشستگی موضعی همراه بوده است.

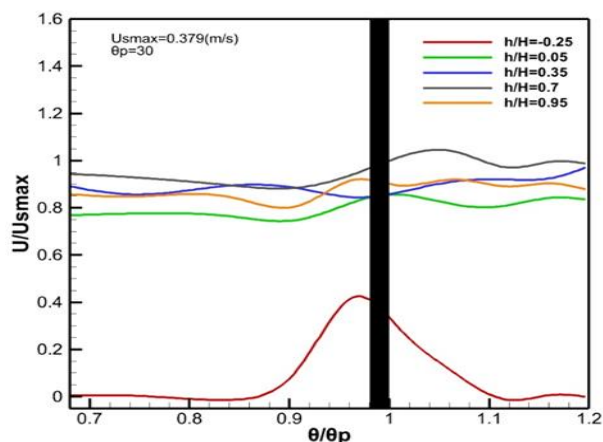


شکل ۷. حداکثر تنش برشی در مجاورت پایه در شرایط مختلف

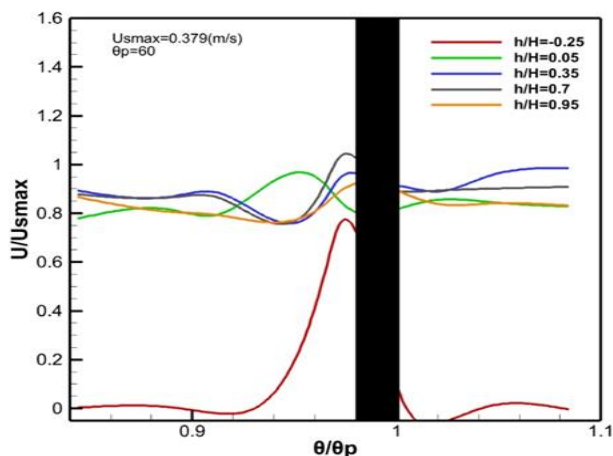
۵-۲. مسیر سرعت حداکثر

شکل ۸ موقعیت حداکثر سرعت جریان را در محل قوس نشان می‌دهد. دبی و عمق جریان به ترتیب ۳۰ لیتر بر ثانیه و ۰.۲ متر است. حداکثر سرعت در طول مسیر برای هر یک از پایه‌ها در شکل‌های بعدی به طور جداگانه ارائه شده است. با ورود جریان به داخل قوس به تدریج سرعت حداکثر به دلیل جریان ثانویه خم به دیواره خارجی منتقل می‌شود و در مقطع $\theta_p = 70$ درجه به دیواره بیرونی نزدیک می‌شود و سپس موقعیت آن تا انتهای قوس ثابت می‌ماند. با ورود جریان به قوس، مسیر حداکثر سرعت به تدریج به سمت دیواره بیرونی منتقل می‌شود. در مقاطع انتهایی قوس، با مقایسه پروفیل‌های عمودی سرعت در دو مقطع متوالی مشاهده شد که تغییرات بین آن‌ها کمتر از ۵٪ است. این پایداری در الگوی سرعت نشان‌دهنده رسیدن جریان به حالت «کاملاً توسعه‌یافته» است.

