

A comprehensive review of bridge pier scouring: Analysis of mechanisms and flow patterns, key factors, challenges, and protective measures

Elham Ghanbari Adivi^{*1} and Mohammad Khosravi Hamole²

Extended Abstract

Introduction

Bridge pier scour is recognized as one of the most significant hydraulic challenges in the design, operation, and maintenance of bridge structures. It arises from the complex interplay between flow dynamics, alluvial bed characteristics, and pier geometry. Scour occurs when alterations in flow patterns and increased bed shear stress lead to sediment erosion, ultimately compromising structural stability. In recent decades, the growing body of research on localized pier scour underscores its critical importance in mitigating both structural and environmental risks. Despite considerable advancements in numerical, experimental, and analytical modeling, significant uncertainties persist in predicting scour depth and extent. This study aims to provide a comprehensive review of the physical mechanisms governing scour, identify key influencing factors, and evaluate both structural and non-structural mitigation strategies. The current research establishes a scientific framework for scour prediction, management, and mitigation. By examining flow behavior around piers, sediment characteristics, and the application of numerical and artificial intelligence models, this framework enhances the safety and longevity of bridge infrastructure under variable hydrological conditions.

Materials and Methods

This article employs a systematic review and analytical approach to examine bridge pier scour from the perspectives of physical mechanisms, influencing parameters, and mitigation strategies. Initially, the theoretical foundations and classifications of scour types (including general, local, and combined scour) were synthesized from peer-reviewed literature. Subsequently, flow patterns around piers were analyzed using experimental data and numerical simulations (CFD and two-phase models) to elucidate the formation of vortices, wake currents, and flow separation zones. The influence of hydraulic parameters (e.g., flow velocity, water depth, Froude number) and sediment properties (e.g., density, grain size, cohesion) was evaluated through a comprehensive review and categorization of empirical data from prior studies. In the second phase, scour mitigation techniques were compared across two primary categories: “bed armoring” (e.g., riprap, gabions, and articulated concrete block mats) and “flow alteration measures” (e.g., collars, sacrificial piles, and submerged vanes). These approaches were assessed based on hydraulic efficiency, implementation cost, and long-term durability. Scour prediction methodologies—including empirical equations, single-phase and two-phase CFD models, Smoothed Particle Hydrodynamics (SPH), and machine learning algorithms—were comparatively evaluated to determine their accuracy, advantages, and limitations. Additionally, global case studies were reviewed to assess climatic and geomorphological impacts on scour behavior. The review follows a structured methodological framework comprising the following stages: (1) Literature collection and screening: Relevant studies were retrieved from reputable scientific databases using targeted keywords and filtered according to predefined inclusion criteria. (2) Thematic classification: Extracted literature was categorized into core themes (flow dynamics, influencing factors, mitigation strategies, predictive modeling, and future research directions). (3) Synthesis and critical analysis: Findings from diverse studies were analyzed to identify consensus, discrepancies, and overarching trends, which were then integrated into the article’s conceptual framework. (4) Comparative evaluation: Mitigation and modeling techniques were benchmarked against key parameters, including efficiency, cost-effectiveness, structural stability, and environmental impact. (5) Identification of research gaps: The final section outlines critical knowledge gaps and future research needs, providing a forward-looking perspective on the field.

1-Associated Professor of the Department of Water Science, Shahrood University, Shahrood, Iran.

2- M.Sc. Student, Department of Water Science, Shahrood University, Shahrood, Iran.

*Corresponding Author: ghanbariadiivi@sku.ac.ir

Received: 2026/01/26

Accepted: 2026/06/14

Results and Discussions

Comprehensive analysis of bridge pier scour mitigation techniques revealed that no single measure can entirely eliminate scour. However, a strategically selected combination of methods, tailored to site-specific hydraulic conditions, sediment characteristics, and economic constraints, can substantially reduce maximum scour depth. Integrating flow alteration techniques with bed armoring proves to be the most effective strategy. Among bed armoring solutions, riprap (particularly when installed in sloped configurations) can achieve scour reductions exceeding 80%. Articulated concrete blocks and gabions also serve as viable alternatives, albeit with certain design and maintenance limitations. According to the analysis in the category of flow alteration measures, submerged vanes demonstrated scour depth reductions approaching 88%, while slots achieved reductions of 30–40%, depending on their geometric configuration. Sacrificial piles, despite requiring periodic replacement, reduce scour depth by up to 50%. The efficacy of collars is highly geometry-dependent: conventional collars exhibited limited performance, whereas modified designs incorporating fins, hooks, or polygonal shapes yielded reductions of 50–73%. Advanced configurations, such as lenticular or airfoil collars, showed highly variable effectiveness contingent upon specific design parameters. Pervious collars, which guide flow through controlled permeability, achieved approximately 78% scour reduction. Furthermore, bed regulation structures like sills and curved plates dissipate incoming flow energy, resulted in 30–55% reductions and enhanced cross-sectional stability. Ultimately, the synergistic integration of flow alteration and bed armoring techniques represented the optimal mitigation approach. Optimal design must account for local hydraulic conditions, sediment properties, flow intensity, and maintenance requirements to ensure both scour control and long-term structural and economic viability. In terms of predictive modeling, comparative analysis indicated that two-phase CFD models, particularly those utilizing an Eulerian–Lagrangian framework, offered superior accuracy in simulating scour initiation and evolution, despite higher computational demands. The SPH method has also demonstrated enhanced capability in capturing complex vortex dynamics compared to conventional grid-based approaches. Meanwhile, machine learning models (such as artificial neural networks and random forest algorithms) trained on extensive experimental datasets, exhibit strong potential for rapid, real-time scour depth estimation in practical engineering applications.

Conclusion

Bridge pier scour is a complex, multi-factorial phenomenon driven by the dynamic interaction between flow hydrodynamics, pier geometry, and bed sediment properties. The integration of advanced numerical modeling, data-driven predictive tools, and site-specific mitigation strategies enables effective scour management in bridge engineering. Developing a systematic framework for selecting countermeasures—based on hydraulic performance, long-term stability, and cost-effectiveness—represents a critical step toward enhancing the safety, durability, and environmental resilience of bridge infrastructure. Future research should prioritize investigating bridge vulnerability under climate change scenarios and extreme flood events to improve adaptive design practices.

Keywords: Local scour, flow pattern, bridge pier, scour prediction models, scour management, machine learning.

Citation:

Ghanbari Adivi.E., Khosravi Hamole.M., 2026. A comprehensive review of bridge pier scouring: Analysis of mechanisms and flow patterns, key factors, challenges, and protective measures. *Iranian Water Research Journal*, 20(62), pp. 15-54.
<https://dx.doi.org/10.22034/iwrj.2026.14891.2628>

Copyright: © Authors, Published by Iranian Water Research Journal. This is an open-access article distributed under the CC-BY 4.0 (license <http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)



مروری جامع بر آبشستگی پایه پل: تحلیل مکانیسم‌ها و الگوی جریان، عوامل کلیدی، چالش‌ها و راهکارهای حفاظتی

الهام قنبری عدیوی^{۱*}، محمد خسروی حموله^۲

چکیده

آبشستگی موضعی اطراف پایه پل به عنوان یک چالش بزرگ مهندسی هیدرولیک در جهان مطرح است که منجر به کاهش پایداری سازه، تهدید ایمنی و یا ایجاد خسارات اقتصادی قابل توجه می‌شود. این مطالعه اصول، سازوکارها و جنبه‌های مدیریتی پژوهش‌های کاهش و مدیریت آبشستگی پایه پل را به طور جامع بررسی می‌کند. محور اصلی این بررسی، تبیین الگوی جریان، فرایندهای ایجاد و گسترش آبشستگی اطراف پایه‌ها و تأثیر پارامترهای کلیدی مانند سرعت و عمق جریان، اشکال هندسی پایه، دانه‌بندی و خواص رسوبی است تا یک درک منسجم از فرایندهای آبشستگی ارائه شود. نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که تحلیل دقیق این پدیده بدون در نظر گرفتن مورفولوژی رودخانه، تغییرات بستر و رژیم رسوبی می‌تواند به خطا در پیش‌بینی و انتخاب روش حفاظتی منجر شود. در کنار این موضوع، برداشت شن و ماسه در رودخانه‌های ایران به عنوان عاملی مهم در تشدید افت بستر و افزایش آبشستگی معرفی می‌شود. این پژوهش نقاط قوت، محدودیت‌ها و چالش‌های عملی-اقتصادی دو رویکرد اصلی در کنترل این پدیده را توضیح می‌دهد، رویکرد افزایش مقاومت بستر در برابر جریان و رویکرد اصلاح میدان جریان. رویکرد نخست با مصالح مقاوم همچون سنگ‌چین، گابیون، کیسه‌های ژئوتکستایل پر از شن، حفاظت با سنگ و ملات، تشک‌های بتنی مفصلی و صخره‌های مصنوعی سروکار دارد. رویکرد دوم به چگونگی به کارگیری سازه‌ها برای تغییر یا کنترل میدان جریان مانند طوق‌ها، شکاف‌های اسکله، شمع‌های قربانی، صفحات مستغرق و آستانه‌ها می‌پردازد. همچنین در ادامه مدل‌های پیش‌بینی آبشستگی پایه پل شامل مدل‌های تک‌فازی و دوفازی مبتنی بر دینامیک سیالات محاسباتی و روش‌های SPH، معادلات آبشستگی و مدل‌های یادگیری ماشین بررسی می‌شوند. محدودیت‌های آزمایشگاهی و میدانی، عدم قطعیت‌ها و نیاز به بهبود مدل‌سازی یادآوری شده و سپس فرصت‌های آتی با توجه به پیچیدگی موضوع مطرح می‌شود.

واژه‌های کلیدی: آبشستگی موضعی، الگوی جریان، پایه پل، مدل‌های پیش‌بینی آبشستگی، مدیریت آبشستگی، یادگیری ماشین.

ارجاع: قنبری عدیوی^۱، خسروی حموله^۲، ۱۴۰۵. مروری جامع بر آبشستگی پایه پل: تحلیل مکانیسم‌ها و الگوی جریان، عوامل کلیدی، چالش‌ها و راهکارهای حفاظتی. مجله پژوهش آب ایران، ۲۰(۶۲)، صص. ۱۵-۵۴. <https://dx.doi.org/10.22034/iwrj.2026.14891.2628>

۱- دانشیار گروه مهندسی آب دانشکده کشاورزی دانشگاه شهرکرد.

۲- دانشجوی کارشناسی ارشد گروه مهندسی آب دانشکده کشاورزی دانشگاه شهرکرد

* نویسنده مسئول: ghanbariadi@sku.ac.ir

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۲/۲۴

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۱۱/۰۶

۱- مقدمه

پل‌ها به منظور ارتباط کارآمد بین دو سوی رودخانه و دارایی‌های زیرساختی حیاتی از منظر اقتصادی و سیاسی ساخته می‌شوند و با رژیم جریان رودخانه در تعامل می‌باشند (Sholtes et al., 2017). در دوره عمر پل‌ها، تغییرات در رژیم جریان و رسوب و نیز بارگذاری‌های متغیر یا تخریب خاک فونداسیون می‌تواند منجر به خرابی یا فروپاشی سازه شود (Lee et al., 2020; Gilja et al., 2011). خسارت‌های اقتصادی ناشی از اختلال ترافیک پس از خرابی پل از ارزش ساخت آن فراتر می‌رود و پل‌ها را به دارایی‌های حیاتی زیرساختی تبدیل می‌کند (Bento et al., 2020; Badir et al., 2026).

آبشستگی به عنوان یک فرایند فرسایشی طبیعی زمانی رخ می‌دهد که نیروی محرک جریان آب از وزن ذرات بستر بیشتر شده و باعث جدا شدن و انتقال مواد از بستر و کناره‌های رودخانه گردد. در نتیجه‌ی این فرسایش، فرو رفتگی در بستر ایجاد می‌شود (چاله آبشستگی). این پدیده و فرآیندهای همراه آن در اطراف فونداسیون سازه‌های هیدرولیکی و دریایی از عوامل اصلی ناپایداری سازه و بروز خسارت محسوب می‌شوند (Zhao, 2022; Bento et al., 2020, 2024). آبشستگی پایه پل به کاهش ارتفاع بستر رودخانه در محدوده اطراف پایه اشاره دارد و در اثر فرسایش ناشی از جریان آب رخ می‌دهد؛ فرسایشی که با حفاری و انتقال رسوبات، در نهایت می‌تواند به تخریب کامل پل منجر شود (Baranwal et al., 2021; Sheppard et al., 2023a). نتایج پژوهش‌ها بیانگر آن است که آبشستگی ناشی از سیل و سایر شرایط هیدرولیکی مسئول بیش از نیمی از خرابی‌های پل‌ها در سراسر جهان است (Schaap and Caner, 2022; Ghanbari-Adivi and Kashfi-pour, 2016). در مهندسی هیدرولیک، آبشستگی موضعی پیرامون پایه‌های پل یک معضل جهانی محسوب می‌شود که با تضعیف پایداری سازه، ایمنی عمومی را تهدید کرده و خسارات اقتصادی قابل توجهی به همراه دارد (Deng et al., 2016; Liang et al., 2020).

خسارت ناشی از آبشستگی پایه‌های پل، از جمله تلفات انسانی و هزینه‌های مالی قابل توجه، اهمیت حفاظت مؤثر از این پدیده را مشخص می‌کند. برآوردها نشان می‌دهد از ۱۹۵۰ تاکنون بیش از ۵۰۰ پل در ایالات متحده به دلیل آبشستگی و مشکلات هیدرولیکی تخریب شده‌اند (Huber, 1991; Prendergast and Gavin, 2014). در نیوزیلند در دوره ۱۹۶۰ تا ۱۹۸۴ از ۱۰۸ مورد خرابی پل، ۲۹ مورد ناشی از آبشستگی پایه بود (Melville, 1992). داده‌های جهانی نشان می‌دهد که حدود

۶۰ درصد فروپاشی‌های پل‌ها به دلیل آبشستگی یا مسائل هیدرولیکی است (Geo-Institute, 2009). نمونه‌های برجسته خرابی‌ها در ایالات متحده، اروپا و آسیا در بازه‌های مختلف گزارش شده‌اند و در ایران و هند نیز آثار مخرب آبشستگی قابل توجه است (Maddison, 2012; Lad et al., 2022; Mathew et al., 2022; Vasudeva, 2023). به طوری که در سیلاب سال ۱۳۹۸ در ایران به ۵۸۰ پل آسیب وارد شد و منجر به ۲۷۰ میلیارد تومان خسارت شد. در جدول ۱ جزئیات خسارات و تخریب پل‌ها به نقل از مقالات در اثر آبشستگی آمده است.

جدول ۱- جزئیات خسارات و تخریب پل‌ها در اثر آبشستگی

منبع	جزئیات تخریب پل بر اثر آبشستگی
Wang et al., (2019)	تخریب ۴۶ پل از ۸۶ پل به دلیل آبشستگی
Froehlich, (2013)	خسارت آبشستگی ناشی از سیل‌های بزرگ به ازای هر رویداد، بالغ بر ۱۰۰ میلیون دلار بوده است
Shahriar et al., (2021)	آبشستگی ناشی از سیل به بیش از ۲۵۰۰ پل آسیب رساند
Wardhana and Hadipriono, (2003)	بیش از ۲۵۰ پل به دلیل سیل و آبشستگی در ۵۰۰ مورد از آسیب‌های پل، تخریب شدند
Prendergast and Gavin, (2014)	امواج و آبشستگی اطراف پایه، ۲۰ پل را فرو ریخت و خسارتی بالغ بر ۲۰ میلیون دلار به بار آورد
Li et al., (2017)	۲۲ پل از ۲۸ پل، به دلیل آبشستگی در طول یک رویداد سیل، آسیب دیدند و هزینه‌های تعمیر آن‌ها بیش از ۸ میلیون دلار بود

آبشستگی موضعی پیرامون پایه‌های پل در اثر جریان آب در اطراف پایه ایجاد شده و با فرسایش مصالح بستر، پایداری فونداسیون را کاهش می‌دهد. شدت آن با افزایش سرعت جریان یا فرسایش پذیری بیشتر مصالح بستر افزایش می‌یابد، از این رو کنترل و کاهش آبشستگی برای حفظ دوام و ایمنی پل‌ها ضروری است (Pandey et al., 2022). روش‌های مقابله با آبشستگی به دو دسته کلی اقدامات سازه‌ای و غیرسازه‌ای تقسیم می‌شوند (Akhlaghi et al., 2020; Pandey et al., 2022). اقدامات سازه‌ای شامل به کارگیری مصالح یا سازه‌های فیزیکی مانند سنگ چین، سبدهای گابیونی، تزریق دوغاب، طوق‌های ضد آبشستگی و شمع‌ها است که با افزایش پایداری بستر، تغییر الگوی جریان و حفاظت موضعی پیرامون پایه‌ها، از تشدید آبشستگی جلوگیری می‌کنند (Schendel et al., 2016).

۲- عوامل و مکانیزم‌های ایجاد آبخستگی

برای درک مکانیزم آبخستگی در اطراف یک مانع، مانند پایه‌ها، نیاز به بررسی دقیق تر رفتار جریان در این بازه است. جریان در این شرایط تحت تاثیر حضور موانع، گردان‌های شار مختلفی را تجربه می‌کند که در پروفیل عمقی منجر به رفتارهای متفاوت و ایجاد گردابه‌های متفاوتی می‌شود. عمدتاً عوامل ایجاد آبخستگی در اطراف موانع به سه دسته کلی ظاهر می‌شوند (شکل ۱).

۱) گردابه‌های نعل اسبی همراه با جریان رو به پایین^۳

طبق اصل عدم لغزش (no-slip)، سرعت سیال در تماس مستقیم با سطح جامد برابر با سرعت آن سطح است و اگر سطح ساکن باشد این سرعت معادل صفر می‌شود؛ این امر گردان فشار رو به پایین را ایجاد کرده و جریان رو به پایین را تقویت می‌کند. جریان رو به پایین عامل اولیه آبخستگی موضعی است که مانند جت آب عمل کرده و با برخورد به بستر رودخانه در حفره‌ای با توزیع سرعت از سطح به سمت پایین، منجر به تمرکز انرژی و فرسایش می‌شود. پس از برخورد با بستر، بخشی از جریان به سمت بالا بازمی‌گردد و در نتیجه در راستای چرخش جریان حول پایه، به‌طور موقت سرعت و تمرکز تنش در دو طرف پایه افزایش می‌یابد. این گردش غیرخطی جریان و بازگشت آن در داخل حفره، گردابی را پدید می‌آورد که در دو طرف پایه امتداد یافته و به نام گرداب نعل اسبی شناخته می‌شود؛ Inoue et al., 2025). Tafarjnoruz et al., 2010; Khosravi-Hamouleh and Ghanbari Adivi, 2026)

۲) گردابه‌های دنباله‌دار^۴

گردابه‌های دنباله‌دار به‌صورت دوره‌ای در پشت موانع، ناشی از تفاوت فشار دو طرف مانع، تشکیل می‌شوند. این پدیده باعث تغییرات نوسانی نیروهای وارده بر پایه و تغییر الگوی انتشار گردابه‌ها می‌گردد. با افزایش انرژی جنبشی نزدیک بستر، توپوگرافی بستر نیز تغییر می‌کند. شدت این گردابه‌ها به سرعت جریان، عمق آب، هندسه پایه و خواص رسوبات وابسته است. از این‌رو، در طراحی‌های پایدار، بهینه‌سازی هندسه پایه، استفاده از پوشش‌های مقاوم و کنترل شرایط میدان هیدرولیکی از جمله راهکارهای مؤثر برای کاهش اثرات آبخستگی به‌شمار می‌روند (Abudallah Habib et al., 2021; Heidarpour et al., 2010).

(Fazeres-Ferradosa et al., 2021) در مقابل، اقدامات غیرسازه‌ای بر اصلاح ویژگی‌های هیدرولیکی جریان، شرایط ژئوتکنیکی یا بهره‌گیری از پوشش‌های گیاهی تمرکز دارند. در این روش با تضعیف جریان‌های موضعی و گردابه‌های نعل‌اسبی، میزان آبخستگی در اطراف پایه پل کاهش می‌یابد (Chiew and Lim, 2003). آبخستگی پایه‌های پل با رویکردهای طراحی فونداسیون مقاوم و بهبود یافته، نگهداری پیشگیرانه، تجهیزات کاهش‌دهنده انرژی، پایش مستمر و شبیه‌سازی پیشرفته قابل کنترل است و خطر خرابی پل‌ها کاهش می‌یابد (Liang et al., 2020).

این یافته‌ها بر ضرورت توسعه و به‌کارگیری رویکردهای جامع و چندوجهی برای کاهش آسیب‌های ناشی از آبخستگی به‌منظور افزایش طول عمر پایه‌های پل و کاهش هزینه‌های تعمیر و نگهداری تأکید دارد. با وجود مطالعات گسترده در حوزه آبخستگی، خلأ پژوهشی در ارائه یک تحلیل مروری جامع که راهکارهای حفاظتی را در شرایط متنوع جریان ارزیابی کند، احساس می‌شود. از این‌رو، این پژوهش با هدف تبیین جامع اصول، سازوکارها و جنبه‌های مدیریتی مرتبط، در گام نخست الگویی منسجم از فرایندهای ایجاد آبخستگی با تحلیل نقش پارامترهای کلیدی (مانند سرعت و عمق جریان، هندسه پایه، و خواص فیزیکی و ناپایداری رسوبات) ارائه می‌دهد. سپس، با تحلیل نقاط قوت و محدودیت‌های عملیاتی و اقتصادی، دو رویکرد اساسی سازه‌ای و غیرسازه‌ای در اقدامات تقابلی، با تمرکز بر هیدرولیک جریان بررسی می‌شود. نوآوری اصلی این پژوهش در یکپارچه‌سازی رویکردهای نوین مدل‌سازی (شامل یادگیری ماشین و روش‌های عددی نظیر مدل‌های تک‌فازی و دوفازی CFD و SPH) با تحلیل عمیق و مقایسه‌ای راهکارهای حفاظتی نهفته است. این مقاله برخلاف مطالعات پیشین که عمدتاً بر جنبه‌های خاصی تمرکز داشته‌اند، با ارائه چارچوبی منسجم، ارتباط متقابل میان الگوی جریان، مکانیسم‌های توسعه آبخستگی و گزینه‌های کاهش آن را به تصویر می‌کشد. در نهایت، هدف غایی این پژوهش عبور از مرور صرف و ارائه نگاهی مفهومی و عملیاتی برای انتخاب استراتژیک پایدارترین راهکارهای حفاظتی در پروژه‌های مهندسی است؛ چارچوبی که ضمن بهبود ایمنی و کارایی، تأثیرات سوء اقتصادی و زیست‌محیطی را به حداقل رسانده و ابزاری کارآمد برای تصمیم‌گیری در پروژه‌های پل‌سازی فراهم می‌آورد.

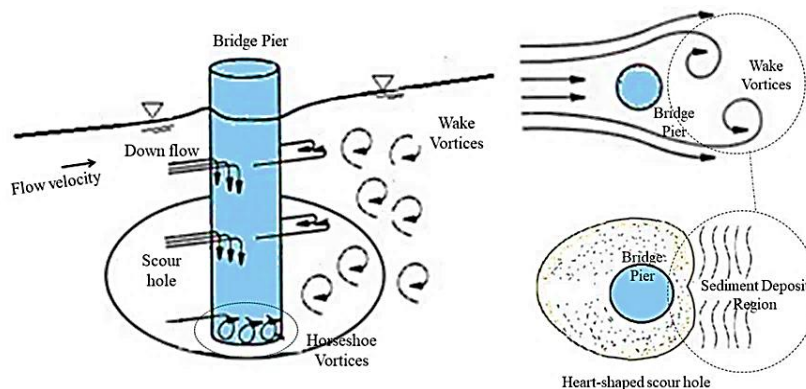
³ Cometary vortices

¹ Horseshoe vortices

² Down flow

۳) گردابه کمانی!

در کانال‌های باز وجود جریان‌های ثانویه باعث می‌شود که حداکثر سرعت کمی پایین‌تر از سطح آب اتفاق بیفتد. این پدیده باعث می‌شود تا جریان روبه بالا به وجود بیاید که این جریان موج کمانی یا غلتک سطحی را در جلوی پایه و در سطح آب به وجود می‌آورد. جهت چرخش غلتک سطحی، خلاف جهت چرخش گرداب نعل اسبی است، در جریان‌های کم عمق این گرداب با جریان اصلی تداخل پیدا کرده و باعث جریان رو به پایین می‌شود (Kalidindi and Khosa, 2025). مکانیسم آبشستگی موضعی پایه‌های پل در سه مرحله آغازین، توسعه و تعادل رخ می‌دهد. در مرحله آغازین، جریان



شکل ۱- شماتیک چاله آبشستگی توسعه یافته، گردابه‌های نعل اسبی و گردابه‌های دنباله‌دار و چاله آبشستگی (Abudallah Habib et al., 2021)

۲-۱- طبقه‌بندی آبشستگی

رودخانه در ناحیه انقباض کاهش می‌یابد (Chiew 1984). Raudkivi 1986 آبشستگی موضعی به طور کلی به سه نوع آب زلال، بستر زنده و آبشستگی تعادلی طبقه‌بندی می‌شود؛ آبشستگی تعادلی زمانی است که مقدار مواد خروجی و ورودی به چاله آبشستگی برابر شده و مرحله تعادل برقرار می‌گردد (Lanca et al. 2013; Akhlaghi et al., 2020)



شکل ۲- الف) آبشستگی اطراف پایه‌های پل در رودخانه لوگان، استرالیا ب) آبشستگی اطراف پایه‌های پل در رودخانه تینانو، نپال (Shrestha, 2015)

آبشستگی در اطراف سازه‌های هیدرولیکی، به‌ویژه پایه‌های پل، پدیده‌ای حیاتی است که به دو دسته کلی آبشستگی عمومی و موضعی تقسیم‌بندی می‌شود. آبشستگی عمومی، فرسایش سطح بستر رودخانه است که مستقل از سازه و ناشی از تغییر در رژیم جریان و افت تدریجی بستر، اغلب با دخالت انسان مانند ایجاد سدها در بالادست که مانع انتقال رسوب می‌شوند، مرتبط است و می‌تواند کوتاه مدت (ناشی از سیل یا جابجایی بستر) یا بلند مدت (ناشی از تغییر کاربری اراضی، سد یا برداشت از بستر) باشد (Liang et al., 2020; Akhlaghi et al., 2019). در مقابل، آبشستگی موضعی (شکل ۲) کاهش ناگهانی ارتفاع کف رودخانه در نزدیکی پایه پل به دلیل فرسایش مواد بستر توسط ساختار جریان موضعی ناشی از پایه پل تعریف می‌شود (Ismael et al. 2021; Kaveh et al. 2015). نوع دیگری از آبشستگی موضعی، آبشستگی انقباضی است که زمانی رخ می‌دهد که کاهش سطح مقطع جریان آب به دلیل پایه‌ها و تکیه‌گاه‌ها، سرعت جریان را افزایش داده و قدرت فرسایش را بالا می‌برد، در نتیجه ارتفاع کف

² Secondary streams

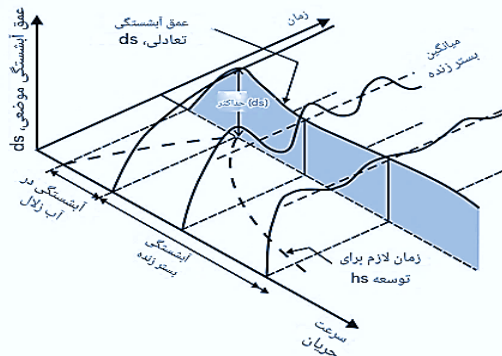
¹ Surface roller

گرفتن ماهیت دینامیک بستر متحرک می‌تواند منجر به برآوردهای غیرواقعی از پایداری فونداسیون شود (Hamidi et al., 2024).
۳- پارامترهای مؤثر بر فرآیند آبشستگی اطراف پایه پل
 عمق آبشستگی در اطراف پایه پل یک فرآیند پیچیده و پویاست که تحت تأثیر مجموعه‌ای از عوامل هیدرولیکی، هندسی و بستر قرار دارد و همین تنوع، پیش‌بینی دقیق آن را دشوار می‌کند. پژوهشگران با انجام آزمایش‌های گسترده، معادلات تجربی متعددی برای تخمین عمق تعادل آبشستگی ارائه کرده‌اند (Ismael et al. 2015; Pandey et al. 2018; Rathod and Manekar 2022) در نظر گرفتن هم‌زمان این پارامترها و شرایط محیطی می‌تواند به مدیریت مؤثر و کاهش آبشستگی پیرامون پایه‌های پل منجر شود.

۱-۳- پارامترهای هیدرولیکی

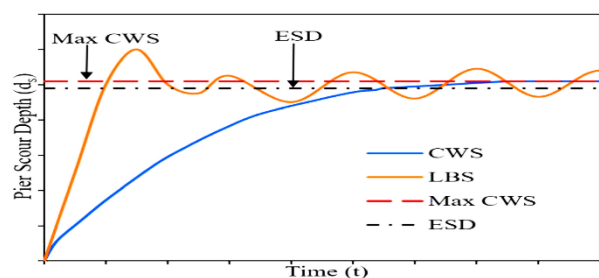
الف) عمق جریان: عمق جریان پیرامون پایه پل در میزان آبشستگی مؤثر است؛ کاهش عمق باعث افزایش سرعت و تشدید فرسایش می‌شود (Lança et al., 2013; Khan et al., 2017; Rathod and Manekar, 2022). عمیق‌تر می‌توانند منجر به ایجاد چاله‌های آبشستگی عمیق‌تری شوند، زیرا ستون آب بیشتری قادر به اعمال نیروی برشی قابل توجه به بستر است؛ با این حال، عمق آبشستگی نهایی تابعی از عوامل متعددی از جمله سرعت جریان، اندازه و مقاومت ذرات بستر، و هندسه مانع است (Akhlaghi et al., 2020).

ب) سرعت جریان: سرعت جریان نزدیک‌شونده نقش مهمی در ایجاد چاله آبشستگی دارد و افزایش آن باعث افزایش نیروهای برشی و تشدید فرسایش می‌شود (Link et al., 2019; Sharp and McAlpin, 2022). نسبت سرعت به سرعت بحرانی نوع آبشستگی را تعیین می‌کند؛ اگر $V/V_c \leq 1$ باشد آبشستگی آب زلال و اگر $V/V_c > 1$ باشد، آبشستگی بستر زنده است (Raudkivi and Ettema, 1983). در شکل ۴ تغییرات عمق آبشستگی موضعی با سرعت جریان نمایش داده شده است.



شکل ۴- تغییرات عمق آبشستگی موضعی با سرعت جریان (Melville and Coleman, 2000).

آبشستگی آب زلال زمانی رخ می‌دهد که سرعت متوسط جریان بالادست کمتر از سرعت بحرانی برای حرکت عمومی ذرات بستر باشد ($V < V_c$). به‌طوری‌که جریان ورودی فاقد بار رسوبی قابل توجهی باشد. در این شرایط، فرسایش بستر صرفاً در محدوده پایه و به‌واسطه تمرکز جریان و تشکیل سیستم گردابی نعل‌اسبی رخ می‌دهد که تنش برشی محلی را از آستانه حرکت ذرات فراتر می‌برد. مواد فرسایش‌یافته از چاله آبشستگی توسط جریان خروجی حمل شده و به‌دلیل عدم وجود بار رسوبی ورودی، مجدداً در چاله ته‌نشین نمی‌شوند. در نتیجه، عمق چاله تا زمانی افزایش می‌یابد که با گسترش حفره و کاهش گرادیان سرعت، تنش برشی مؤثر در کف چاله به زیر مقدار بحرانی کاهش یابد و پدیده فرسایش متوقف شود؛ حالتی که به آن «تعادل آب زلال» اطلاق می‌گردد (Raudkivi and Ettema, 1983; Chiew, 1984).
 در مقابل آبشستگی بستر زنده حالتی است که گودال آبشستگی به طور مداوم توسط جریان ورودی با رسوب تغذیه شود. این نوع آبشستگی زمانی رخ می‌دهد که تنش برشی ناشی از گرداب نعل‌اسبی بیشتر از تنش برشی بحرانی ذرات رسوب در کف گودال آبشستگی باشد (Raudkivi and Ettema 1983; Chiew 1984; Melville 1984). در واقع آبشستگی بستر زنده زمانی رخ می‌دهد که رسوبات از بالادست و پایین‌دست گودال آبشستگی حرکت کنند. در صورت آبشستگی بستر زنده، تنش برشی بستر بزرگتر از تنش برشی بحرانی مواد بستر است. در شکل ۳ نمودار تغییرات عمق آبشستگی با زمان در شرایط آب زلال و بستر زنده نشان داده شده است.



شکل ۳- تغییرات عمق آبشستگی با زمان در شرایط آب زلال و بستر زنده (Baranwal and Das, 2024)

آبشستگی در شرایط آب زلال معمولاً بیشتر است، اما در شرایط بستر متحرک، نوسانات موضعی و نرخ تغییرات بستر در اطراف پایه‌های مرکب بسیار پیچیده‌تر و غیرخطی‌تر است (Sheppard et al., 2023b; Rebai et al., 2026).

پژوهش‌های اخیر تأکید دارند که در طراحی‌های مهندسی، به‌ویژه در محیط‌های پیچیده مانند گودال‌های برداشت مصالح، نادیده

برای اینکه قطر ذرات بستر تأثیری بر محدود شدن عمق آبشستگی نداشته باشند و آبشستگی به صورت آبشستگی در بستر زنده کامل رخ دهد، دو معیار اصلی در نظر گرفته می شود: اول، نسبت هندسی $D/d_{50} > 50$ که در آن D قطر پایه و d_{50} قطر متوسط ذرات بستر است؛ این نسبت نشان می دهد که اثر اندازه ذرات بر الگوی جریان اطراف پایه ناچیز است. دوم، شرط هیدرولیکی $V/V_c \geq 1$ که در آن V سرعت جریان و V_c سرعت بحرانی شروع حرکت ذرات است؛ این شرط تضمین می کند که سرعت جریان از حدی فراتر رفته که ذرات به راحتی جابجا شده و مانع پیشروی آبشستگی نمی شوند. در عمل، ذراتی با قطر کمتر از ۲ میلی متر (مانند ماسه) معمولاً به عنوان ذراتی در نظر گرفته می شوند که مقاومت ساختاری کمی در برابر فرسایش دارند و در صورت حاکم بودن شرایط جریان زنده، عمق آبشستگی به حداکثر مقدار خود می رسد؛ در حالی که اگر ذرات بستر بزرگتر باشند (مانند قلوه سنگ)، پدیده آرمورینگ مانع از عمق یافتن آبشستگی می شود (Wang et al., 2021; Chenxi et al., 2024).

۳-۳- هندسه پایه

الف) زاویه حمله جریان: زاویه پایه پل نسبت به جریان تأثیر زیادی بر آبشستگی موضعی دارد (به جز پایه های دایره ای). افزایش این زاویه، عرض مؤثر پایه را بیشتر کرده و عمق آبشستگی را افزایش می دهد. در حالت مورب، طول پایه اهمیت یافته و عمق آبشستگی عقب پایه بیشتر از جلوی آن می شود (Akhlaghi et al. 2020).

ب) عرض پایه: عرض پایه بر الگوی جریان و تلاطم اطراف آن تأثیر می گذارد و می تواند منجر به ایجاد گرداب های موضعی قوی تر در لبه ها شود که بر شکل و عمق چاله آبشستگی تأثیرگذار است. با این حال، این رابطه خطی ساده نیست و به عواملی مانند هندسه پایه، زاویه برخورد جریان، و خواص رسوبات بستر بستگی دارد (Chiew, 1984).

ج) شکل پایه پل: شکل هندسی پایه بر جریان و آبشستگی اطراف آن اثرگذار است. پایه های با لبه های گرد (شکل ۵)، آبشستگی کمتری نسبت به پایه های تیز دارند (Melville and Raudkivi, 1977; Farooq and Ghumman, 2019). ضرایب اصلاحی (شکل ۶) برای اشکال مختلف پایه (استوانه ای): $K=1.0$ ، دماغه مستطیلی/مربعی: $K=1.1$ ، مستطیلی: $K=0.86$ ، دماغه تیز: $K=0.9$ برای محاسبه دقیق تر عمق آبشستگی به کار می روند (Vijayasree et al., 2019; Silvia et al., 2021). در پایه های دماغه دار، گرداب نعل اسبی در بالادست باعث حداکثر آبشستگی می شود، مگر اینکه پایه کاملاً

ج) عدد فرود (Fr): عدد فرود، کمیتی بدون بعد که اهمیت نسبی نیروهای اینرسی را نسبت به نیروهای گرانشی در جریان سیال توصیف می کند، بر عمق آبشستگی تأثیر می گذارد. عدد فرود بالاتر نشان دهنده ی چاله ی آبشستگی قوی تر است (اگر $Fr \leq 1$ باشد، آنگاه جریان زیر بحرانی و $Fr > 1$ جریان فوق بحرانی است (Ettema 1980)).

د) جهت جریان: جهت جریان نیز از عوامل مؤثر بر شکل گیری آبشستگی موضعی به شمار می رود، به گونه ای که هم راستایی مستقیم جریان با سازه می تواند با تشدید تمرکز جریان و افزایش توان فرسایشی آن، موجب برداشت مؤثرتر رسوبات بستر در مجاورت سازه شود (Das et al., 2014; Fael et al., 2016).

ه) مدت زمان جریان: مدت زمانی که آب در اطراف پایه پل جریان دارد نیز می تواند نقش اساسی در آبشستگی موضعی داشته باشد. دوره های طولانی تر جریان می تواند منجر به فرسایش و آبشستگی قابل توجه تری شود، زیرا رسوبات برای مدت طولانی تری در معرض نیروهای فرسایشی آب جاری قرار می گیرند (Ettmer et al., 2015; Sharp and McAlpin, 2022).

۳-۲- ویژگی های بستر

الف) ویژگی ها و اندازه رسوبات: نوع و اندازه رسوب اطراف پایه پل نیز می تواند بر آبشستگی موضعی تأثیر بگذارد. رسوبات درشت تر معمولاً نسبت به رسوبات ریزتر در برابر آبشستگی مقاوم تر هستند، اما همچنان می توانند در سرعت های بالای جریان دچار آبشستگی شوند. (Kothyari et al., 1992; Link et al., 2019) اندازه رسوب (d_{50}) در بستر رودخانه بر عمق آبشستگی تأثیر می گذارد، زیرا عمق آبشستگی در بستر شنی (4.10 mm $\leq d_{50} \leq 14.25$ mm) در مقایسه با بستر ماسه ای ($d_{50} \leq 4.0$ mm) بیشتر است (Raikar and Dey, 2005). اندازه ذرات بستر رودخانه، یک پارامتر حیاتی زبری بستر برای مدل سازی عمق آبشستگی است. سرعت بحرانی نیز با استفاده از میانگین اندازه ذرات محاسبه می شود که برای طبقه بندی شرایط CWS و LBS ضروری است (Shamshirband et al., 2020).

ب) انحراف معیار اندازه ذرات مصالح بستر: انحراف معیار توزیع اندازه رسوبات بستر بر عمق آبشستگی تأثیر می گذارد، زیرا انحراف معیار بالاتر نشان دهنده توزیع ناهمگن تر اندازه رسوبات است که می تواند بر آبشستگی تأثیر بگذارد (Dey and Sarkar, 2005) ($\sigma < 1.4$).

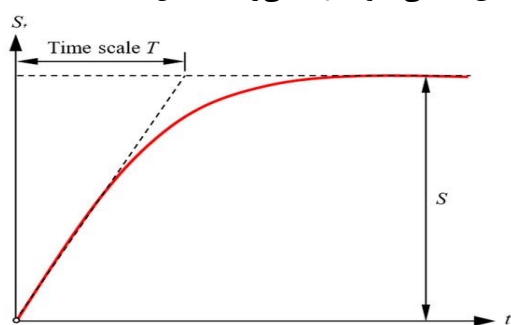
آبشستگی موضعی اطراف پایه پل‌ها است. شرایط تعادل زمانی حاصل می‌شود که نرخ تغییرات عمق آبشستگی در واحد زمان به صفر میل کرده و عمق حفره آبشستگی به مقدار حداکثر و پایدار خود نزدیک شود. از آنجا که رسیدن به این حالت تعادل به زمان نیاز دارد، بررسی سیر زمانی توسعه آبشستگی و تعیین مقیاس زمانی آن برای طراحی ایمن فونداسیون‌ها در برابر سیلاب‌هایی با مدت زمان محدود، ضروری است (Melville and Chiew, 1999).

در این راستا، مقیاس زمانی (T) به عنوان یک پارامتر مشخصه تعریف می‌شود که سرعت توسعه آبشستگی تا رسیدن به حالت تعادل را کمی‌سازی می‌کند. (Sumer et al., 1993) بر اساس آزمایش‌های خود در شرایط آبشستگی آب زلال (Clear-Water Scour)، یک رابطه نمایی برای توصیف سیر زمانی توسعه عمق آبشستگی پیشنهاد کردند که به صورت رابطه (۱) بیان می‌شود:

$$S_t = S_e [1 - \exp(-\frac{t}{T})] \quad (1)$$

که در آن S_t ، عمق آبشستگی در زمان t ؛ S_e ، عمق آبشستگی تعادلی (حداکثر عمق پایدار)؛ t ، زمان سپری شده از شروع فرآیند آبشستگی و T مقیاس زمانی مشخصه (Characteristic Time Scale) است.