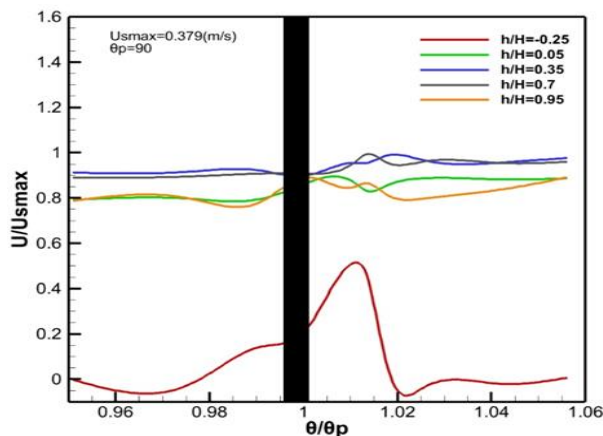
در این تحقیق، معیار توسعه‌یافتگی جریان، ثبات نسبی پروفیل سرعت و کاهش تغییرات عرضی آن در طول مسیر در نظر گرفته شده است. در انتهای قوس، جریان به وضعیت نیمه پایدار یا تقریباً پایدار در بخش انتهایی قوس می‌رسد. در موقعیت $\theta_p = 30$ درجه حداکثر سرعت جریان در ناحیه نزدیک به دیواره داخلی نسبت به سایر موقعیت‌ها بیشتر مشاهده شد. این موقعیت بیشترین تأثیر 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 می‌گذرد. در موقعیت ۶۰ درجه، جریان ثانویه به حداکثر می‌رسد. بنابراین جریان ثانویه بر حداکثر سرعت مسیر و افزایش سرعت در اطراف پایه‌ها تأثیرگذار 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 اندازه‌گیری 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 می‌شود. نتایج نشان می‌دهد که جریان ثانویه کمی قوی‌تر از مقطع ۹۰ درجه است. در نهایت می‌توان 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.



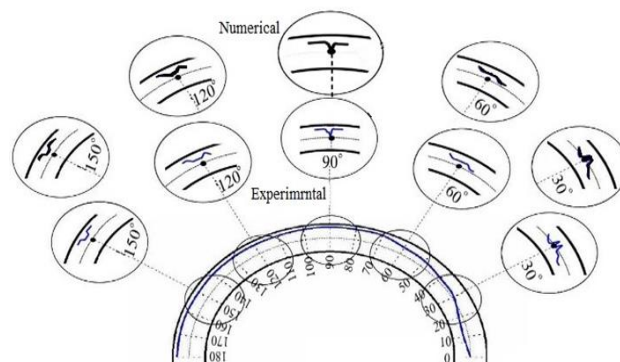
(الف) موقعیت ۳۰ درجه



(ب) موقعیت ۶۰ درجه

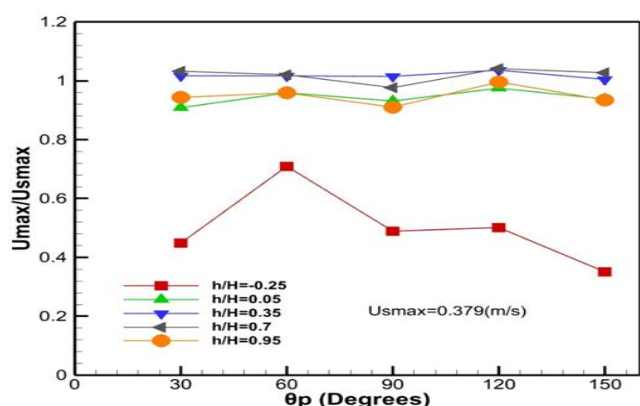


(ج) موقعیت ۹۰ درجه

شکل ۸. مقایسه موقعیت سرعت حداکثر مسیر نزدیک به سطح آب $h/H = 0.95$ در دو شرایط با پایه و بدون پایه

۲-۶. حداکثر سرعت جریان در اطراف پایه‌ها

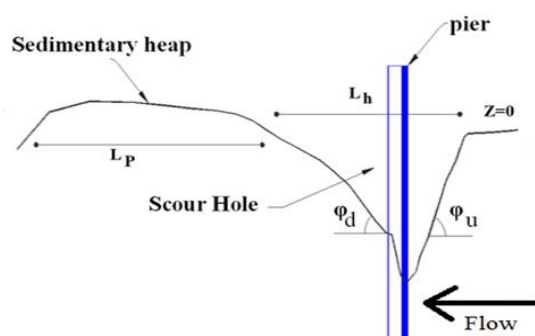
شکل ۹ حداکثر سرعت جریان را در سطوح مختلف عمقی و مقاطع متنوع، متناسب با موقعیت‌های مختلف پایه در قوس کانال نمایش می‌دهد. به‌طور خاص، این نمودارها حداکثر سرعت جریان در زاویه ۹۰ درجه و در تراز عمقی $h/H = 0.07$ را نشان می‌دهند، که مقدار آن برابر با ۰.۳۷۹ متر بر ثانیه اندازه‌گیری شده است. در تصاویر (الف) تا (ه)، 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 می‌شود. 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 می‌رسد. در شکل ۹(الف)، بیشینه سرعت در نزدیکی سطح آب مشاهده می‌شود، در حالی که با نزدیک شدن به پایه، اختلاف بین سرعت در نزدیکی سطح و بستر کاهش می‌یابد. در شکل ۹(ب)، بیشینه سرعت به سطح نزدیک بستر منتقل شده است. شکل ۹(ج) نشان‌دهنده وقوع حداکثر سرعت در ناحیه میانی عمق جریان است، و در شکل ۹(د)، این بیشینه مجدداً به ناحیه سطحی متمایل است. نهایتاً، در شکل ۹(ه)، بیشترین سرعت در نزدیکی بستر ثبت شده است، که این پدیده می‌تواند عاملی مؤثر در تشدید فرسایش موضعی در این ناحیه باشد.



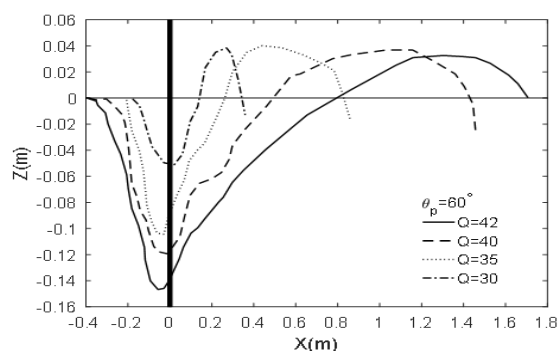
شکل ۱۰. نسبت حداکثر سرعت جریان در هر موقعیت پایه پل به حداکثر سرعت جریان در مسیر مستقیم در سطوح مختلف

۳. شکل گیری حفره آبشستگی

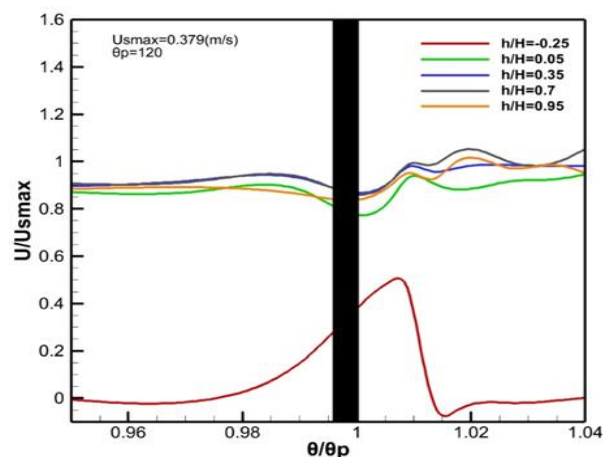
پارامترهای اصلی مورد نیاز برای محاسبه ی ابعاد حفره ی آبشستگی در شکل ۱۱ نشان داده شده اند.



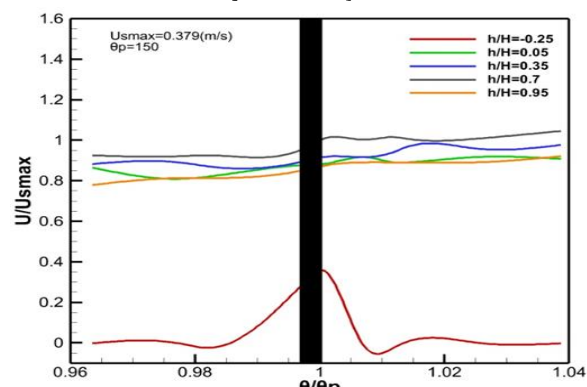
(الف)



(ب)