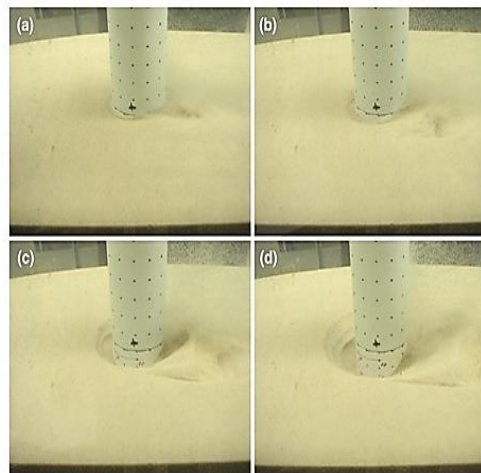
بر اساس این رابطه، مقیاس زمانی T بازه زمانی است که در آن عمق آبشستگی به حدود ۶۳/۲ درصد (معادل $1 - 1/e$) از عمق تعادلی خود (S_e) می‌رسد (شکل ۷).



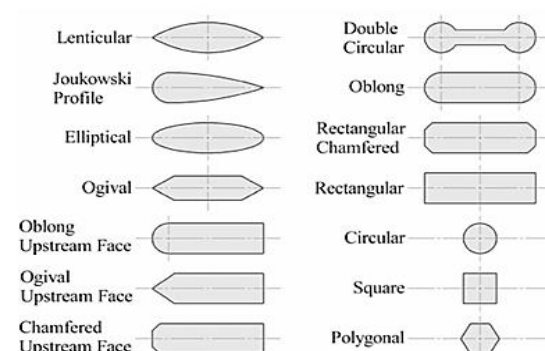
شکل ۷- تغییرات زمانی عمق آبشستگی (Gazi et al., 2019).

۴-۳- اثر مورفولوژی رودخانه در فرآیند آبشستگی پایه پل
مورفولوژی رودخانه به عنوان توصیف‌گر ساختار هندسی، الگوی جریان، رژیم رسوب، و روند تکامل بستر رودخانه، نقشی اساسی در تعیین شدت و الگوی آبشستگی موضعی اطراف پایه پل دارد. تحقیقات نشان داده‌اند که سازوکارهای آبشستگی پایه تنها زمانی به درستی قابل تحلیل‌اند که در بستر زمینه‌ای رفتار مورفودینامیکی رودخانه، شامل الگوی جریان در مقیاس کانال و تحول رسوبات، بررسی

با جریان همسو باشد. در حالت زاویه‌دار، پایه دماغه‌دار مانند پایه‌های دیگر آبشستگی عمیق‌تری را تجربه می‌کند. (Vijayasree et al., 2019)



شکل ۵- مراحل اولیه توسعه آبشستگی در یک شمع استوانه‌ای پس از شروع آبشستگی (Akhlaghi et al. 2020)



شکل ۶- نمای شماتیک برخی از اشکال پایه پل (Abudallah Habib et al., 2021)

۴-۳- زمان تعادل

بررسی سیر زمانی توسعه آبشستگی و تعیین شاخص زمان تعادل (T)، از مؤلفه‌های کلیدی در ارزیابی ایمنی سازه‌هاست. (Melville and Chiew, 1999) نشان دادند که زمان رسیدن به تعادل، تابعی مستقیم از شدت جریان (U/U_c) بوده و در شدت‌های پایین‌تر به طور نمایی افزایش می‌یابد. در همین راستا، پژوهش‌هایی نظیر Sumer et al., (1993) و Oliveto and Hager, (2002) با ارائه روابط نمایی و لگاریتمی، تحول عمق آبشستگی نسبت به زمان را کمی‌سازی کردند. از آنجا که در سیلاب‌های واقعی، مدت زمان دبی اوج محدود است، شناخت این شاخص زمانی برای تخمین عمق آبشستگی توسعه‌یافته (و نه لزوماً تعادلی کامل) در طراحی‌های مهندسی حیاتی است. تعیین عمق آبشستگی تعادلی، یکی از اهداف بنیادین در مطالعات

سوی دیگر، در مقاطع با پایداری نسبی بستر، روش‌های مسلح‌سازی ساده‌تر کارایی بیشتری دارند. به‌طور کلی، تحلیل آبشستگی پایه پل بدون لحاظ مورفولوژی رودخانه می‌تواند منجر به تخمین کمی نادرست عمق و پهنای چاله، انتخاب نامناسب روش‌های حفاظتی، و افزایش ریسک شکست سازه شود. به همین دلیل، مدل‌سازی عددی و تجربی آبشستگی در دهه اخیر به سمت اتصال دینامیک جریان موضعی با فرایندهای مورفودینامیکی کلان‌مقیاس حرکت کرده است.

۵- تاثیر ناپایداری مورفولوژیک رودخانه و برداشت مصالح از بستر در فرآیند آبشستگی پایه پل

آبشستگی پایه پل فقط یکی از مکانیسم‌های تهدید پی پل است. در عمل شکست پل ممکن است نتیجه ترکیب عواملی مانند آبشستگی موضعی و توسعه افت بستر رودخانه در اثر برداشت شن و ماسه باشد. برداشت شن و ماسه از بستر رودخانه‌ها، به‌ویژه از نواحی با ظرفیت کمتر، به‌عنوان یکی از عوامل کلیدی مؤثر بر میزان آبشستگی پیرامون پایه‌های پل در ایران شناسایی شده است. این فعالیت، با تغییر پارامترهای رسوب و جریان در اطراف پایه‌های پل، منجر به ایجاد آشفستگی و افزایش بار رسوبی در جریان می‌شود. این امر پیامدهای منفی قابل توجهی بر میزان و گستره آبشستگی در نواحی پیرامون پایه‌های پل دارد. علاوه بر این، برداشت شن و ماسه موجب تغییر در الگوی فرسایش هم در بالادست و هم در پایین‌دست گودال ایجاد شده ناشی از این برداشت می‌گردد (Majedi Asl et al., 2019). Rezaei et al., (2018) تاثیر عدد فرود در آبشستگی پیرامون گروه پایه‌های محافظت شده با کابل در حضور برداشت مصالح را بررسی کرده و نشان دادند که تفاوت میزان آبشستگی در بستر بالادست و پایین‌دست گودال برداشت مصالح در مقایسه با آزمایش‌های با عدد فرود بیشتر محسوس‌تر بوده است که بیانگر تاثیر بیشتر گودال برداشت مصالح در میزان آبشستگی برای اعداد فرود پایین است. در تحقیقی نیز با افزودن رس و پلی‌اکریل‌آمید کاتیونی آبشستگی پایه‌های پل و گودال‌های ایجاد شده تحت تاثیر برداشت مصالح رودخانه‌ای بررسی و مشاهده شد که افزودن رس و پلی‌اکریل‌آمید کاتیونی در بستر منجر به کاهش عمق و طول آبشستگی شده است. همچنین بررسی صحرایی و آزمایشگاهی چگونگی جابه‌جایی حفره برداشت مصالح نشان داد که سرعت جابه‌جایی حفره‌ها با دبی جریان و طول حفره نسبت مستقیم و با عمق حفره‌ها نسبت معکوس دارد و از بین فراسنجه‌ها عمق حفره بیشترین تاثیر را بر جابه‌جایی آن

شوند (Melville and Coleman, 2000). در واقع، تغییرات مورفولوژیک نه تنها شرایط اولیه بستر را تعیین می‌کنند، بلکه روند زمانی توسعه چاله آبشستگی و پایداری طولانی مدت آن را نیز کنترل می‌نمایند.

الف) نقش هندسه رودخانه و الگوی جریان:

هندسه مقطع رودخانه شامل عرض، عمق و شیب بستر، بر نحوه توزیع تنش برشی و میدان سرعت اثر مستقیم دارد. در رودخانه‌هایی با الگوی پیچان‌رود، بیشینه تنش برشی و تمرکز خطوط جریان در کناره محدب رودخانه تجمع یافته و پایه‌های واقع در بخش خارجی قوس معمولاً با خطر آبشستگی شدیدتری مواجه‌اند (Ettema, 1985). همچنین تغییرات ناگهانی در انقباض مقطع — ناشی از سازه پل یا تغییرات طبیعی کانال — موجب تشدید جریان جابجایی و افزایش پتانسیل فرسایش در بالادست پایه‌ها می‌شود.

ب) اثر پویایی بستر و رژیم رسوب:

رژیم رسوب‌دهی رودخانه و تکامل رپل‌ها، دون‌ها و سایر اشکال ناهمواری بستر، شرایط اولیه و زمان تکامل آبشستگی را شکل می‌دهد. وجود لایه‌های درشت‌دانه یا لایه‌بندی چندگانه رسوبات می‌تواند به تأخیر در شروع آبشستگی یا توقف نسبی توسعه چاله منجر شود. در مقابل، رودخانه‌های با بار معلق زیاد و بستر ریزدانه‌تر، مستعد تغییر شکل وسیع‌تر بستر و توسعه سریع‌تر چاله آبشستگی هستند (Chenxi et al., 2024).

ج) تأثیر تغییرات زمانی مورفولوژی بر پایداری چاله آبشستگی:

تغییرات مورفودینامیک رودخانه معمولاً در مقیاس‌های زمانی هفتگی تا چندساله رخ می‌دهد. حرکت جانبی کانال، فرسایش کناره‌ها، جابجایی قوس‌ها، و تغییر رژیم رسوبی، می‌توانند موقعیت و شدت آبشستگی را در بازه عمر بهره‌برداری پل به‌صورت قابل توجهی تغییر دهند. مطالعات حاکی از آن است که بی‌توجهی به تغییرات مورفولوژیک، سبب اختلاف قابل‌ملاحظه میان پیش‌بینی‌های عددی موضعی و رفتار واقعی آبشستگی در بستر رودخانه‌های طبیعی می‌شود (Yang et al., 2022).

د) تعامل مورفولوژی با روش‌های کاهش آبشستگی:

کارایی روش‌های حفاظتی مانند سنگ‌ریزی، طوق، گابیون، تشک‌های مفصلی یا صفحات مستغرق، شدیداً به شرایط مورفولوژی رودخانه وابسته است. در رودخانه‌هایی با بستر ناپایدار و جابه‌جایی فعال کانال، روش‌های موضعی تنها در صورتی مؤثرند که همراه با تحلیل مورفودینامیک به کار روند (Melville and Coleman, 2000; Ettema, 1985). از

رابطه‌ای منفی میان اندازه دانه و عمق آبخستگی مشاهده شده است؛ زیرا کاهش اندازه دانه، تنش برشی بحرانی را طبق معیار شیلدز کاهش می‌دهد و هم‌زمان ذرات درشت‌تر با افزایش زبری بستر، جریان را تضعیف می‌کنند (Wang et al., 2021). در بازه سیل‌تی نیز رفتار مشابهی گزارش شده و چسبندگی محدود ناشی از نیروهای واندروالس می‌تواند با افزایش شدت برش، مقاومت بستر را تا حدی افزایش دهد (Chen et al., 2022; Chenxi et al., 2024). نقطه تغییر اساسی در بازه رس رخ می‌دهد؛ جایی که برهم‌کنش‌های الکتروشیمیایی، ساختارهای لخته‌ای پایدار ایجاد کرده و مقاومت برشی بستر را به‌طور چشمگیری افزایش و عمق آبخستگی را کاهش می‌دهند (Mahalder et al., 2024). افزون بر این، فرسایش رس‌ها معمولاً یک فرآیند آهسته است که برای رسیدن به حالت تعادل به تکرار جریان نیاز دارد. در رسوبات مخلوط با دانه‌بندی غیریکنواخت، دو مکانیسم اصلی بر آبخستگی اثر می‌گذارند: چسبندگی ذرات ریز که عمق آبخستگی را حدود ۱۵ تا ۱۸ درصد کاهش می‌دهد و پدیده زرهی ذرات درشت که با افزایش محتوای رس، الگوی آبخستگی را از نوع غیرچسبنده به چسبنده تغییر می‌دهد (Chenxi et al., 2024; Qin et al., 2024). همچنین افزایش عدم‌یکنواختی (بر اساس σ_g) باعث تشکیل لایه محافظ از ذرات درشت پس از جابه‌جایی انتخابی ذرات ریز می‌شود که مانع گسترش آبخستگی است. وجود ذرات درشت‌تر، زبری بستر را افزایش داده و با کاهش سرعت جریان نزدیک بستر و افزایش اتلاف انرژی، توسعه آبخستگی را محدود می‌کند (Chibana et al., 2022). علاوه بر این، دانه‌بندی خوب (با $Cu > 5$ و Cc بین ۱ تا ۳) مقاومت آبخستگی بیشتری ایجاد می‌کند (Wang et al., 2021). نتایج مطالعات نشان می‌دهد که مقاومت آبخستگی رسوبات مخلوط حاصل تعامل هم‌زمان اندازه‌های مختلف ذرات است و در شرایط غیریکنواخت، تنها تکیه بر d_{50} برای پیش‌بینی رفتار آبخستگی قابل اتکا نیست، زیرا تغییر در نسبت ذرات ریز و درشت می‌تواند الگو و شدت آبخستگی را به‌طور اساسی تغییر دهد (Wang et al., 2021).

۶-۲- فشردگی رسوبات

فشردگی رسوبات، عاملی کلیدی در آبخستگی موضعی است که ساختار و خواص مکانیکی آن را تحت تأثیر قرار می‌دهد. حتی با اندازه ذره یکسان، تفاوت فشردگی می‌تواند رفتار آبخستگی را به میزان قابل توجهی تغییر دهد (Tan et al., 2007; Mohr et al., 2018). در رسوبات غیرچسبنده، افزایش

داشته است (Amini et al., 2001; Majedi-Asl et al., 2021) به بررسی تأثیر دانه‌بندی بستر و برداشت شن و ماسه از بستر رودخانه در اطراف گروه پایه پل بر هیدرودینامیک جریان پرداختند. آزمایش‌های آن‌ها با دو دانه‌بندی بستر متفاوت، سه دبی و عدد فرود مختلف انجام شد و به‌منظور بررسی تأثیر برداشت بر نرخ آبخستگی، برداشت مصالح هم در بالادست و هم در پایین‌دست گروه پایه انجام شد. نتایج آن‌ها نشان داد که برداشت مصالح از مکان‌های پایین‌دست منجر به افزایش آبخستگی در اطراف گروه پایه می‌شود. در عدد فرود ۰/۵، وجود یک گودال در پایین‌دست گروه پایه باعث افزایش ۳ و ۹/۷ درصدی در حداکثر عمق آبخستگی شد. از سوی دیگر، برداشت مصالح از مکان‌های بالادست و برای همان عدد فرود، آبخستگی را ۹ و ۸/۱ درصد کاهش داد. بررسی آزمایشگاهی آبخستگی گروه پایه‌های پل در مجاورت گودال برداشت مصالح نشان داد که زبر کردن سطح پایه‌ها با شن، راهکاری مؤثر برای کاهش عمق و نرخ توسعه آبخستگی و افزایش زمان رسیدن به تعادل است. همچنین، آبخستگی در پایه‌های پایین‌دست گودال (به‌ویژه در دبی‌های پایین) شدیدتر از بالادست بوده و با افزایش دبی، تراز کلی بستر کاهش می‌یابد (Daneshfaraz et al., 2021a). (Daneshfaraz et al., 2021b) آبخستگی موضعی اطراف گروه‌های شمع در بالادست و پایین‌دست یک گودال برداشت را بررسی کردند. نتایج نشان داد که شدت آبخستگی در گروه شمع پایین‌دست بیشتر از بالادست است. همچنین، به‌کارگیری پایه‌های هیدرودینامیکی باعث کاهش آبخستگی در بالادست و در اطراف گودال برداشت شد. بیشترین کاهش، معادل ۲۹ درصد کاهش عمق آبخستگی مشاهده شد. با جابه‌جایی گودال برداشت به سمت پایین‌دست نیز آشفته‌گی جریان، وارونگی جریان و گردابه‌های نعل‌اسبی در پایین‌دست افزایش یافت. به‌طور کلی، وجود پایه‌های هیدرودینامیکی در گروه شمع بالادست باعث کاهش سرعت بیشینه جریان شد، اما در گروه شمع پایین‌دست موجب افزایش آن گردید.

۶- تأثیر ویژگی‌های رسوبات بستر بر آبخستگی

۶-۱- دانه‌بندی رسوبات

اندازه دانه رسوب یکی از عوامل اصلی کنترل‌کننده آبخستگی موضعی است و رفتار رسوبات در بازه‌های مختلف اندازه، تفاوت‌های آشکاری نشان می‌دهد. طبق طبقه‌بندی رسوبات، خاک‌ها به سه گروه رس، سیلت و ماسه (شن) تقسیم می‌شوند که هرکدام ویژگی‌های آبخستگی متفاوتی دارند (Sonia, 2017). Devi and Barbhuiya, (2017) در خاک‌های شنی،

به عنوان فیلتر عمل کرده و از جابجایی ذرات خاک جلوگیری می کنند (Schendel et al 2016). لایه بالایی از سنگ های بزرگتر، یک زره محافظ مقاوم در برابر آبشستگی ایجاد می کند. اندازه ذرات سنگ، مساحت پوشش، ضخامت لایه زرهی و عمق دفن سنگ از ملاحظات کلیدی طراحی هستند، که اندازه ذرات سنگ به طور مستقیم بر میزان حفاظت تأثیرگذار است (De Vos et al., 2011, 2012; Harasti et al., 2021).

تخریب بستر، خطر شکست سنگ چین مسلح را افزایش می دهد، به ویژه هنگامی که آبشستگی عمومی رخ می دهد (Chiew, 2004). این شکست ترکیبی از آبشستگی موضعی و عمومی است. مکانیسم های شکست سنگ چین در شرایط آب زلال شامل شکست برشی، که جدا شدن سنگ ها به دلیل نیروهای هیدرودینامیکی است و معمولاً زمانی که $V/V_c > 0.35$ رخ می دهد (Melville and Coleman, 2000; Tang et al., 2022).

پنجه سنگ چین است و با افزایش V/V_c و مقادیر بزرگتر dr/d افزایش می یابد (Chiew, 1995; Tang et al., 2022) و شکست بادبری، که حرکت مواد ریزتر از طریق حفره های بین سنگ ها است و عمدتاً توسط تلاطم آغاز شده و می تواند منجر به فرو رفتن رسوبات و شکست شود (Nielsen et al., 2011, 2015). علاوه بر این، در بسترهای زنده، شکست ناشی از شکل بستر (نوسانات سطحی) و تخریب بستر (بیرون غلتیدن سنگ چین ها) نیز شناسایی شده اند (Chiew, 2002; Fredsoe et al., 2001).

همچنین گرداب های نعل اسبی در جلوی سنگ های منفرد، عامل اصلی تخریب در اتصال سنگ چین و بستر در جریان ثابت می باشند (Vasquez et al., 2007). مطالعات عددی و فیزیکی نشان می دهند که لایه سنگ چین می تواند آبشستگی موضعی و عمومی را کاهش دهد، هرچند ممکن است باعث جابجایی جزئی سنگ ها شود، اما مانع شکل گیری حفره آبشستگی در نزدیکی پایه ها می شود.

۷-۱-۲- حفاظت با سنگ و ملات

رویکرد پیشنهادی تزریق ملات به لایه آرمور، با پر کردن ۵۰ درصد حفره ها، پایداری بالا و مقاومت در برابر آبشستگی را فراهم می کند. این روش استحکام بالا در برابر جریان ها را با سازگاری بستر دریا ترکیب می کند است (Li et al., 2023; Zhang et al., 2023a) (2010). al. پایداری محافظت های تزریق جزئی تا سرعت جریان ۸ متر بر ثانیه را نشان دادند. (Zhang et al. (2022 دریافتند که تنش برشی بحرانی برای آغاز آبشستگی در

فشردگی، اصطکاک را افزایش داده و آبشستگی را مهار می کند (Wang et al., 2022). در خاک های چسبنده، فشردگی چسبندگی را افزایش داده و مقاومت فرسایشی را بهبود می بخشد؛ همچنین افزایش چگالی خشک می تواند عمق آبشستگی را تا ۴۰ درصد کاهش دهد (Chen et al., 2022). لایه های متراکم تر مقاومت بیشتری در برابر فرسایش دارند و عمق و شعاع آبشستگی را کاهش می دهند. این خصوصیات فیزیکی بستر، توانایی مقاومت در برابر فرسایش آبی را تعیین کرده و مبنای تبیین شروع و گسترش آبشستگی می باشند (Duan et al., 2025; Wang et al., 2022).

۷-۲- روش های کاهش آبشستگی پایه پل

گزینه های محافظتی بر اساس مشخصات جریان، هندسه محل، مورفولوژی رودخانه و هزینه های ساخت و نگهداری انتخاب می شوند و دو رویکرد اصلی وجود دارد: (۱) افزایش مقاومت سطح بستر در برابر جریان، از طریق سنگ چین، گابیون، کیسه های ژئوتکستایل پر از شن و ماسه، تشک های بتنی مفصلی، صخره های مصنوعی، محافظت با سنگ و ملات و سایر سازه های مقاوم؛ و (۲) اصلاح میدان جریان تا کاهش ظرفیت فرسایشی آن، با اقداماتی مانند استفاده از طوقه ها، ایجاد شکاف در اسکله، نصب شمع های قربانی در بالادست اسکله، استفاده از صفحات مستغرق و آستانه ها (Gokmener et al., 2025; Bharadwaj et al., 2025; Niu et al., 2025; Hamidifar et al., 2022).

۷-۱-۲- روش های مسلح کردن بستر

رایج ترین اقدام متقابل برای کنترل یا کاهش آبشستگی با تقویت ذرات رسوب بستر یا با استفاده از سازه های مسلح کننده در اطراف فونداسیون استفاده می شود. این روش ها به دلیل مقرون به صرفه بودن و سهولت استفاده شناخته شده اند (Chambel et al., 2024). افزایش قابلیت ضد آبشستگی مصالح بستر با محافظت از لایه های زرهی، عمق آبشستگی موضعی را به طور متناسب کاهش می دهد. اقدامات متقابل زرهی همچنین به عنوان اقدامات متقابل غیرفعال آبشستگی تعریف می شوند.

۷-۱-۱- سنگ چین

محافظت با سنگ چین روشی متداول و کم هزینه برای افزایش قابلیت ضد آبشستگی و فرسایش مصالح بستر است (Tang et al., 2022; Ghanbari adivi et al., 2013). انباشت سنگ ها در اطراف پایه های پل است، به طوری که مقاومت کافی در برابر تنش برشی ایجاد شود. لایه سنگ چین از دو بخش تشکیل شده است. ذرات ریز شن در لایه پایین

در تشک‌های گابیونی نیاز دارد، به ساخت و ساز پایدار و مقرون به صرفه کمک کند.

۷-۱-۴- تشک‌های بتنی مفصلی (ACM)

تشک‌های بتنی مفصلی که به صورت واحد محافظتی با اتصال از طریق سیم‌ها تشکیل می‌شود، پیش از نصب با کنترل کیفیت بالا تولید می‌شود تا تشک‌های دوغاب‌ریزی شده را در برابر آبخستگی بستر محافظت کند و نفوذپذیری مناسب را برای جلوگیری از فشار آب اضافی زیر زره فراهم آورد. تشک‌های اولیه پس از آزمایش‌های موجی نشان دادند که در موج‌های شدید، پایداری آن‌ها افت می‌کند و به همین دلیل تشک‌های تازه ارتقا یافته پیاده‌سازی شدند (Li et al., 2023; Liang et al., 2022). Liang et al. (2022) با استفاده از یک مدل سه بعدی نشان دادند وجود حفاظ ACM موجب کاهش هدررفت رسوب دریا می‌شود اما با فاصله‌های کم تا به لبه حفاظ بی‌ثباتی آغاز می‌شود و با افزایش سرعت جریان شدت می‌گیرد.

۷-۱-۵- محفظه‌های شنی ژئوتکستایل (GSC)

ژئوتکستایل‌ها و ژئوسنتتیک‌ها در مهندسی ژئوتکنیک و حفاظت ساحلی برای مقابله با آبخستگی کاربرد فراوانی دارند. این مواد با مدیریت جریان رودخانه یا سازه‌های ساماندهی، می‌توانند با تغییر الگوی جریان یا افزایش مقاومت، به توقف آبخستگی کمک کنند. همچنین، آن‌ها می‌توانند به عنوان فیلتر، تقویت‌کننده و مهارکننده عمل نمایند (Heibaum, 2006). در مواردی که امکان تغییر عملکرد وجود ندارد، ژئوتکستایل‌ها به عنوان فیلتر زیر لایه زره، مقاومت را افزایش می‌دهند، هرچند راه‌حل‌های بدون زره یا با خود زره نیز موجود هستند. ظروف ژئوسنتتیکی مانند محفظه‌های ژئوسنتتیک-پیلارچیک (Pilarczyk, 2000) حوزه‌های جدید در حال توسعه می‌باشند. برای بهبود مقاومت در برابر آبخستگی، به طور فزاینده‌ای از ژئوتکستایل‌ها و ژئوگریدها برای تقویت مواد پرکننده با ژئوسنتتیک‌ها استفاده می‌شود که کارایی طولانی‌مدت خود را اثبات کرده‌اند (Heibaum, 2006; Grün, 2007; Bezuijen and Pilarczyk, 2012). نقش‌های متنوعی دارند و با پر شدن با شن یا ملات، انعطاف‌پذیری و پایداری را فراهم می‌کنند؛ در سازه‌های بلندتر به صورت پی‌ای انباشته و اغلب با شن پوشانده می‌شوند. پوشش گیاهی مانند چمن نیز در شرایط هیدرولیکی شدید می‌تواند به محافظت کمک کند، زیرا ژئوسنتتیک‌ها مقاومت آن را

تک‌شمع دوغاب‌ریزی شده حدود ۱۰ برابر بیشتر از تک‌شمع بدون دوغاب است. حفاظت‌های دوغاب‌ریزی شده کارآمدتر از سنگ‌چین هستند و آزمایش‌های Wang et al. (2023a) کاهش تا ۸۰ درصد عمق آبخستگی را نشان دادند. لایه آرمور با سیمان‌کاری تقویت شده است.

۷-۱-۳- گابیون‌ها

کیسه‌های سیمی، جعبه‌ها، سبدها یا تشک‌های پر شده با مواد سنگ‌چین که برای بهبود پایداری و کاهش آبخستگی استفاده می‌شوند (Li et al., 2023). یکی دیگر از روش‌های شناخته شده برای محافظت از آبخستگی کناره‌های رودخانه، استفاده از گابیون‌ها است. گابیون‌ها عمدتاً در پل‌ها یا برای تثبیت حاشیه رودخانه‌ها استفاده می‌شوند (Singh et al., 2022). در ابتدا پوشش گابیون از توری سیمی یا میله‌های فولادی ساخته می‌شد. امروزه نیز از توری‌های ژئوسنتتیک به عنوان مهار گابیون (ژئوگریدها یا طناب‌ها) استفاده می‌شود. Yoon, (2005) استفاده از گابیون‌های سیمی پر شده با سنگ را بررسی کرد و دریافت که با افزایش نسبت طول به ضخامت، پایداری گابیون نیز تا ضریب محدودکننده $L/t = 3$ افزایش می‌یابد. هر مقداری بیشتر از $L/t = 3$ احتمالاً هزینه‌های اضافی مصالح را ایجاد می‌کند که ممکن است هرگونه پایداری اضافی گابیون به دست آمده را جبران کند، که نشان می‌دهد افزایش L/t سودمند نیست. علاوه بر این، گابیون‌های سیمی می‌توانند عملکرد بهتری در کاهش آبخستگی نسبت به سنگ‌چین‌های هم‌اندازه ارائه دهند، یا اندازه معادل گابیون‌ها می‌تواند منجر به راه‌حل‌های مقرون به صرفه‌تری برای کاهش آبخستگی شود. Lagasse, (2007) نتیجه گرفتند که بهترین عملکرد تشک‌های گابیونی به عنوان یک اقدام متقابل برای آبخستگی پایه پل زمانی رخ می‌دهد که تشک‌ها حداقل دو برابر عرض پایه در تمام جهات امتداد یابند. یک فیلتر ژئوتکستایل نیز پایداری بیشتری برای تشک فراهم می‌کند، مشابه یافته‌های Parker et al., (1998) بارهای بیشتر آوار می‌تواند برای تشک‌های گابیونی مضر باشد، که توسط Pagliara et al., (2010) تأیید شده است، و نشان می‌دهد تجمع آوار ممکن است کارایی گابیون‌ها را کاهش دهد. معرفی مواد قابل بازیافت به گابیون‌ها می‌تواند راه حلی برای آبخستگی در پایه‌های پل ارائه دهد و همچنین با استفاده مجدد از مواد در مقایسه با جایگزین‌هایی مانند سنگ‌چین، که برای ایجاد همان پایداری به دو برابر اندازه سنگ مورد استفاده

ترکیب با موج‌شکن‌ها مؤثر می‌باشند (López et al., 2016). Aleksandrova et al. (2023). Kim et al., 2021, 2022) صخره‌های مصنوعی ادغام‌شده با محافظ سنگ‌چین دو درجه‌ای را برای ارزیابی اثر آبشستگی لبه‌ای بررسی کردند. نتایج نشان داد که این سازه‌ها (ARها) تغییر شکل اضافی ایجاد نمی‌کنند و بسته به موقعیت، می‌توانند الگوهای تغییر شکل را تحت تأثیر قرار دهند. با این حال، در بارگذاری شدید هیدرودینامیکی، به‌ویژه در نواحی تقویت تک‌شمع، تمایل به ناپایداری دارند که می‌تواند منجر به آسیب به زیرساخت‌ها شود. (Aleksandrova et al. (2023) ضرورت اجتناب از مناطق حفاظت آبشستگی با تقویت جریان و تغییر شکل لایه زره تأکید کرد. لوله‌های سوراخ‌دار هنگام قرارگیری در بالای لایه فیلتر جابجایی بیشتری دارند و مستعد رسوب‌گذاری و پر شدن از داخل هستند. بنابراین، شکل هیدرودینامیکی، وزن سازه، موقعیت قرارگیری و نیاز احتمالی به سیستم لنگر برای حفظ پایداری ضمن حفظ مزایای اکولوژیکی، اهمیت دارد. چمن بیونیک (تشک تقویت‌شده با الیاف با چمن مصنوعی) و حفاظ لانه زنبوری با کاهش عمق آبشستگی و افزایش رسوب‌گذاری، ظرفیت محافظت ساحلی را بهبود می‌بخشند (Schendel et al., 2014). چمن بیونیک با کاهش سرعت جریان و گرادیان هیدرولیکی، حمل رسوبات را کاهش داده و منجر به بهبود پایداری فونداسیون پایه می‌شود. نگهداری کم، این ژئوسنتتیک‌ها را به گزینه‌ای کارآمد تبدیل کرده است (Wang et al., 2023b).

۷-۲- اقدامات متقابل تغییر دهنده جریان

علاوه بر روش‌های مسلح کردن بستر، اقدامات متقابل تغییر دهنده جریان نیز روش مناسبی برای کاهش آبشستگی موضعی هستند. در ادامه به مهم‌ترین این روش‌ها پرداخته می‌شود.

۷-۲-۱- طوق

استفاده از طوق در اطراف فونداسیون شمع، راهکاری مؤثر برای جلوگیری از جریان رو به پایین و گرداب نعل‌اسبی است (Bagheri et al., 2024; Chiew, 1992). این سازه‌ها که عموماً دایره‌ای شکل بوده و به‌صورت موازی با کف رودخانه نصب می‌شوند، می‌توانند به فونداسیون متصل شوند یا در زیر بستر قرار گیرند. مطالعات تجربی (Gaudio et al. 2012) نشان دادند که طوق‌ها سرعت فرآیند آبشستگی را کاهش می‌دهند. بررسی‌های بعدی (Pandey et al., 2020) نیز کاهش عمق آبشستگی را تأیید کردند، اما بر لزوم توجه به دوره زمانی کافی برای ارزیابی دقیق راندمان تأکید داشتند.

افزایش می‌دهند. سیستم‌های مختلف ژئوسنتتیک مانند ژئوتکستایل‌ها، ژئوگریدها و ژئوسل‌ها حتی در برابر نیروهای هیدرولیکی بالا، پایداری سطح محافظت‌شده را تضمین می‌کنند (Heibaum, 2006). (Corvaro et al. (2018) آزمایش‌هایی روی محافظ‌های GSC با ۸۰ درصد پرشدگی حول پایه‌ها انجام دادند و دو حالت شکست اصلی (غزش و واژگونی، که واژگونی غالب بود) را شناسایی کردند. محافظت آبشستگی عملاً با کاهش عمق آبشستگی همراه بود؛ در موج منظم پس از حدود ۵۰۰ موج و در موج نامنظم پس از حدود ۱۵۰۰ موج به پایداری رسید. پیکربندی دایره‌ای بهترین عملکرد را داشت، در حالی که پیکربندی مربعی بدترین بود، زیرا جهت موج بر کارایی تأثیرگذار است. نتایج نشان داد که محافظ‌های GSC عمق آبشستگی را به‌طور قابل توجهی کاهش می‌دهند و در امواج با ارتفاع و دوره اوج، شکست قابل توجهی مشاهده نشد. (Wang et al. (2023b) نیز تشک‌های دایره‌ای و مربعی را آزمودند و آسیب‌های جزئی در گوشه‌های پیکربندی مربعی گزارش کردند. (Akib et al., (2012 دریافتند ژئوبگ‌های پر شده با بتن خرد شده بازیافتی، کاهش ۵۰ تا ۸۱ درصدی آبشستگی را به همراه دارند، اما پس از ۲۴ ساعت و در صورت جابجایی از محل اصلی، دچار شکست می‌شوند. (Korkut et al., (2007) نیز کاهش آبشستگی با استفاده از مجموعه‌ای از ژئوبگ‌ها را تأیید کردند و مشاهده نمودند که شکست ژئوبگ‌ها و انتقال آن‌ها به چاله آبشستگی می‌تواند محافظت بیشتری ایجاد کند. قرار دادن ژئوبگ‌ها زیر عمق رسوب، اثربخشی آن‌ها را افزایش می‌دهد. (Parker et al., (1998) دریافتند بلوک‌های کابلی بدون ژئوتکستایل مستعد شکست هستند، اما با استفاده از ژئوتکستایل، اثربخشی آن‌ها به‌طور قابل توجهی بهبود یافته و محل آبشستگی به لبه بلوک‌ها منتقل شده است. (Hoe et al., (2001) استفاده از بلوک‌های کابلی مشابه کاشی سرامیکی را بررسی کردند و هرچند آبشستگی در پایین دست تکیه‌گاه رخ داد، اما شیب سرریز شکست نخورد. اجرای ژئوتکستایل می‌توانست به کاهش آبشستگی کمک کند. بلوک‌های کابلی متصل به ژئوتکستایل به‌عنوان جایگزینی مناسب برای سنگ‌چین در نهرهای شنی پیشنهاد شده‌اند.

۷-۱-۶- صخره‌های مصنوعی (AR)

این روش‌ها، حفاظت در برابر آبشستگی با کاهش انرژی جریان و موج، جلوگیری از فرسایش ساحلی و افزایش تنوع زیستی در

حتی در این حالت نیز، قسمت بالایی شکاف امکان عبور جریان و کاهش آبخستگی موضعی را فراهم می‌کند. Farhdi et al., (2025) در پژوهشی، ایجاد شکاف را یک روش کارآمد برای کنترل آبخستگی حول پایه پل معرفی کردند. نتایج آن‌ها نشان داد پایه با شکاف زیر سطح بستر تا $40/8$ درصد نسبت به نمونه بدون شکاف موجب کاهش آبخستگی حول پایه می‌شود. (Hajikandi and Golnabi, 2018) دریافتند که نصب شکاف بر روی پایه‌های پل (T, Y و مستقیم) ابعاد، عمق و عرض آبخستگی را کاهش می‌دهد. شکاف‌های مستقیم مؤثرترین بودند (کاهش 38 درصد) نسبت به شکاف‌های Y شکل (کاهش 33 درصد). قرار دادن شکاف در عمق بیشتر نیز به کاهش آبخستگی کمک کرد. Obied and Khassaf, (2019) آزمایش کردند که افزایش طول شکاف‌های مستطیلی با لبه‌های گرد، نسبت عمق آبخستگی را از 31 تا 49 درصد کاهش می‌دهد. این شکاف‌ها با انحراف جریان و کاهش گرداب، آبخستگی را کم می‌کنند.

۷-۲-۳- شمع‌های فداشونده

شمع‌های فداشونده، آرایه‌های شمعی هستند که در بالادست مونوپایل محافظت‌شده قرار گرفته‌اند. آرایه‌های شمع ممکن است در معرض آبخستگی موضعی باشند، اما با ایجاد ناحیه دنباله با سرعت کم، پایه‌ها را محافظت می‌کنند (Melville and Hadfield 1999 and Coleman, 2000). یک مطالعه تجربی در مورد اثربخشی شمع‌های فداشونده برای کاهش آبخستگی موضعی پایه‌های استوانه‌ای و مستطیلی انجام دادند. آنها نتیجه گرفتند که شمع‌های فداشونده فقط زمانی توصیه می‌شوند که شدت جریان (V/V_c) و زاویه حمله کم (b) نسبتاً کوچک باشند. (Park et al. 2016) اشاره کردند که شمع‌های فداشونده مستغرق می‌توانند به نوعی به‌عنوان یک گیرنده آوار عمل کنند و تأثیر تجمع آوار را کاهش دهند. استفاده از شمع‌های فداشونده با عمق کامل برای منطقه جریان، باعث می‌شود که در طول سیل، به راحتی تحت تأثیر آوار شناور قرار گیرد. اثربخشی محافظتی شمع‌های فداشونده به تعداد و چیدمان شمع‌های فداشونده مربوط می‌شود. Wang et al. (2017) شمع‌های فداشونده اضافی برای کاهش آبخستگی موضعی گروه‌های شمع مؤثر بودند. Nazari-Sharabian et al. (2020) تعداد و چیدمان عددی شمع‌های فداشونده را به صورت عددی بررسی کردند. افزایش تعداد شمع‌های فداشونده می‌تواند عمق آبخستگی موضعی اطراف پایه را کاهش دهد و فاصله بین آرایه شمع فداشونده و پایه‌های محافظت‌شده نباید از ناحیه دنباله آرایه شمع فداشونده بیشتر شود.

بیشتر مطالعات پیشین در شرایط آب زلال انجام شده است. آزمایش‌های بستر زنده نشان دادند که طوق‌های گرد با محافظت 360 درجه عملکرد بهتری دارند و تخریب بستر ناشی از آبخستگی عمومی می‌تواند کارایی طوق‌ها را تضعیف کند (Hong et al. 2012). انواع جدیدتری از طوق‌ها مانند طوق صفحه‌ای (Chen et al., 2018)، طوق قلاب‌دار (که تا حدی عمق آبخستگی موضعی را بیشتر کاهش می‌دهد) و طوق حاشیه‌دار (Ferraro et al., 2020) که تا $63/51$ درصد کاهش آبخستگی را نشان داد، توسعه یافته‌اند. همچنین، محافظ CPN1 (Valela et al., 2021) توانست تا 51 درصد کاهش آبخستگی را در سطح بستر حاصل کند. (Zarrati et al., 2014) و Jahangirzadeh et al., (2004) هر دو تایید کردند که ابعاد بزرگ‌تر طوق، آبخستگی را بیشتر کاهش می‌دهد. طوق‌های مستطیلی 8 درصد کارآمدتر از سایر اشکال هستند. همچنین، نصب طوق زیر بستر رسوب نیز باعث کاهش آبخستگی می‌شود، هرچند این اثر ناچیز است. (Keshavarz et al., 2024) با بررسی اشکال مختلف پایه در قوس 180 درجه، دریافتند که شکل و محل قرارگیری طوق بر میزان آبخستگی بسیار مؤثر است. بیشترین کاهش (75 درصد در عمق و 95 درصد در حجم حفره) در پایه‌های بیضوی با زاویه 120 درجه مشاهده شد. حداقل و حداکثر عمق آبخستگی نیز به ترتیب $8/0$ و $58/2$ برابر قطر پایه گزارش شده است. Zarrati et al., (2010) نشان دادند ترکیب سنگ‌چین و طوق، علاوه بر کاهش ابعاد سنگ‌چین موردنیاز، باعث کاهش امتداد لایه سنگ‌چین در جلو و کناره‌های پایه استوانه‌ای می‌شود (در محدوده $b/d_R = 7/5$).

۷-۲-۲- شکاف

شکاف پایه پل، که معمولاً به‌صورت برش عمودی در وجه پایین‌دست پایه ایجاد می‌شود، با دور کردن جریان رو به پایین از بستر، پتانسیل آبخستگی را کاهش داده و شدت گرداب نعل اسبی را کم می‌کند (Bestawy et al. 2020; Chiew 1992). شکاف‌های نزدیک بستر، راندمان حفاظتی بهتری نسبت به شکاف‌های نزدیک سطح آزاد آب دارند. گسترش طول شکاف تا زیر سطح بستر (Kumar et al., 1999) و آزمایش شکاف‌ها با عمق‌های مختلف (Grimaldi et al., 2009) نشان‌دهنده افزایش راندمان محافظت است. با این حال، اثربخشی شکاف به دلیل جهت جریان، اثر انسداد آوار و تراز آن محدود می‌شود (Melville and Coleman, 2000; Kumar et al. 2012). (al., 1999; Gaudio et al. 2012) بهترین راندمان زمانی حاصل می‌شود که شکاف پایین‌تر از سطح بستر قرار گیرد، اما

۷-۲-۴- صفحات مستغرق

صفحات مستغرق، با کاهش سرعت و گردابه‌ها در ناحیه دنباله، شمع محافظت شده را در برابر آبشستگی حفاظت می‌کنند (Odgaard and Kennedy, 1983). نصب صفحات در جلوی تکیه‌گاه پل باعث شکسته شدن جریان نزدیک‌شونده و در نتیجه کاهش قدرت جریان رو به پایین و گرداب نعل اسبی در جلوی تکیه‌گاه می‌شود (Alizadeh et al., 2024). این صفحات می‌توانند با هدایت رسوبات به داخل حفره آبشستگی، به کاهش آبشستگی موضعی کمک کنند. مطالعات اولیه (Lauchlan, 1999) نشان دادند که صفحات در آب زلال تا حدود ۲۰/۵ درصد راندمان حفاظتی دارند، اما در شرایط بستر زنده، اگر صفحات خیلی نزدیک به شمع نصب شوند، ممکن است حداکثر عمق آبشستگی موضعی را افزایش دهند. با این حال، چیدمان‌های مناسب صفحات تا ۵۰ درصد حفاظت را بهبود بخشیدند (Melville and Ghorbani and Kells, 1999). بررسی‌های (Hadfield, 1999) نشان داد که صفحات تکی و دوتایی با زوایای مختلف تا ۵۳/۸ درصد کاهش آبشستگی موضعی را در شرایط جریان آستانه ایجاد کردند. همچنین، باله‌های دلتا شکل به عنوان نوع دیگری از پره‌ها، کاهش آبشستگی را از ۳۲ تا ۶۷ درصد در آب زلال نشان دادند (Tafarojnoruz et al., 2010). Vaghefi et al. (2023) به صورت تجربی پیکربندی صفحات مستغرق را برای کاهش آبشستگی موضعی اطراف پایه‌ها در یک پیچ تند و با در نظر گرفتن کمیت، طول و جهت‌گیری بررسی کردند. نتایج نشان داد که بیشترین کاهش عمق آبشستگی زمانی رخ داد که سه صفحه مستغرق با طول ۱/۵ برابر قطر پایه و با زاویه ۱۵ درجه نسبت به خط مماس، در بخش میانی قوس قرار گرفتند؛ این آرایش حدود ۳۰ درصد کاهش عمق آبشستگی را نسبت به سایر حالت‌های مطالعه شده ایجاد کرد. همچنین Chooiploo et al. (2023) اثر صفحات مستغرق با موقعیت جدید بر آبشستگی موضعی اطراف پایه در یک قوس ۱۸۰ درجه را بررسی کردند و نشان دادند که قرارگیری صفحات مستغرق در محور مرکزی کانال، بیشترین کاهش عمق آبشستگی را در مقایسه با حالت بدون صفحه ایجاد می‌کند؛ به طوری که با کمترین حجم چاله آبشستگی، ۵۱ درصد کاهش آبشستگی به دست آمد. علاوه بر این، بیشترین کاهش آبشستگی با قرار دادن صفحات مستغرق در فاصله ۲/۵ برابر قطر پایه از خط مرکزی پایه و در فواصل ۱ و ۱/۵ برابر قطر پایه مشاهده شد

که به ترتیب موجب کاهش ۳۰ و ۲۵ درصد آبشستگی موضعی اطراف پایه گردید.

۷-۲-۵- آستانه قربانی

حفاظت از آبشستگی موضعی توسط یک آستانه قربانی توسط Chiew and Lim (2003) مورد بحث قرار گرفت. این تحقیق نشان داد که شیب عمودی، فاصله آزاد بین آستانه و شمع، کجی جریان و اندازه آستانه، همگی برای راندمان حفاظت از آستانه قربانی بالادست مهم هستند. (Grimaldi et al., 2009) اشاره کردند که یک آستانه بستر پایین دست نیز در شرایط آستانه به کاهش آبشستگی موضعی کمک می‌کند. آن‌ها یک اقدام متقابل ترکیبی نیز پیشنهاد و آزمایش کردند که شامل یک شکاف و یک آستانه تخت است که در پایین دست پایه و مجاور آن قرار گرفته است. در بهترین پیکربندی، کاهش آبشستگی در جلوی پایه به طور متوسط به حدود ۴۵ درصد (به ترتیب حدود ۸۰ و ۹۰ درصد برای سطح آبشستگی و حجم) رسید. نتایج آن‌ها نشان داد که ترکیبی از شکاف و آستانه بستر می‌تواند یک اقدام متقابل مؤثر در برابر آبشستگی موضعی در پایه‌های پل باشد. با این حال، Wang et al. (2018) اظهار داشتند که یک سرریز مستغرق که در قسمت پایین دست یک شمع قرار گرفته است، اثربخشی را در کاهش عمق آبشستگی موضعی در شرایط بستر زنده افزایش می‌دهد. این پدیده مشابه یافته‌های صفحات مستغرق در شرایط بستر زنده است.

۷-۳- تحلیل و مقایسه انواع روش‌های کاهش و کنترل آبشستگی پایه پل

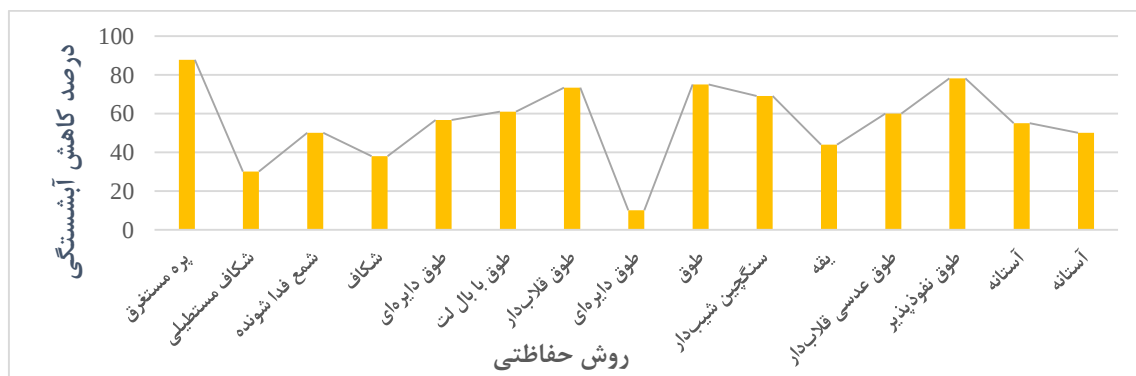
این مطالعه به تحلیل و مقایسه روش‌های کاهش آبشستگی پایه پل می‌پردازد تا مزایا، محدودیت‌ها و جنبه‌های اقتصادی هر رویکرد را به طور روشن و قابل استناد بیان کند. با توجه به تنوع شرایط مکانی، زمانی و محیطی پروژه‌های پل سازی، هر روش می‌تواند تأثیرات متفاوتی بر دوام سازه، ایمنی طراحی و هزینه‌های سرمایه‌گذاری و نگهداری داشته باشد (Sultana et al., 2026). نتیجه این بررسی، راهنمایی عملی برای مهندسان و مدیران پروژه است تا انتخاب بهینه و تصمیمات طراحی را مبتنی بر داده‌های کارآمد و ارزیابی‌های اقتصادی انجام دهند و ریسک‌های مرتبط با فرسایش پایه را بهبود بخشند. در جدول ۲ به مقایسه مزایا محدودیت‌ها و ابعاد اقتصادی انواع روش‌های کاهش و کنترل آبشستگی پایه پل پرداخته می‌شود و همچنین در جدول ۳ درصد کاهش عمق آبشستگی را با استفاده از روش‌های مختلف و در شکل ۸ درصد کاهش عمق آبشستگی در مطالعات مختلف آمده است.

جدول ۲-مقایسه انواع روش‌های کاهش و کنترل آبخستگی پایه پل

روش	مزایا	محدودیت	ابعاد اقتصادی	منابع
سنگ چین	۱- مقاوم در برابر سرعت بالای جریان ۲- امکان طراحی برای ترکیب با محیط طبیعی اطراف	۱- در جلوگیری از انواع آبخستگی بی‌اثر است، عمدتاً زمانی که جریان آب خیلی زیاد باشد یا رسوبات خیلی ریز باشند ۲- با تغییر الگوی جریان امکان اختلال در اکوسیستم آبی و آبریان را دارد	۱- اگر سنگ چین در نزدیکی یا در فاصله معقولی از محل قابل دسترسی نباشد، ممکن است از نظر مالی مقرون به صرفه نباشد ۲- در صورت عدم صرفه اقتصادی سنگ چین می‌توان از کیسه‌های پر شده با دوغاب استفاده کرد	De Vos et al. (2011, 2012); Ismael et al. (2015); Schendel et al. (2016); Wang et al. (2019); Fazeres-Ferradosa et al. (2021)
بلوک بتنی مفصلی	۱- امکان طراحی در اشکال و اندازه‌های مختلف برای پاسخ به نیازهای خاص ۲- نیاز به نگهداری کمتر به دلیل اینکه به راحتی از جای خود کنده یا خراب نمی‌شوند	۱- کاهش اثربخشی با افزایش سرعت جریان ۲- محافظت محدود از بالادست و پایین دست سازه هیدرولیکی زیرا بلوک‌ها فقط از ناحیه نزدیک محافظت می‌کنند ۱- نیاز به نگهداری مداوم توری‌های سیمی ۲- به دلیل اندازه محدود ممکن است برای جریان‌های با سرعت بالا مناسب نباشد	۱- یک روش پایدار و مقرون به صرفه است ۲- به مرور زمان ها جابه‌جا می‌شوند و اثربخشی آن‌ها در برابر آبخستگی کاهش می‌یابد	Abudallah Habib et al. (2021); Marandi (2022)
گابیون	۱- امکان هماهنگی با محیط اطراف و کاشت پوشش گیاهی بر روی آن ۲- جلوگیری از فرسایش و رسوب گذاری بیشتر در پایین دست	نیاز به حفاری کمتر در بستر و استفاده از سنگ‌های با اندازه کوچکتر و صرفه اقتصادی بیشتر نسبت به روش سنگچین	نیاز به حفاری کمتر در بستر و استفاده از سنگ‌های با اندازه کوچکتر و صرفه اقتصادی بیشتر نسبت به روش سنگچین	Clopper et al. (2007); Singh et al. (2022); Tang et al. (2022)
شکاف	ایجاد جت مستغرق که از تشکیل گردابه‌ها جلوگیری کرده و تلاطم اطراف پایه و فرسایش رسوبات بستر را کاهش می‌دهد	نیاز به بازرسی و نگهداری به دلیل امکان تجمع زباله در شکاف و در نتیجه کاهش اثر بخشی شکاف می‌شود	افزایش پایداری پل و کاهش هزینه‌های مقاوم سازی با ایجاد شکاف‌های زاویه دار مورب در پایه پل	Gaudio et al. (2012); Liang et al. (2015); Mahan et al. (2017); Obied and Khassaf (2019); Bestawy et al. (2020)
شمع‌های فداشونده	۱- برای نصب نیاز تجهیزات یا مهارت تخصصی ندارد ۲- از مواد در دسترس مانند چوب و سایر مواد دیگر ساخته می‌شوند ۳- سازگاری با شرایط مختلف محل، از جمله سرعت‌های مختلف آب، انواع رسوبات و شرایط خاک	۱- نیاز به تعویض دوره‌ای دارند که می‌تواند پرهزینه و زمان‌بر باشد ۲- طراحی محدود به دلیل شرایط محل، مصالح موجود و طراحی سازه اصلی	برای استفاده طولانی مدت مقرون به صرفه است و نیازی به تغییر در طراحی پایه پل ندارد	Chiew and Lim (2003); Tafarjnoruz et al. (2010); Kharbeche, (2022); Gaudio et al. (2012)
صفحات (پره‌های) مستغرق	۱- هزینه کم و نصب آسان ۲- تاثیر کم بر جریان رودخانه	۱- نیاز به نگهداری منظم دارد ۲- اثربخشی محدود در شرایط جریان بالا	۱- روش مقرون به صرفه برای پل‌های کوچک ۲- با تغییر الگوهای جریان، پایداری پایه پل را افزایش داده و عمق آبخستگی را به طور اقتصادی کاهش می‌دهد	Ghorbani and Kells (2008); Safaripour et al. (2022)

جدول ۳- درصد کاهش عمق آبشستگی با استفاده از روش‌های مختلف حفاظتی

منابع	نتایج	روش
Ghorbani and Kells (2008)	برای دو صفحه متصل به پایه، کاهش ۸۷/۷ درصدی در عمق آبشستگی در کنار پایه برای عمق جریان ثابت (یعنی ۱۵ سانتی‌متر)، زاویه ثابت صفحات (یعنی ۱۸/۵) حاصل شد	دو پره مستغرق متصل به پایه با ارتفاع، عمق جریان و جهت‌گیری‌های متفاوت
Gaudio et al. (2012)	کاهش ۳۰ درصدی عمق آبشستگی	شکاف مستطیلی
Wang et al. (2017)	کاهش عمق آبشستگی تا ۵۰ درصد در پایین دست	قرار دادن شمع‌های فداشونده در اطراف پایه
Hajikandi and Golnabi (2018)	به ترتیب کاهش ۳۸ و ۳۳ درصد از حداکثر عمق آبشستگی	شکاف مستقیم و شکاف Y شکل در پایه پل دایره‌ای
Qi et al. (2021)	کاهش حداکثر عمق آبشستگی موضعی در حدود ۱۰ درصد	پایه استوانه‌ای با طوق دایره‌ای با زاویه شیب صفر
Pandey et al. (2022)	کاهش آبشستگی ۵۰ تا ۷۵ درصد	قرار دادن صفحه طوق در اطراف پایه پل دایره‌ای در سطح بستر
Wang et al. (2019)	حداکثر راندمان ۵۶/۶ درصد با طوق دایره‌ای با عرض ۲/۵ و زاویه محافظتی ۳۶۰ درجه	طوق دایره‌ای با زوایای محافظتی مختلف در شرایط بستر زنده
Bestawy et al. (2020)	کارایی آن در کاهش عمق آبشستگی به ۶۱ درصد می‌رسد و پس از آن طوق با بال‌های ۴۵ درجه با کارایی ۵۰ درصد قرار دارد	طوق‌های با بال‌های لت، ۹۰ درجه و ۴۵ درجه در اطراف یک پایه دایره‌ای
Farooq et al. (2020)	طوق قلاب‌دار هشت‌ضلعی که روی بستر قرار داده شد، عمق آبشستگی را ۷۳/۳ درصد کاهش داد	طوق قلاب‌دار هشت‌ضلعی در اطراف یک پایه هشت‌ضلعی
Valela et al. (2022a, b)	کاهش ۸۱ درصدی عمق آبشستگی	سنگ‌چین با سطح شیب‌دار و ضخامت افزایش یافته در امتداد محیط
Izadinia and Heidarpour (2022)	کاهش ۴۴ درصدی عمق آبشستگی	بقه با سوراخ‌های شعاعی متصل به سیستم هوای تحت فشار
Farooq et al. (2023)	عمق آبشستگی را ۶۰ درصد کاهش داد	طوق عدسی قلاب‌دار برای یک پایه با مقطع عدسی
Gupta et al. (2023a, 2023b, 2023c)	عمق آبشستگی در اطراف پایه پل برای اشکال مختلف طوق، ۱۱ تا ۱۰۰ درصد کاهش می‌یابد	طوق ایرفویل
Valela et al. (2022a, b)	عمق آبشستگی را ۶۹ درصد کاهش داد و همچنین به‌طور مؤثر ریزش در زیر طوق را مهار کرد	طوق دایره‌ای با شیب بیرونی
Qi et al. (2023)	حداکثر عمق آبشستگی برای ۵۰ درصد تخلخل طوق، ۷۸/۱ درصد کاهش می‌یابد که بعداً کارایی طوق شروع به کاهش می‌کند	طوق نفوذپذیر
Movahedi et al. (2024)	عمق آبشستگی در جلوی پایه به ترتیب ۵۰ درصد و ۵۵ درصد برای پایه‌های تکی و دو پایه کنار هم کاهش می‌یابد. قرار دادن یک آستانه بستر پایین‌دست که با پایه تنظیم شده باشد، منجر به کاهش تقریباً ۳۰ درصد در عمق آبشستگی در جلوی پایه‌ها می‌شود	آستانه بستر پایین‌دست و پی پیوسته
Al-Rahoo and Alomari (2025)	کاهش ۵۰ درصد عمق آبشستگی	قرار دادن آستانه تخت منحنی در لبه بالادست کلاهک شمع



شکل ۸- درصد کاهش عمق آبشستگی در روش‌های حفاظتی مختلف

۸- روش‌های پیش‌بینی عمق آبخستگی پایه پل

پویایی آبخستگی موضعی تحت تأثیر عوامل متعددی قرار دارد و پیچیدگی آن، پیش‌بینی کمی را به یک چالش کلیدی در عمل مهندسی و تحقیقات علمی تبدیل می‌کند. در این بخش، به‌طور سیستماتیک مبانی نظری، شرایط قابل اجرا و پیشرفت تحقیقات مدل‌های پیش‌بینی موجود را با تمرکز بر تجزیه و تحلیل سه نوع روش: مدل‌های عددی مبتنی بر مکانیسم‌های هیدرودینامیکی، فرمول‌های پیش‌بینی تجربی و نیمه‌تجربی، کاربردهای نوآورانه تکنیک‌های یادگیری ماشینی و مقایسه مزایا و محدودیت‌های هر نوع روش بررسی می‌شود.

۸-۱- مدل‌سازی عددی و روش‌های یادگیری ماشین در

پیش‌بینی آبخستگی موضعی

۸-۱-۱- مدل تک فاز

پدیده آبخستگی موضعی، چالشی کلیدی در ایمنی مهندسی هیدرولیک است که روش‌های تحقیق سنتی در مواجهه با آن محدودیت دارند. روش‌های تحقیق سنتی، مانند آزمایش‌های مدل فیزیکی و فرمول‌های تجربی، از کاستی‌های هزینه بالا، اثرات آشکار مقیاس و کاربرد محدود رنج می‌برند، در حالی که روش‌های شبیه‌سازی عددی با تکیه بر مزایای منحصر به فرد خود به تدریج به یک ابزار تحقیقاتی مکمل مهم تبدیل شدند (Lai et al., 2022; Zhao, 2022). شبیه‌سازی عددی با استفاده از CFD، با حل دقیق پارامترهای میدان جریان سه‌بعدی، مکانیسم تشکیل چاله آبخستگی را آشکار و افق جدیدی در مطالعه این پدیده می‌گشاید. رویکرد تک‌فازی CFD، با تلفیق شبیه‌سازی هیدرودینامیکی (حل معادلات RANS) و مدل‌سازی مورفولوژی رسوب، انتقال رسوب و به‌روزرسانی دینامیکی بستر را تا رسیدن به تعادل آبخستگی شبیه‌سازی می‌کند (Roulund et al., 2005). این روش، ضمن حفظ دقت، کارایی محاسباتی را بهینه کرده و به راه‌حل فنی پیشرو مهندسی بدل شده است. تعامل دینامیکی بین ماژول هیدرودینامیکی و مورفولوژی رسوب، هسته اصلی این مدل‌ها را تشکیل می‌دهد. تنظیم دینامیکی ارتفاع بستر با مکانیزم لغزش ذره، صحت رسیدن به حالت تعادل آبخستگی را تضمین می‌نماید (Roulund et al., 2005).

۸-۱-۲- مدل دو فازی

مدل‌های جریان تک‌فازی سنتی با تکیه بر فرمول‌های تجربی، در شبیه‌سازی دقیق انتقال رسوب و تکامل بستر رودخانه به دلیل دشواری در توصیف تعاملات سیال-ذره، محدودیت دارند (Lee et al., 2016). در مقابل، مدل‌های دو فازی، با حل برهم‌کنش بین فاز سیال و ذرات رسوب، فرایندهای فیزیکی کلیدی مانند شروع حرکت، تعلیق و ته‌نشینی رسوبات و همچنین تغییرات توپوگرافی بستر را با دقت بالاتری شبیه‌سازی می‌کنند و ابزاری قابل اعتمادتر برای مطالعه آبخستگی موضعی فراهم می‌آورند. مدل‌های دو فازی بر اساس نحوه اتصال فازها به دو دسته اصلی اوپلری-لاگرانژی و اوپلری-تقسیم می‌شوند؛ در مدل اوپلری-لاگرانژی، فاز سیال به‌صورت پیوسته و با حل معادلات ناویر-استوکس در چارچوب اوپلری توصیف شده و ذرات رسوب به‌صورت گسسته با ردیابی مسیر در سیستم مختصات لاگرانژی، دینامیک پیچیده بین دو فاز را با دقت بالا شبیه‌سازی می‌کنند (Xiong et al., 2024).

۸-۱-۳- روش SPH

روش SPH به‌عنوان یک روش ذرات لاگرانژی بدون شبکه، مزایای منحصر به فردی در زمینه CFD دارد و به‌ویژه برای مسائل شبیه‌سازی با سطوح مرزی پیچیده مناسب است (Peng and Yin, 2025). در مقایسه با روش‌های سنتی شبکه، روش SPH دامنه محاسباتی را به گروهی از ذرات که دارای ویژگی‌های فیزیکی مانند چگالی، جرم و سرعت هستند، گسسته‌سازی می‌کند. این روش به‌صورت عددی بر اساس معادلات ناویر-استوکس حل می‌شود و به‌طور مؤثر از الزامات سخت‌گیرانه روش‌های شبکه در مورد جرم و چگالی شبکه اجتناب می‌کند. این روش در برخورد با مسائل تغییر شکل بزرگ سازگارتر است و می‌تواند فرایندهای حرکت، تبدیل و انتشار ذرات را با دقت بیشتری شبیه‌سازی کند (Zhang et al., 2024). در سال‌های اخیر، کاربرد روش SPH در تحقیقات آبخستگی عمیق‌تر شده و به تدریج به مسائل آبخستگی موضعی پیچیده‌تر گسترش یافته است. در مطالعه آبخستگی در تکیه‌گاه‌های پل استوانه‌ای، Zhang et al. (2024) به‌طور نوآورانه‌ای مدل جریان چندفازی SPH را ساخت، رسوب را به‌عنوان یک سیال غیریوتنی در نظر گرفت، روش تصفیه مرزی را با ادغام مدل رئولوژیکی هرشل-بالکلی-پاناستاسیو (HBP)، معیار دراگر-پراگر و معیار فرسایش شیلدز بهینه کرد و یک تکنیک تجسم آبخستگی جدید ایجاد کرد که تمایز بین

شمع و شبیه‌سازی بدنه آب از طریق SPH به‌طور دقیق بازتولید شدند. این مطالعه قابلیت اطمینان مدل را تأیید کرد و مکانیسم همبستگی بین جریان، گرداب و فرسایش خاک را آشکار کرد که درک نظری جدیدی از رفتار آبشستگی موضعی پایه‌های شمع ارائه داد. جدول ۴ مزایا و محدودیت‌های هر روش عددی آبشستگی موضعی و شرایط قابل اجرا را شرح می‌دهد.

سطح مرئی و سطح واقعی را محقق می‌کند. این مدل در بازسازی میدان جریان و شبیه‌سازی الگوی آبشستگی، به‌ویژه در ثبت دینامیک مقیاس ذرات و فرآیند انتقال رسوب، دقیق است. علاوه بر این، روش اتصال (Peng and SPH-DEM Yin, 2025) برای اولین بار برای شبیه‌سازی آبشستگی خاک دانه‌ای اطراف یک شمع دایره‌ای تحت شرایط جریان ثابت اعمال شد و پدیده‌های تغییر شکل بزرگ و آشفستگی با توصیف خاک دانه‌ای بدنه

جدول ۴- ارزیابی مقایسه‌ای رویکردهای مدل‌سازی عددی برای آبشستگی موضعی

شرایط قابل اجرا	محدودیت‌ها	مزایا	رویکرد مدل‌سازی
۱- پیش‌بینی ماکروسکوپی و طراحی مهندسی	۱- ناتوانی در ثبت مکانیسم‌های میکروسکوپی	۱- هزینه‌های محاسباتی نسبتاً پایین	مدل تک فاز مبتنی بر CFD
۲- مطالعات پارامتریک و مقایسه‌های جایگزین	۲- تکیه بر فرمول‌ها و پارامترهای تجربی	۲- پدیده‌های آبشستگی ماکروسکوپی را شبیه‌سازی می‌کند	
۱- ررسی مکانیسم		۳- فناوری بالغ و چارچوب انعطاف‌پذیر	
۲- سناریوهایی که نیاز به تعاملات دقیق دارند	۱- هزینه محاسباتی بسیار بالا	۱- مدل‌سازی مکانیسم‌های میکروسکوپی	
۳- شرایط انتقال رسوب کم تا متوسط	۲- تعداد محدود ذرات	۲- سینماتیک ذرات را ثبت می‌کند	مدل دوفازی اوپلری- لاگرانژی
مناسب برای شرایط انتقال رسوب با غلظت بالا	۱- ماهیت گسسته ذرات را نادیده می‌گیرد	۳- کوپلینگ واقعی سیال-ذره را در نظر می‌گیرد	
	۲- بر روابط سازنده تکیه دارد	۴- شامل تماس بین ذرات می‌شود	مدل دوفازی اوپلری- اوپلری
	۳- هزینه‌های محاسباتی بالا	۱- قابلیت مدل‌سازی برهمکنش دو فاز، سیال و رسوب، به‌عنوان یک محیط پیوسته	
جریان‌هایی با رابط‌های پیچیده	۱- هزینه‌های محاسباتی بالاتر	۲- کارایی محاسباتی برای سناریوهایی با غلظت رسوب بالا نسبت به DEM برتر است	روش SPH
۲- تحقق پیچیده‌تر شرایط مرزی		۱- در مدیریت تغییر شکل‌های بزرگ عالی است	
		۲- از مشکلات مربوط به شبکه (mesh) جلوگیری می‌کند	

۸-۱-۴- مدل‌های یادگیری ماشین

در سال‌های اخیر، یادگیری ماشین به‌عنوان رویکردی نوین، مزایای قابل‌توجهی در پیش‌بینی آبشستگی موضعی نشان داده است. این روش‌ها، برتری خود را نسبت به فرمول‌های تجربی سنتی و مدل‌های فیزیکی در شرایط پیچیده هیدرودینامیکی اثبات کرده‌اند، چرا که فرایند آبشستگی دارای مکانیسم‌های فیزیکی پیچیده، غیرخطی و چندمتغیره

است که با فرضیات ساده فرمول‌های سنتی قابل مدل‌سازی نیست. مطالعات (Abd El-Hady و Devi et al. (2024) و (Rady (2020) نشان می‌دهند که مدل‌های یادگیری ماشین قادر به استخراج روابط غیرخطی بین عمق آبشستگی و عوامل مؤثر بوده و عملکرد بهتری در دامنه‌های کاری مختلف ارائه می‌دهند. بررسی‌های مقایسه‌ای Baranwal and Das (2024) برتری مدل‌های یادگیری ماشین را در تعیین عمق

آبخستگی تکیه‌گاه‌های پل نسبت به رگرسیون سنتی تأیید می‌کنند. برای مثال، استفاده از برنامه‌نویسی ژنتیک (GP) و سیستم استنتاج عصبی-فازی تطبیقی (ANFIS) منجر به سازگاری بهتر با داده‌های تجربی شد. همچنین، مقایسه مدل‌هایی چون ANN-PSO، ANFIS، رگرسیون تطبیقی چندمتغیره اسپلاین (MARS) و M5Tree نشان داد که مدل M5Tree در محیط‌های آبخستگی بستر زنده، دقت پیش‌بینی بالاتری دارد. این نتایج، کارایی یادگیری ماشین را در پیش‌بینی آبخستگی تأیید کرده و تفاوت عملکرد الگوریتم‌های مختلف را در مسائل خاص برجسته می‌سازد. در کاربردهای عملی، الگوریتم ANFIS بهبود یافته با استفاده از بهینه‌سازی الهام گرفته از طبیعت، دقت پیش‌بینی را در شرایط موج پیچیده برای آبخستگی اطراف خطوط لوله به‌طور قابل توجهی افزایش داده است.

با وجود پتانسیل قابل توجه یادگیری ماشین در پیش‌بینی آبخستگی موضعی، چالش‌های کلیدی مانند وابستگی به داده، توانایی تعمیم و قابلیت تفسیر همچنان پابرجا هستند. تحقیقات کنونی عمدتاً از سه محدودیت رنج می‌برند: اولاً، وابستگی به داده و نمایندگی محدود؛ اگرچه استفاده از مدل‌های یادگیری ماشین برای تحلیل داده‌های میدانی (Kim et al., 2025) برای بهبود دقت پیش‌بینی عمق آبخستگی رو به افزایش است، توانایی تعمیم مدل به کیفیت و گستردگی داده‌های آموزشی وابسته است و کمبود داده‌های اندازه‌گیری میدانی واقعی، کاربرد مدل را به شدت محدود می‌کند (Choi and Choi, 2022). به‌ویژه در پیش‌بینی رویدادهای شدید و نادر که فقدان نمونه‌های آموزشی کافی منجر به پیش‌بینی‌های غیرقابل اعتماد می‌شود. ثانیاً، قابلیت تفسیر که ناشی از ماهیت جعبه سیاه مدل‌های مبتنی بر داده است؛ این مدل‌ها علی‌رغم دقت پیش‌بینی بالا، تفسیر فیزیکی ناکافی ارائه می‌دهند (Nandi et al., 2024). محدودیتی که به‌ویژه در کاربردهای مهندسی اهمیت دارد (Shamshirband et al., 2020) به‌طور خاص، هنگامی که مدل پیش‌بینی‌های نادرستی ارائه می‌دهد، عدم درک مکانیسم‌های داخلی آن، ردیابی علت اصلی خطا را دشوار می‌کند و چالش‌های مهمی را برای اشکال‌زدایی و بهینه‌سازی مدل ایجاد می‌کند. این نقص در تفسیرپذیری نه تنها بر قابلیت اطمینان مدل تأثیر می‌گذارد، بلکه مانع درک عمیق‌تر از سازگاری فرآیندهای فیزیکی نیز می‌شود. با هدف قرار دادن این محدودیت‌ها، سه جهت مهم توسعه گسترش یافته است: (۱) روش‌های

یادگیری ماشین با محدودیت فیزیک با معرفی محدودیت‌های سازگار با فیزیک (Najafzadeh and Oliveto, 2021) قابلیت اطمینان مدل را به‌طور قابل توجهی افزایش می‌دهند و رویکردهای جدیدی را برای پیش‌بینی آبخستگی ارائه می‌دهند. هسته چنین روش‌هایی در ادغام قوانین فیزیکی شناخته شده در فرآیندهای طراحی و آموزش مدل، هدایت مدل برای یادگیری راه‌حل‌های سازگار با قوانین فیزیکی و در نتیجه بهبود قابلیت پیش‌بینی نهفته است. به‌عنوان مثال (Valyrakis et al., 2011) از یک سیستم استنتاج فازی عصبی تطبیقی برای پیش‌بینی حرکت دانه درشت استفاده کردند که منعکس کننده رویکرد مدل‌سازی فرآیندهای فیزیکی است. مطالعات اخیر (Jiang et al., 2025) یادگیری ماشین اطلاعات فیزیکی (PIML) را برای حل مسائل پیچیده دینامیک سیالات مانند معادلات ناویر-استوکس به کار گرفته‌اند. تحقیقات آینده باید بر توسعه مدل‌های PIML برای ویژگی‌های اتصال چند میدان فیزیکی آبخستگی موضعی، به‌ویژه با تعبیه مستقیم معادلات دیفرانسیل جزئی هیدرودینامیک و دینامیک رسوب در معماری‌های شبکه عصبی برای ثبت بهتر ماهیت فیزیکی فرآیند آبخستگی تمرکز کند؛ (۲) کاربردهای فناوری دوقلوی دیجیتال: به‌عنوان مثال (Wang et al., 2024) یک سیستم سینک دیجیتال مبتنی بر الگوریتم‌های هوش مصنوعی ساخت که پایه و اساسی برای کاربرد این فناوری فراهم می‌کند؛ و (۳) مطالعه قوانین تکامل زمانی: به‌عنوان مثال (Zhang et al., 2023) مدل MGPP را برای تحقق پیش‌بینی دینامیکی عمق آبخستگی در طول زمان توسعه داد. تحقیقات آینده باید بر بهبود تفسیرپذیری مدل، افزایش توانایی تعمیم و تسهیل ترجمه نتایج آزمایشگاهی به عمل مهندسی تمرکز کند و به‌طور موثر مسئله مهندسی پیچیده آبخستگی موضعی سازه‌های آبی را حل کند. در جدول ۵ به مقایسه روش‌های یادگیری ماشین برای پیش‌بینی آبخستگی موضعی که توسط محققان تاکنون انجام شده، پرداخته می‌شود.

جدول ۵-مقایسه روش‌های یادگیری ماشین برای پیش‌بینی آب‌شستگی موضعی

شرایط قابل اجرا	محدودیت‌ها	مزایا	مدل‌های یادگیری ماشین
سناریوهایی که در آن‌ها مجموعه داده‌ها بزرگ و نسبت سیگنال به نویز بالا است، و در جایی که دقت پیش‌بینی بسیار بالایی مورد نظر است	۱- مشکل جعبه سیاه ۲- وابستگی شدید به داده‌ها ۳- خطر بیش‌برازش (overfitting)	۱- قابلیت نگاشت غیرخطی قدرتمند ۲- عملکرد خوب در پیش‌بینی ۳- می‌تواند توسط الگوریتم‌های بهینه‌سازی یا روش‌های ادغام بهبود یابد	شبکه‌های عصبی ANN، ANFIS و غیره Dang et al. (2021)
مجموعه داده‌های کوچک تا متوسط با ابعاد ویژگی بالا	۱- نیاز به تنظیم پارامترها دارد ۲- برخی ویژگی‌های جعبه سیاه ۳- وابسته به داده‌ها	۱- قابلیت اعمال در انواع و شرایط مختلف آب‌شستگی ۲- برای مواجهه با روابط غیرخطی پیچیده مناسب است ۱- شهودی و قابل تفسیر	ماشین‌های بردار پشتیبان SVM، SVR و غیره Choi and Choi (2022); Nandi et al. (2024)
سناریوهایی که در آن‌ها تفسیر فیزیکی یا تحلیل تصمیم‌گیری نتایج پیش‌بینی مورد نیاز است	۱- بیش‌برازش احتمالی ۲- عملکرد تحت تأثیر دامنه داده‌ها قرار می‌گیرد ۳- تفسیرپذیری محدود	۲- قادر به مدیریت روابط غیرخطی ۳- نیازی به پیش‌پردازش گسترده داده‌ها ندارد ۴- عملکرد پیش‌بینی خوب	مدل‌های مبتنی بر درخت DT، M5Tree، M5MT، GTB، REPTree و غیره Najafzadeh and Oliveto, (2021); Wang et al. (2024); Sreedhara et al. (2021)
وظایف مختلف پیش‌بینی آب‌شستگی با الزامات بسیار بالا برای دقت پیش‌بینی	۱- الزامات بهینه‌سازی پارامتر ۲- خطر بالقوه‌ی بیش‌برازش ۳- عملکرد ممکن است با شرایط خاص متفاوت باشد	۱- عملکرد پیش‌بینی برتر ۲- قادر به مدیریت روابط غیرخطی پیچیده و تعاملات متغیر ۳- طیف گسترده‌ای از کاربردها	روش‌های تقویت گروهی RF، مدل تقویت (AdaBoost)، CatBoost، XGBoost، BRT، LightGBM، SGB و غیره Nandi et al. (2024); Wang et al. (2024); Kumar and Afzal (2024)
هدف تحقیقات اکتشافی، کشف قوانین فیزیکی جدید و مختصر یا فرمول‌های تجربی از داده‌ها است	۱- بهینه‌سازی پارامتر پیچیده و از نظر محاسباتی پرهزینه ۲- وابستگی زیاد به داده‌ها	۱- فرمول‌های پیش‌بینی صریح تولید می‌کند ۲- پرداختن به مسائل پیچیده غیرخطی ۳- عملکرد پیش‌بینی برتر ۴- قابل اجرا برای طیف وسیعی از شرایط آب‌شستگی و انواع سازه‌ها	مدل‌های الگوریتم ژنتیک GP، EPR، MGGP و غیره Abd El-Hady Rady (2020); Najafzadeh and Oliveto, (2021); Zhang et al. (2023)
وقتی عملکرد مدل‌های منفرد موجود، الزامات مربوط به مسائل خاص را برآورده نمی‌کند، باید به دنبال پیشرفت در عملکرد بود	۱- تقاضای بیشتر برای داده‌ها ۲- نیاز به تنظیم پارامترها دارد ۳- خطر بیش‌برازش	۱- دقت پیش‌بینی به‌طور قابل توجهی بهبود یافته ۲- در برخورد با روابط غیرخطی پیچیده عالی عمل می‌کند. ۳- دامنه کاربرد وسیع‌تر	مدل‌های پیشرفته مبتنی بر الگوریتم‌های بهینه‌سازی ANN-PSO، ANFIS-GA، PSO، GMDH-PSO، RFO-XGBoost، XGBoost، RS، RPSO-XGBoost و REPTree و غیره Dang et al. (2021); Kumar and Afzal (2024)

اما این امر منوط به دسترسی به داده‌های با کیفیت بالا و استفاده از تکنیک‌های پیشرفته برای مدیریت عدم قطعیت و تفسیرپذیری است. در جدول ۶ برای بررسی و تحلیل رویکردهای مدل‌سازی عددی و سایر روش‌ها، ارزیابی مقایسه‌ای شامل میزان دقت هر روش و محدودیت‌ها و دامنه کاربرد و عدم قطعیت برای آب‌شستگی موضعی آمده است.

مدل‌های عددی پیچیده‌تر مانند اوپلری-لاگرانژی و SPH، به‌طور بالقوه عدم قطعیت کمتری نسبت به فرمول‌های تجربی دارند، زیرا مکانیسم‌های فیزیکی را با دقت بیشتری مدل می‌کنند. با این حال، این مدل‌ها خود دارای عدم قطعیت‌های ناشی از روش گسسته‌سازی، انتخاب پارامترها و دقت ورودی‌ها هستند. مدل‌های ML پتانسیل کاهش عدم قطعیت را دارند،

جدول ۶- ارزیابی مقایسه‌ای رویکردهای مدل‌سازی عددی و سایر روش‌ها برای آبشستگی موضعی

رویکرد مدل‌سازی	دقت	محدودیت‌ها	دامنه کاربرد	عدم قطعیت
مدل تک فاز CFD	متوسط تا خوب (برای پدیده‌های ماکروسکوپی)	ناتوانی در ثبت مکانیسم‌های میکروسکوپی، اتکا به فرمول‌ها و پارامترهای تجربی، عدم نمایش دقیق برهم‌کنش سیال-رسوب	پیش‌بینی ماکروسکوپی و طراحی مهندسی، مطالعات پارامتریک، مقایسه‌های جایگزین، زمانی که هزینه‌ی محاسباتی عامل تعیین‌کننده است	ناشی از فرمول‌های تجربی مورد استفاده، ساده‌سازی‌های مدل و ماهیت پیوسته سیال. به‌طور کلی بالاتر از مدل‌های دوفازی دقیق
مدل دوفازی اویلری-لاگرانژی	بالا (برای نمایش جزئیات سیال-ذره)	هزینه محاسباتی بسیار بالا، محدودیت در تعداد ذرات قابل شبیه‌سازی، مناسب نبودن برای غلظت‌های بسیار بالای رسوب	بررسی مکانیسم‌های دقیق فرسایش، سناریوهایی که نیاز به تعاملات دقیق سیال-ذره دارند، شرایط انتقال رسوب با غلظت کم تا متوسط	ناشی از مدل‌سازی تفاهم بین ذرات، معادلات حاکم بر هر فاز و روش گسسته‌سازی. به‌طور کلی کمتر از مدل تک‌فاز، اما نیازمند تحلیل دقیق‌تر
مدل دوفازی اویلری-اویلری	متوسط تا خوب (برای غلظت‌های بالای رسوب)	نادیده گرفتن ماهیت گسسته ذرات، اتکا به روابط سازنده، هزینه‌های محاسباتی بالا (اما کمتر از DEM/EL برای غلظت بالا)	مناسب برای شرایط انتقال رسوب با غلظت بالا، شبیه‌سازی کلی جریان‌های دو فازی	ناشی از روابط سازنده و تقریب زدن رفتار دو فاز به‌عنوان پیوسته. عدم قطعیت در توصیف دقیق برهم‌کنش بین فازها
روش SPH	بالا (برای مدیریت تغییر شکل‌های بزرگ و سطوح پیچیده)	هزینه‌های محاسباتی بالا، تحقق پیچیده‌تر شرایط مرزی، نیاز به پارامترهای تنظیم خاص (مانند smoothing length)	جریان‌هایی با رابط‌های پیچیده، مسائل با تغییر شکل‌های بزرگ دامنه، شبیه‌سازی دقیق دینامیک ذرات در سیالات	ناشی از انتخاب اندازه هسته هموارسازی (smoothing kernel)، روش گسسته‌سازی، و تقریب معادلات
فرمول‌های تجربی/نیمه‌تجربی	پایین تا متوسط	اتکا به داده‌های خاص، دامنه کاربرد محدود، نادیده گرفتن بسیاری از پارامترهای تأثیرگذار، عدم نمایش مکانیسم‌ها	تخمین‌های سریع و اولیه در مراحل طراحی، زمانی که دقت بالا مورد نیاز نیست	بالا؛ عمدتاً ناشی از محدودیت‌های داده‌های توسعه و ساده‌سازی‌های فیزیکی
مدل‌های یادگیری ماشین (ML)	بالقوه بالا (با داده‌های کافی)	وابستگی شدید به داده، چالش تعمیم‌پذیری، تفسیرناپذیری (جعبه سیاه)، نیاز به داده‌های حجیم و با کیفیت	زمانی که داده‌های کافی برای آموزش مدل وجود دارد، نیاز به پیش‌بینی سریع، شناسایی الگوهای پیچیده	بالا؛ ناشی از کیفیت و کمیت داده‌های آموزشی، انتخاب مدل، و ماهیت جعبه سیاه برخی مدل‌ها. کمی‌سازی آن نیازمند روش‌های تخصصی (مانند PIML یا بیزی) است

۸-۲- معادلات پیش‌بینی آبشستگی موضعی

آبشستگی موضعی یک فرآیند پویا از فرسایش رسوبات اطراف سازه‌ها توسط آب است که ممکن است پایداری فونداسیون سازه‌ها را به خطر بیندازد یا حتی منجر به آسیب شود، بنابراین پیش‌بینی دقیق عمق آبشستگی از اهمیت کلیدی برای طراحی ایمن و حفاظت از پروژه‌های فراساحلی برخوردار است. پیش‌بینی سنتی آبشستگی موضعی عمدتاً به فرمول‌های تجربی به‌دست‌آمده از آزمایش‌های مدل آزمایشگاهی در مقیاس کوچک متکی است. با این حال، هنگامی که این فرمول‌های تجربی در پروژه‌های مهندسی واقعی اعمال می‌شوند، به‌ویژه

هنگامی که با داده‌های میدانی تأیید می‌شوند، انحرافات قابل توجهی وجود دارد (Nandi and Das, 2025). Vonkeman and Basson (2019) با مقایسه ۳۰ فرمول تجربی دریافتند که این فرمول‌ها تفاوت‌های قابل توجهی در پیش‌بینی عمق آبشستگی تکیه‌گاه‌های پل دارند و اکثر فرمول‌ها تمایل به تخمین بیش از حد عمق واقعی آبشستگی دارند. این محدودیت عمدتاً از چهار عامل ناشی می‌شود: (۱) مسائل مربوط به اثر مقیاس: فرمول‌های موجود عمدتاً مبتنی بر آزمایش‌های آزمایشگاهی در مقیاس کوچک هستند که قادر به شبیه‌سازی کامل دینامیک پیچیده آب-رسوب در محیط‌های دریایی واقعی نیستند. مهم‌تر از آن، به دلیل محدودیت‌های مقیاس زمانی و

آبشستگی و تنوع عوامل محیطی به طور کامل تعیین نشده است، که منجر به مدل هایی می شود که هنگام اعمال در مقیاس ها یا سناریوها، ناپایداری قابل توجهی را نشان می دهند (Sui et al., 2023). تحقیقات آینده باید بر بررسی مکانیسم اتصال چند مقیاسی بین هیدرودینامیک و دینامیک رسوب، آشکار کردن فرآیند میکرو دینامیک آبشستگی موضعی در عمق و ترویج تبدیل مدل پیش بینی از آمار تجربی به مکانیسم های فیزیکی تمرکز کند و پایه نظری محکم تر و پشتیبانی فنی بیشتری را برای طراحی ایمن مهندسی سواحل فراهم کند. در جدول ۷ به مقایسه فرمول های تجربی برای پیش بینی عمق آبشستگی تعادلی در اطراف سازه های مختلف پرداخته می شود.

در شکل ۹، قابلیت پیش بینی معادلات برای نسبت عرض یقه به بستر (b_c/b) مختلف در ارتفاع های یقه متفاوت بررسی شده است. معادله Pandey et al. (2022) در شکل ج-۹ کمترین حساسیت را به تغییرات b_c/b نشان می دهد. معادلات Kumar et al. (1999) و Jahangirzadeh et al. (2014) در شکل الف-۹ روند افزایشی بازده با b_c/b را نشان می دهند و پیش بینی های Jahangirzadeh et al. (2014) محافظه کارانه تر است. در حالات یقه بالا و پایین بستر، معادله Pandey et al. (2022) نیز حساسیت پایینی دارد و معادله Kumar et al. (1999) روند افزایشی بازده را با b_c/b نشان می دهد. این روند افزایشی ناشی از گسترش ناحیه حفاظتی در برابر آبشستگی است و واگرایی پیش بینی ها پس از $b_c/b = 2.5$ محدودیت مدل ها را نمایان می سازد. شکل ب-۹ نیز معادله Farooq et al. (2020) را برای عرض های یقه و ارتفاع قلاب های متفاوت بررسی کرده و بازده بالاتر برای یقه های بزرگتر و تأثیر قابل توجه افزایش ارتفاع قلاب در عرض های بزرگ را نشان می دهد. در شکل د-۹، بازده های مشاهده شده (از منابع مختلف) با بازده های محاسبه شده توسط معادلات Kumar et al. (1999)، Jahangirzadeh et al. (2014) و Pandey et al. (2022) مقایسه شده اند. معادله Jahangirzadeh et al. (2014) بازده را بیش از حد تخمین زده و معادله Pandey et al. (2022) کمتر از حد تخمین زده است. با وجود قرارگیری بخش قابل توجهی از داده ها در محدوده خطای ۲۰ درصد پراکندگی داده ها و خطای پیش بینی ها، عدم قطعیت هایی را نشان می دهد. معادله Kumar et al. (1999) نیز خطای قابل توجهی در پیش بینی بازده های بالا و پایین داشته است. در جدول ۸ معادلات تجربی پیش بینی عمق آبشستگی به منظور مقایسه دامنه کاربرد، محدودیت ها و معرفی پارامترهای مهم آمده است.

مکانی آزمایشگاه ها، کل فرآیند آبشستگی را نمی توان به طور دقیق شبیه سازی کرد، که منجر به اندازه گیری های میدانی عمق آبشستگی تعادلی می شود که اغلب مقادیر پیش بینی شده حاصل از آزمایش های آزمایشگاهی را بیش از حد یا کمتر از حد واقعی تخمین می زند. علاوه بر این، فرآیند تشکیل عمق آبشستگی تعادلی ممکن است در واقعیت به چندین سال یا حتی بیشتر نیاز داشته باشد، که تفاوت های بین شرایط آزمایشگاهی و محیط واقعی را بیشتر برجسته می کند (Sui et al., 2023).

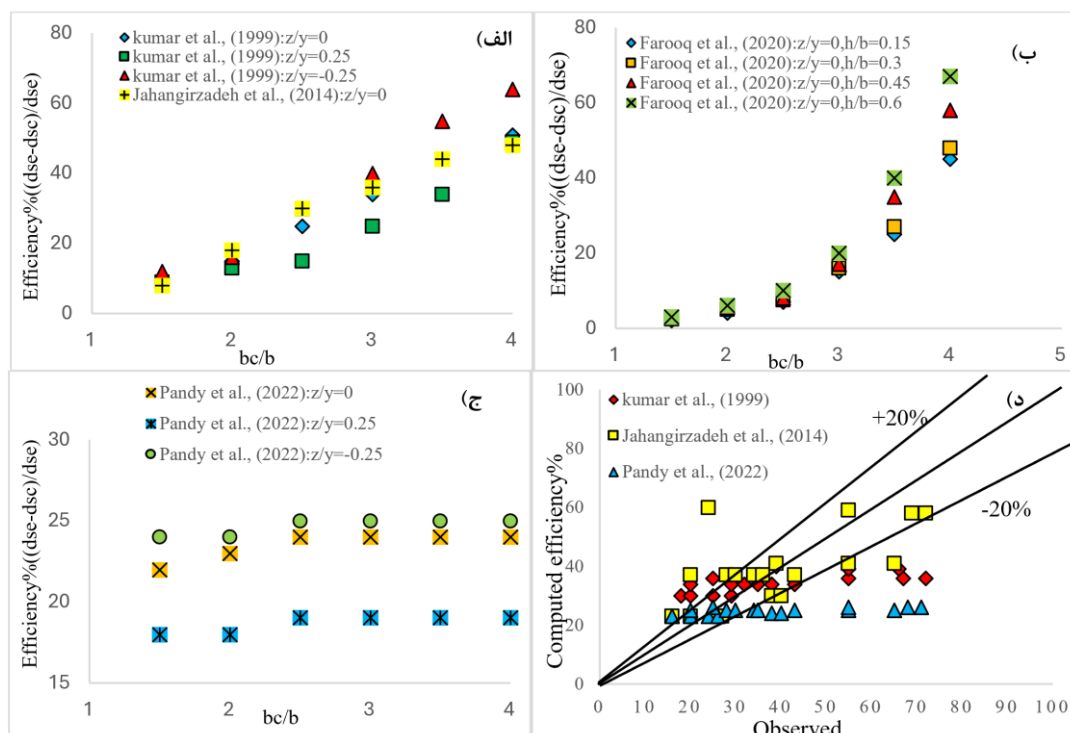
(۲) مبانی نظری بیش از حد ساده شده: فرمول ها معمولاً جریان یکنواخت پایدار، ساختارهای استوانه ای ایده آل و بستر ماسه ای یکنواخت را فرض می کنند، در حالی که محیط های واقعی (رودخانه ها و دریاها) شامل کوبلینگ موج-جریان، مورفولوژی های ساختاری پیچیده و رسوبات غیر یکنواخت بستر دریا هستند. این ساده سازی ها مکانیسم های فیزیکی زیربنای فرمول ها را به شدت تضعیف می کنند و مدل های موجود قادر به ثبت کافی تعاملات بین عوامل متعدد نیستند (Nandi et al., 2024).

(۳) سازگاری ناکافی با سازه های پیچیده: فرمول های موجود در درجه اول تحت شرایط ساده شده برای شمع های منفرد استخراج می شوند، اما مهندسی دریا به طور گسترده از سازه های پیچیده ای مانند گروه های شمع استفاده می کند که اثرات تداخل گردابه در آن ها می تواند منجر به تفاوت های قابل توجهی در عمق آبشستگی و توپوگرافی در مقایسه با شمع های منفرد شود. این پدیده با اندازه گیری های میدانی و شبیه سازی های عددی تأیید شده است (Baghbadorani et al., 2018). (۴) کاربرد محدود: اکثر فرمول ها بر اساس داده های تجربی یا مشاهدات میدانی خاص هستند. هنگامی که در شرایطی فراتر از محدوده مجموعه داده های اصلی اعمال می شوند، دقت پیش بینی به طور قابل توجهی کاهش می یابد و کاربردپذیری تا حد زیادی محدود می شود (Nandi and Das, 2025). به طور خاص، این فرمول ها در رویدادهای شدید بسیار گذرا و به شدت غیرخطی مانند طوفان ها و سونامی ها کاملاً بی اثر هستند و بنابراین نمی توان از آنها برای پیش بینی چنین آبشستگی فاجعه باری استفاده کرد (Jazaeri et al., 2024).

اگرچه پیشرفت های قابل توجهی در تحقیقات فعلی در مورد فرمول های پیش بینی آبشستگی موضعی حاصل شده است، اما هنوز چندین مشکل کلیدی باید حل شوند. اکثر فرمول های بهبود یافته موجود تنها با آزمایش های خاص یا داده های میدانی محدود اعتبارسنجی شده اند و جهانی بودن آنها هنوز نیاز به تأیید بیشتر دارد. علاوه بر این، پیچیدگی بالای فرآیند

جدول ۷- مقایسه فرمول‌های تجربی برای پیش‌بینی عمق آبخستگی تعادلی در اطراف سازه‌های مختلف

شرایط قابل اجرا	محدودیت‌ها	مزایا	فرمول/مدل
۱- مناسب برای پایه‌های پل با هندسه ساده	۱- پیش‌بینی داده‌های میدانی اغلب عمق آبخستگی را بیش از حد تخمین می‌زند	۱- برای نتایج پیش‌بینی داده‌های آزمایشگاهی عملکرد خوبی دارد	معادله HEC-18
۲- عمدتاً برای شرایط آبخستگی آب زلال مناسب است	۲- دقت پیش‌بینی عمق آبخستگی برای شمع‌های پیچیده پایین است	۲- پشتیبانی داده‌ها: بر اساس حجم زیادی از داده‌های آزمایشگاهی برازش داده شده است	Arneson et al. (2012)
۱- مناسب برای پایه‌های پل با هندسه ساده	۱- دقت پیش‌بینی نسبتاً پایین و اغلب بیش از حد تخمین زده می‌شود	۱- خواص رسوب را در نظر می‌گیرد	معادله FDOT
۲- عمدتاً برای شرایط آبخستگی آب زلال مناسب است	۲- محدودیت‌های نظری در برخورد با اسکله‌های پیچیده	۲- قابل اجرا به اشکال مختلف	Sheppard and Renna (2005)
۱- معادله ۶۵-۲ عموماً عملکرد بهتری نسبت به ۶۵-۱ R دارد	۱- تخمین کمتر از حد واقعی عمق آبخستگی برای داده‌های آزمایشگاهی (به‌ویژه برای شرایط آب زلال)	۱- در داده‌های میدانی (به‌ویژه در شرایط بستر زنده) عملکرد خوبی دارد	Qi et al. (2016)
۲- معادله ۶۵-۲ برای پایه‌های با قطر متوسط (۵ تا ۱۵ متر) یا نسبت‌های متوسط D / D_{50} توصیه می‌شود	۲- تخمین بیش از حد عمق آبخستگی برای تکیه‌گاه‌های با قطر بزرگ و نسبت‌های بزرگ تکیه‌گاه-رسوب	۲- تأثیر اندازه دانه‌های رسوب را در نظر می‌گیرد	
سازه‌های پایه پل پیچیده با پارامترهای هندسی مختلف	۱- داده‌های جامعی در مورد پارامترهای هندسی پایه‌های پل و شرایط جریان آب مورد نیاز است ۲- محاسبه نسبتاً پیچیده	۱- دقت بالاتر و خطای مطلق کمتر در پیش‌بینی عمق آبخستگی ۲- سازه‌های اسکله پیچیده را در نظر می‌گیرد	معادله امینی باغبادرانی Baghbadorani et al. (2018)
۱- اسکله‌های استوانه‌ای در آب زلال	۱- ممکن است در کاربردهای عملی، عمق آبخستگی را کمی بیش از حد تخمین بزند	۱- دقت بالایی را تحت شاخص‌های آماری متعدد نشان می‌دهد	معادله حمیدی فر Hamidifar et al. (2021)
۲- قابل استفاده هم در آزمایشگاه و هم در مزرعه	۲- باید همراه با معادلات جریان بحرانی خاص استفاده شود	۲- حساسیت کم به نرخ جریان بحرانی و کمتر تحت تأثیر خطاها در تخمین نرخ جریان بحرانی	
۱- شمع‌های منفرد در محیط شنی	نوع رسوب محدود	۱- از اثرات مقیاس جلوگیری می‌کند	معادله سویی Sui et al. (2023)
۲- محدوده عدد رینولدز خاص		۲- اثر عدد رینولدز را در نظر می‌گیرد	
۱- برای اندازه ذرات و ساختار نسبتاً مشخص	۱- درک عمیق‌تری از نفوذپذیری آشفته مورد نیاز است	۱- میرایی طیف انرژی آشفته با مبنای نظری در نظر گرفته شده است	معادله کراولی Crowley et al. (2020)
۲- با داده‌های ضریب نفوذ آشفته پشتیبانی می‌شود	۲- در مقادیر پایین d / D_{50} نیاز به بهبود دارند	۲- بررسی صریح‌تر ویژگی‌های اندازه ذرات	
۱- شرایط شستشوی با آب تمیز	۱- قابلیت کاربرد در مورد ماسه ریزدانه نیاز به تأیید بیشتر دارد	۱- از وابستگی به مفهوم عمق آبخستگی تعادلی جلوگیری می‌کند	معادله تانگ Tang et al. (2023)
۲- بسترهای شنی غیریکنواخت	۲- دقت در شدت جریان کم باید بهبود یابد	۲- انعطاف‌پذیری و تحمل‌پذیری خطای بهتری را فراهم می‌کند	



شکل ۹- تغییرات بازده کاهش آبشستگی با عرض یقه برای یقه با شکل دایره‌ای و هشت‌ضلعی قلاب‌دار با ارتفاع‌های مختلف قلاب با توجه به معادلات مختلف

جدول ۸- معادلات تجربی پیش‌بینی عمق آبشستگی به منظور مقایسه دامنه کاربرد، محدودیت‌ها و معرفی پارامترهای مهم

منبع	محدودیت‌ها دامنه کاربرد	توضیحات	رابطه
Hancu (1971)	۱- برای آبشستگی اطراف پایه پل در شرایط جریان نسبتاً یکنواخت. ۲- وابسته به نسبت V/V_c است و عملاً برای جریان نزدیک به آستانه حرکت رسوب به کار می‌رود ۳- معمولاً برای رسوبات غیرچسبنده استفاده می‌شود	y_s : عمق آبشستگی؛ b : عرض پایه پل؛ V : متوسط سرعت جریان؛ V_c : سرعت بحرانی؛ g : شتاب ثقل	$y_s = 2.42b(2\frac{V}{V_c} - 1)(\frac{V_c^2}{gb})^{0.33}$
Breusers et al. (1977)	۱- رابطه به زاویه حمله جریان حساس است ۲- رابطه بیشتر برای پایه‌های منفرد و شرایط آزمایشگاهی/میدانی با جریان نسبتاً منظم گزارش شده است	y_s : عمق آبشستگی؛ b : عرض پایه پل؛ f : ضریب وابسته به نسبت سرعت جریان به سرعت بحرانی؛ K_s : ضریب تصحیح برای شکل دماغه پایه پل؛ K_θ : ضریب تصحیح برای جریان با زاویه حمله؛ H : عمق آب	$y_s = bfK_sK_\theta(2\tanh\frac{H}{b})$ $f = 0 \quad \frac{V}{V_c} \leq 0.5$ $f = 2\frac{V}{V_c} - 1 \quad 0.5 < \frac{V}{V_c} \leq 1$ $f = 1 \quad \frac{V}{V_c} > 1$
Jain and Fisher (1979)	۱- بر پایه عدد فرود بحرانی و تفاوت آن با عدد فرود جریان تنظیم شده است ۲- برای رسوبات غیرچسبنده و شرایط زلال مناسب‌تر است ۳- رابطه به شرایط نزدیک به بحرانی حساس است	y_s : عمق آبشستگی؛ b : عرض پایه پل؛ Fr : عدد فرود جریان؛ Fr_c : عدد فرود بحرانی؛ H : عمق آب	$y_s = 2b(Fr - Fr_c)0.25(\frac{H}{b})^{0.5}$ $y_s = 1.85b(Frc)0.25(\frac{H}{b})^{0.3}$ $Fr - Fr_c > 2$ $Fr - Fr_c < 0$ $0 < Fr - Fr_c < 2$ $Frc = \frac{V_c}{\sqrt{gH}}$
Jain (1981)	۱- نسخه ساده‌شده‌ای از روابط مبتنی بر عدد فرود بحرانی است. ۲- بیشتر برای رسوبات غیرچسبنده مناسب است ۳- وابسته به نسبت سرعت جریان به سرعت بحرانی و همچنین نسبت H/b است.	y_s : عمق آبشستگی؛ b : عرض پایه پل؛ Frc : عدد فرود بحرانی؛ H : عمق آب	$y_s = 1.84b(Frc)0.25(\frac{H}{b})^{0.3}$
Khalfin (1983)	۱- برای پایه‌های پل در جریان باز و شرایطی که اثر عمق نسبی مهم است استفاده می‌شود. ۲- وجود توان N نشان می‌دهد رابطه برای دامنه مشخصی از هندسه و جریان تنظیم شده است. ۳- بهتر است برای رسوبات غیرچسبنده در نظر گرفته شود.	y_s : عمق آبشستگی؛ b : عرض پایه پل؛ V : متوسط سرعت جریان؛ V_c : سرعت بحرانی؛ H : عمق آب؛ g : شتاب ثقل؛ N : ضریب وابسته به نسبت عمق آب به عرض پایه	$y_s = 8.96b(2\frac{V}{V_c} - 1)(\frac{H}{b})^{1.43}(\frac{V^2}{gH})^N$ $N = 0.83(\frac{H}{b})^{0.34}$

منبع	محدودیت‌ها دامنه کاربرد	توضیحات	رابطه
Melville and Sutherland (1988)	۱- رابطه بر پایه مجموعه‌ای از ضرایب اصلاحی است؛ بنابراین برای هندسه‌های مختلف پایه و شرایط متفاوت رسوب قابل تنظیم است ۲- ضریب K_d نشان می‌دهد رابطه به اندازه رسوب نسبت به عرض پایه حساس است. ۳- معمولاً برای رسوبات غیرچسبنده استفاده می‌شود ۴- اگر جریان یا هندسه خارج از بازه آزمایش‌های اصلی باشد، دقت کاهش می‌یابد	γ_s : عمق آبخستگی؛ b : عرض پایه پل؛ K_L : ضریب سرعت؛ V : متوسط سرعت جریان؛ V_c : سرعت بحرانی؛ V_a : سرعت متوسط جریان ورودی؛ K_H : ضریب وابسته به نسبت عمق آب به عرض پایه؛ H : عمق آب؛ K_d : ضریب وابسته به نسبت عرض پایه به قطر متوسط رسوب؛ d_{50} : قطر میانه ذرات رسوب؛ K_σ : ضریب دانه‌بندی رسوبات؛ K_s : ضریب شکل دماغه پایه؛ K_α : ضرایب هم‌راستایی	$y_s = K_L K_H K_d K_\sigma K_s K_b$ $K_L = 2.4 \frac{V - (V_a - V_c)}{V_c} \frac{V - (V_a - V_c)}{V_c}$ $K_L < 1$ $K_L = 2.4 \frac{V - (V_a - V_c)}{V_c} > 1$ $K_H = 1 \frac{H}{b} > 2.6$ $\frac{H}{b} < 2.6 K_H = 0.78 \left(\frac{H}{b}\right)^{0.255}$ $K_d = 1 \frac{b}{d_{50}} > 25$ $K_d = 0.57 \log \left(2.24 \frac{b}{d_{50}}\right) \frac{b}{d_{50}} < 25$
Gao et al. (1993)	۱- برای شرایط آب زلال ($n = 1$) به کار می‌رود ۲- رابطه به سرعت بحرانی اصلاح شده V'_c وابسته است، بنابراین برای شرایط نزدیک به آستانه حرکت رسوب مناسب‌تر است ۳- برای پایه پل در جریان باز و رسوبات غیرچسبنده توسعه یافته است ۴- به قطر میانه رسوب d_{50} و ابعاد پایه حساس است	γ_s : عمق آبخستگی؛ b : عرض پایه پل؛ H : عمق آب؛ d_{50} : قطر میانه ذرات رسوب؛ V : متوسط سرعت جریان؛ V_c : سرعت بحرانی؛ V'_c : سرعت بحرانی اصلاح شده؛ n : توان وابسته به شرایط آب (آب زلال یا حمل رسوب). K_η : ضریب بر اساس قطر رسوب. K_ξ : ضریب شکل	$y_s = K_\eta K_\xi b^{0.6} H^{0.15} d_{50} - 0.07 \left(\frac{V - V_c}{V_c - V_c}\right)^n$ $n = 1$ $K_\eta = 0.46 d_{50}^{-0.068}$ $K_\xi = \text{تأثیر شکل پایه و زاویه (برخورد جریان)}$ $V_c' = 0.645 V_c \left(\frac{d_{50}}{b}\right)^{0.053}$
Melville (1997)	۱- برای آبخستگی موضعی پایه پل با در نظر گرفتن اثرات هندسه پایه، هندسه کانال، دانه‌بندی رسوب و هم‌راستایی جریان ۲- رابطه به صورت مجموعه‌ای از ضرایب اصلاحی است و برای طیف وسیعی از شرایط هندسی طراحی شده است. ۳- ضریب K_{Hb} نشان می‌دهد نسبت b/H یکی از پارامترهای کلیدی اعتبار رابطه است ۴- به طور معمول برای رسوبات غیرچسبنده و جریان باز استفاده می‌شود	γ_s : عمق آبخستگی؛ b : عرض پایه پل؛ H : عمق آب؛ K_s : ضریب شکل دماغه پایه؛ K_L : ضریب نوع پایه؛ K_{Hb} : ضریب وابسته به هندسه پایه و عمق آب؛ K_d : ضریب وابسته به دانه‌بندی رسوب؛ K_G : ضریب هندسه کانال؛ K_α : ضرایب هم‌راستایی	$y_s = K_s K_L K_{Hb} K_d K_G K_\alpha$ $K_{Hb} = 2.4 b \frac{b}{H} < 0.7$ $K_{Hb} = 2\sqrt{Hb} \quad 0.7 < \frac{b}{H} < 5$ $K_{Hb} = 4.5 H \frac{b}{H} > 5$ $K_G = \text{ضریب هندسه کانال}$
Sheppard and Renna (2005)	۱- برای پیش‌بینی عمق آبخستگی اطراف پایه پل در آب زلال ۲- رابطه به صورت قطعه‌ای تعریف شده و فقط در بازه‌های مشخصی از V/V_c معتبر است: $0.4 \leq V/V_c < 1$ $1 \leq V/V_c < V_p/V_c$ $V/V_c > V_p/V_c$ بنابراین خارج از این بازه‌ها نباید مستقیماً استفاده شود ۳- به قطر مؤثر پایه b^* ، سرعت مرجع V_p و اندازه رسوب d_{50} حساس است ۴- برای رسوبات غیرچسبنده و شرایطی که جریان نزدیک یا بالاتر از آستانه حرکت است مناسب‌تر است	γ_s : عمق آبخستگی؛ b^* : قطر مؤثر پایه؛ K_s : ضریب شکل دماغه پایه؛ b : عرض پایه پل؛ V : متوسط سرعت جریان؛ V_c : سرعت بحرانی؛ V_p : سرعت مرجع؛ g : شتاب ثقل؛ H : عمق آب؛ d_{50} : قطر میانه ذرات رسوب؛ f_1, f_2, f_3 : توابع وابسته به پارامترهای هندسی و هیدرولیکی	$y_s = 2.5 f_1 f_2 f_3 b^* \quad 0.4 \leq \frac{V}{V_c} < 1$ $y_s = f_1 \left[2.2 \left(\frac{V}{V_c} - 1\right) + 2.5 \left(\frac{V_p}{V_c} - 1\right) \right] * b^*$ $1 \leq \frac{V}{V_c} < \frac{V_p}{V_c}$ $y_s = 2.2 f_1 b^* \quad \frac{V}{V_c} > \frac{V_p}{V_c}$ $b^* = K_s b$ $V_p = 0.6 \sqrt{gH} \text{ or } 5V_c$ $f_1 = \tanh \left[\left(\frac{H}{b^*}\right)^{0.4}\right]$ $f_2 = 1 - 1.2 \left(\ln \frac{V}{V_c}\right)^2$ $f_3 = \frac{\frac{b^*}{d_{50}}}{0.4 \left(\frac{b^*}{d_{50}}\right)^{1.2} + 10.6 \left(\frac{b^*}{d_{50}}\right)^{-0.13}}$

۹- توزیع جغرافیایی مطالعات آبشستگی

در این بخش به منظور ایجاد یک دید کلی برای محققان این حوزه بر اساس تحلیل انجام شده روی لیست منابع، تمرکز تحقیقاتی در کشورهای مختلف در جدول ۹ آمده است.

جدول ۹- تحلیل تمرکز تحقیقاتی بر روی کشورهای مختلف

درصد تقریبی و تمرکز موضوعی	کشور	درصد سهم هر کشور
مدل سازی عددی، آبشستگی عددی، انرژی بادی	چین	۳۵ درصد
معادلات تجربی، هوش مصنوعی و مرور ادبیات	هند	۱۵ درصد
مراجع استاندارد، تحقیقات میدانی	آمریکا	۱۵ درصد
بهینه سازی مدل ها، طوق / شکاف، هوش مصنوعی	ایران	۱۲ درصد
مکانیک رسوب، انرژی های دریایی	اروپا	۱۰ درصد
تحقیقات آزمایشگاهی دقیق: استرالیا، کانادا و ...	سایر	۱۳ درصد

۱۰- چالش ها، نیازها و مسیرهای پژوهشی آتی در

آبشستگی پایه های پل

این پژوهش، گزارشی به روز و جامع درباره آبشستگی پایه های پل ارائه می دهد. علم آبشستگی پایه ها با رویکردها و منابع متنوعی مواجه است و هنوز پرسش های کلیدی بی پاسخ باقی مانده و ارزیابی آبشستگی با درجات قابل توجهی از عدم قطعیت همراه است.

۱- پیچیدگی پدیده و کمبود اجماع

پیچیدگی ذاتی آبشستگی، به هم ریختگی نظرات را تقویت می کند. همچنین، رویکردهای بین رشته ای محدودی طی دهه های اخیر به کار رفته اند. برای دستیابی به درک جامع، همکاری میان شاخه های مختلف مهندسی شامل: ابزار دقیق و حسگرها (مهندسان الکترونیک)، هیدرولوژی (دینامیک جریان و حرکت رسوبات)، هیدرولیک (پارامترهای هیدرولیکی مانند سرعت و عمق)، و مهندسی سازه و ژئوتکنیک (پاسخ پل ها به آبشستگی) ضروری است.

۲- شرایط آزمایشگاهی و محدودیت های کاربردی

اغلب بر این باورند که آبشستگی پایه های پل به خوبی بررسی شده است؛ اما یافته های کنونی عمدتاً در شرایط کنترل شده و آزمایشگاهی معتبر است (جریان های پایدار، مدت زمان محدود، رسوبات یکنواخت، پایه های ساده، مقیاس های کوچک). واقعیت عملی پل ها با این فرضیات مطابقت ندارد.

۳- مسیرهای پژوهشی آینده براساس مرور منابع

مرور حاضر مسیرهای متعددی برای آینده پیشنهاد می دهد. فهم فیزیک پدیده از طریق آزمایش های آزمایشگاهی و شبیه سازی های عددی توجه زیادی را به خود جلب کرده است. انتظار می رود فرمول های پیش بینی آبشستگی با پایه ای قوی تر

مبتنی بر فیزیک پدیده توسعه یابند. همچنین، چارچوب های عملی شامل معادلات ساده آماده برای استفاده در طراحی و عمل مهندسی به طور گسترده شناخته شده اند. با وجود این، استفاده از معادلات آبشستگی تجربی برای حالات ایده آل (خواص رسوب ثابت، شرایط هیدرولیکی ثابت، هندسه های ساده پایه) به طور قابل توجهی پراکندگی نتایج تخمین را افزایش می دهد. نتایج حاصل از چنین فرضیات آزمایشگاهی به سادگی به مقیاس و شرایط پل های واقعی قابل تعمیم نیست؛ لزوم گسترش مدل ها به فضای عملی و واقعی بیش از پیش احساس می شود. پژوهش های آتی باید با تقویت فهم فیزیکی پدیده و توسعه فرمول های پیش بینی با مبنای فیزیک، همراه با چارچوب های طراحی کارآمد و استفاده پذیر در عمل، ادامه یابد.

۴- کمبود داده های میدانی

به دلیل کمبود داده های میدانی در وقایع سیلابی شدید، سطح محافظه کاری در برابر آبشستگی به طور عملی تعریف نشده است. احتمال وجود دلایل ایمنی و محافظه کاری ناقص شامل: اثرات مقیاس آزمایشگاهی با طبیعت، هندسه کانال ساده سازی شده، مصالح بستر ثابت در برابر رسوبات طبیعی، ساده سازی شرایط هیدرولیکی، محدودیت های زمانی آزمایش، محدودیت های کنترل پارامترهای بدون بعد آبشستگی، کاربرد محدود فرمول ها در سازه های شمعی و تأثیر تعامل منابع آبشستگی از کانال ها و تجمع آبشستگی بین وقایع سیل متوالی است.

۵- ارزیابی آسیب پذیری سازه ای در آبشستگی پایه های پل

خطر سیل و آسیب پذیری پل (احتمال شکست) به طور هم زمان باید مدنظر باشد. مطالعات آسیب پذیری غالباً رویکرد قطعی دارند و عمق بحرانی آبشستگی را یک مقدار واحد می دانند، در حالی که عدم قطعیت های زیادی وجود دارد. عوامل مؤثر شامل هندسه پل، خواص مواد، عمق فونداسیون و شکل چاله آبشستگی است؛ از دید هیدرولیکی، تحلیل ها تنها یک متوسط عمق آبشستگی ارائه می دهند در حالی که چاله ها معمولاً پیچیده اند و باید در ظرفیت سازه ای لحاظ شوند.

۶- پایش آبشستگی و سری های زمانی طولانی

هدف از پایش، داشتن سری های زمانی طولانی برای مسیرهای پژوهشی است؛ چون رژیم تخلیه و پاسخ سازه به شرایط هیدرولوژیکی متغیر است. محدودیت های فرمول های فعلی، عدم توانایی توصیف دقیق ماهیت پدیده و عدم قطعیت های زیاد، مدیریت خطر را چالش برانگیز کرده است. پایش مداوم پایه های پل های مستعد آبشستگی برای مدیریت خطر، ضروری

نزدیک به یکدیگر با مدل‌های جریان تک‌فازی در میدان دور، به‌منظور تعادل بین دقت و کارایی

- مقایسه و اعتبارسنجی سیستماتیک مدل‌ها با داده‌های پایش میدانی بلندمدت، کالیبراسیون و به‌روزرسانی مدل‌ها با داده‌های میدانی برای افزایش قابلیت اطمینان پیش‌بینی در محیط‌های مهندسی واقعی
- هم‌چنین متغیرهای محیطی تحت شرایط آب‌وهوایی شدید در چارچوب مدل باید لحاظ شوند تا قابلیت اعتماد پیش‌بینی‌های بلندمدت بهبود یابد

۱۱- نتیجه‌گیری

در این پژوهش مروری، نتایج به دست آمده نشان می‌دهد که درک جامع از پدیده آبخستگی پایه‌های پل، که ذاتاً با عدم قطعیت‌های فراوان همراه است، نیازمند تلفیقی عمیق بین اصول هیدرولیک، مهندسی سازه و رویکردهای آماری و کمی‌سازی عدم قطعیت است. این رویکرد تلفیقی امکان دستیابی به تصمیم‌های طراحی، اجرا و نگهداری با سطح اطمینان بالاتر را فراهم می‌آورد. تحلیل الگوی جریان و فرایند گسترش آبخستگی اطراف پایه‌ها نشان می‌دهد که پارامترهای کلیدی مانند سرعت و عمق جریان، شکل هندسی پایه و نوک پایه، دانه‌بندی و انسجام رسوبات و عمق جریان به‌طور هم‌زمان بر مسیر و شدت این فرایند اثر می‌گذارند. ماهیت پیچیده و اثرات متقابل این پارامترها، لزوم توسعه مدل‌های پیش‌بینی دقیق‌تر را که قادر به در نظر گرفتن ابعاد متعدد و معیارهای گوناگون باشند، تاکید می‌کند. رویکردهای حفاظت از آبخستگی به دو دسته اصلی تقسیم می‌شوند: رویکرد هیدرولیک-ساختاری، که با تقویت مقاومت بستر در برابر جریان و استفاده از حفاظت‌های سنگی و غیرسنگی به دنبال کاهش فرسایش است، و رویکرد اصلاح میدان جریان که با طراحی‌های هندسی و ترفندهای سازه‌ای برای تغییر مسیر یا شدت جریان، توان فرسایشی را کاهش می‌دهد. هر دو رویکرد دارای مزایا و محدودیت‌های عملی و اقتصادی هستند و به‌تنهایی قادر به پوشش کامل تمامی موقعیت‌ها نیستند. لذا، انتخاب استراتژی حفاظت باید با ارزیابی دقیق شرایط محلی، هندسه پایه، رفتار رسوبات، و رژیم‌های هیدرولیکی صورت گرفته و از ترکیب بهینه رویکردها در قالب یک چارچوب منسجم بهره برد.

یافته‌های این پژوهش نشان می‌دهد که طرح‌های موجود اغلب به مبانی تجربی و قضاوت مهندسی تکیه دارند که به‌دلیل عدم قطعیت‌های ذاتی در روابط تجربی و محدودیت در داده‌های میدانی، منجر به ناپایداری طراحی یا نقایص مکرر می‌شود. از

است. داده‌های پایش برای ارزیابی اثرات تغییرات اقلیمی نیز ارزشمند خواهند بود و امکان درمان آبخستگی مبتنی بر فیزیک را فراهم می‌کند.

۷- الزامات تحقیقات آینده و همکاری با صنایع آینده پژوهش باید با مشارکت فعال ذینفعان صنعتی پیش برود و به طراحی‌های حفاظتی مؤثرتر منجر شود. با وجود تقاضای بالا، صنعت اغلب از تحقیقات علمی پیشروتر است؛ بنابراین علوم پایه باید به‌روز و همسو با نیازهای صنعتی باشند و ضمن حفظ کمترین تاثیر محیطی، به صنایع کمک کنند.

۸- فرمول‌های تجربی، شبیه‌سازی و یادگیری ماشین فرمول‌های تجربی برای طراحی مهندسی اولیه مفیدند اما به دلیل فرضیات ساده و داده‌های آزمایشگاهی محدود، در شرایط مهندسی واقعی محدودیت دارند. شبیه‌سازی عددی، به‌ویژه مدل‌های جریان دوفازی، توانایی توضیح مکانیسم‌های فیزیکی را دارد و به ابزار پژوهشی مهمی بدل شده است؛ با این حال، هزینه‌های محاسباتی بالا و نبود داده‌های اعتبارسنجی می‌تواند محدودیت باشد. تکنیک‌های یادگیری ماشین پدیده‌های غیرخطی را خوب مدل می‌کنند، اما ماهیت جعبه‌سیاه و محدودیت‌های انتقال‌پذیری، کاربرد گسترده را کاهش می‌دهد.

۹- استانداردها، دستورالعمل‌ها و طراحی سیستماتیک حفاظت از آبخستگی

نیاز به تدوین استانداردها و دستورالعمل‌های طراحی سیستماتیک‌تر برای طراحی، ارزیابی، ساخت، بازرسی، نگهداری و از رده خارج کردن حفاظت از آبخستگی به‌ویژه برای حفاظت‌های سنگ‌چین پرکاربرد وجود دارد. ملاحظات ژئوتکنیک، آمار و تغییرات مکانی-زمانی باید در طرح‌های حفاظت لحاظ شوند. طرح حفاظت از آبخستگی موجود عمدتاً مبتنی بر معادلات تجربی و قضاوت مهندسی است که می‌تواند منجر به افزونگی طراحی و نقص‌های مکرر شود.

۱۰- مدل‌های عددی، اعتبارسنجی و مسیرهای آینده مدل‌های عددی مانند CFD و SPH در آشکارسازی مکانیسم‌های میکروسکوپی دستاوردهای قابل توجهی داشته‌اند، اما محدودیت کلیدی آن‌ها هزینه‌های محاسباتی بالاست که کاربرد آن‌ها را در شبیه‌سازی‌های بلندمدت و مقیاس‌های مهندسی دشوار می‌کند. اعتبارسنجی این مدل‌ها اغلب به داده‌های آزمایشگاهی متکی است که با داده‌های میدانی متفاوت است. تمرکز پژوهش‌های آینده بر دو محور کلیدی است:

- توسعه مدل‌های عددی ترکیبی و چندمقیاسی، مانند ادغام مدل‌های جریان دوفازی در ناحیه هسته میدان مشخص

منابع

1. Akhlaghi, E., Babarsad, M.S., Derikvand, E., and Abedini, M., 2020. Assessment of the effects of different parameters on scour around single piers and pile groups: A review. *Archives of Computational Methods in Engineering*, 27(1), pp. 1–25. <https://doi.org/10.1007/s11831-018-09304-w>
2. Aleksandrova, N., Emmanouil, A., and Van Duren, L., 2023. Scale model testing of eco-friendly scour protections for offshore foundations and cables. In ICSE-11 Proceedings, International Society for Soil Mechanics and Geotechnical Engineering (ISSMGE): Copenhagen, Denmark. <https://www.issmge.org/publications/publication/scale-model-testing-of-eco-friendly-scour-protections-for-offshore-foundations-and-cables>
3. Abdelhaleem, F.S.F., 2019, Roughened bridge piers as a scour countermeasure under clear water conditions. *ISH Journal of Hydraulic Engineering*, 25(1), pp. 94–103. <https://doi.org/10.1080/09715010.2017.1420498>
4. Abd El-Razek, M., El-Motaleb, M.A., and Bayoumy, M., 2003. Scour reduction around bridge piers using internal openings through the pier. *Alexandria Engineering Journal*, 42(2), pp. 241