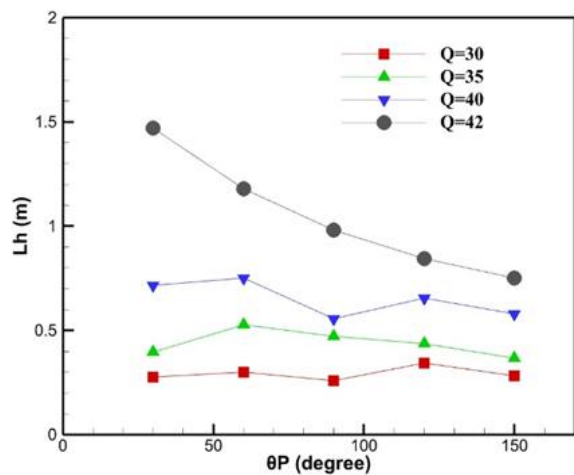
(د) موقعیت ۱۲۰ درجه



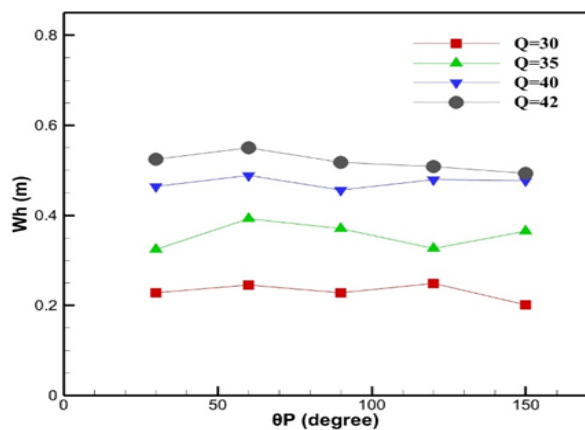
(ه) موقعیت ۱۵۰ درجه

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

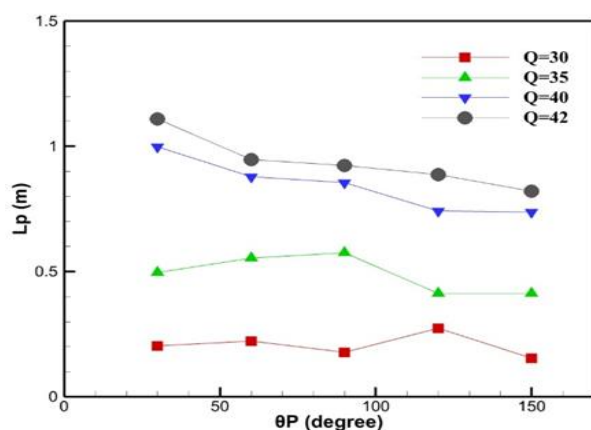
شکل ۱۰ نسبت حداکثر سرعت جریان در موقعیت های مختلف پایه را نسبت به حداکثر سرعت جریان در مسیر مستقیم، در ترازهای مختلف، نمایش می دهد. به طور کلی، تفاوت قابل توجهی میان حداکثر سرعت جریان در مقاطع مستقیم و قوسی مشاهده نمی شود. موقعیت عمقی محل وقوع حداکثر سرعت جریان می تواند به عنوان یکی از عوامل مؤثر در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



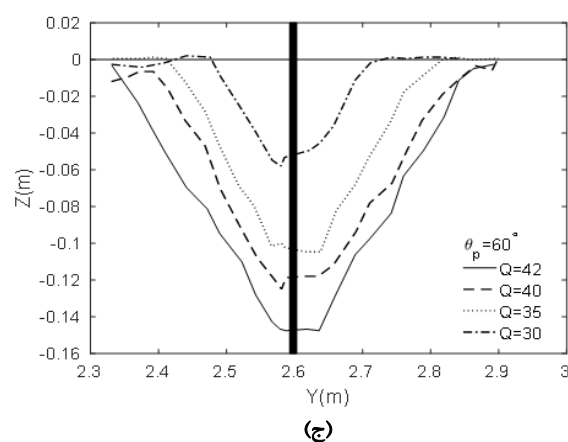
(الف)



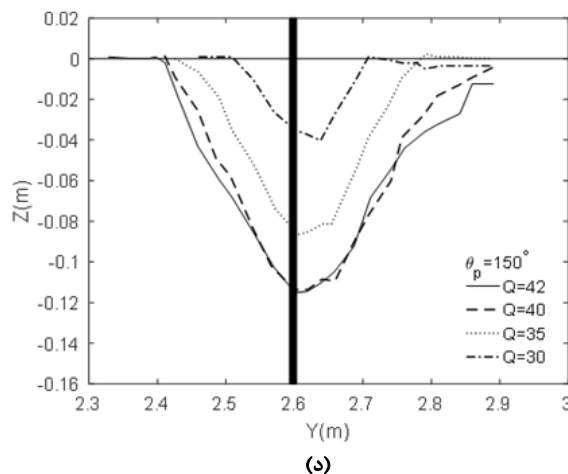
(ب)



(ج)



(د)

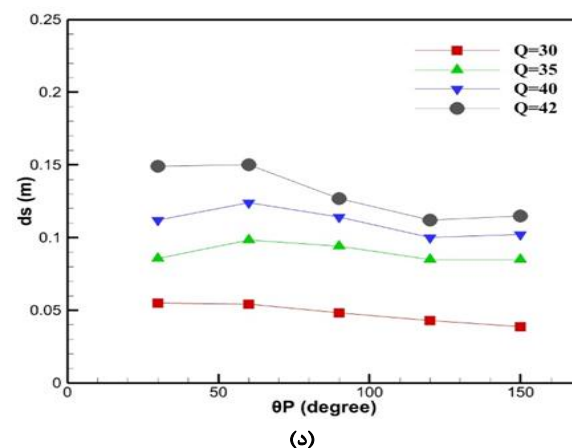


(د)

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.

سرعت جریان در اطراف آن می‌شود، هرچند این تأثیر بیشتر به صورت موضعی بوده و الگوی کلی جریان را به طور 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 توزیع سرعت و تنش برشی در اطراف پایه همخوانی دارد. همچنین مشخص شد که در موقعیت‌هایی با بیشینه تنش برشی، عمق و طول حفره آبشستگی به طور معناداری افزایش می‌یابد و بیشینه عمق معمولاً در نیمه اول قوس دیده می‌شود. مقایسه نتایج عددی 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 به عنوان بازه‌های مناسب برای نصب پایه پیشنهاد می‌شوند، در حالی که موقعیت بین ۳۰ تا ۹۰ درجه بیشترین پتانسیل فرسایش موضعی را دارد. این نتایج می‌توانند به عنوان مبنایی برای بهینه‌سازی مکان‌یابی پایه پل‌ها در مسیرهای قوسی، به‌ویژه در طراحی‌هایی با هدف کاهش خطر فرسایش موضعی، مورد استفاده قرار گیرند.



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 می‌دهد. مطابق این نتایج، بیشترین طول حفره در نیمه اول قوس کانال مشاهده می‌شود، در حالی که کمترین مقدار آن در مسیر مستقیم ($\theta_p = 0^\circ$) ثبت شده است. در دبی‌های پایین، مقادیر L_h در موقعیت‌های مختلف تفاوت چشمگیری ندارند، اما در دبی ۴۲ لیتر بر ثانیه، آستانه‌ی حرکت رسوبات در قوس ایجاد شده و افزایش قابل توجهی نسبت به دبی ۴۰ لیتر بر ثانیه مشاهده می‌شود. نمودارهای شکل ۱۳ (ب)، (ج) و (د) نیز همین روند افزایشی را برای پارامترهای W_h ، d_s و L_p تأیید می‌کنند.

۴. نتیجه گیری

در این پژوهش، تأثیر موقعیت زاویه‌ای پایه پل بر الگوی فرسایش موضعی در قوس ۱۸۰ درجه یک کانال با بهره‌گیری 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

- [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\(186\)](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\(184\)](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](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](https://doi.org/10.1016/S1644-9665(12)60051-X)
- [16] Ghobadian R, Mohammadi K (2011) Simulation of subcritical flow pattern in 180° uniform 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) Three-dimensional 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\(1048\)](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\(531\)](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 sediment-embedded bridge piers. *Experiments in Fluids*. 42: 1–19. <https://doi.org/10.1007/s00348-006-0209-7>
- [8] Kumar, A., Kothiyari, 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\(154\)](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
- [26] Mansouri, A.R. (2006) 3-D Numerical Simulation of Bed Changes in 180 Degree Bends. M.S. Thesis, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran.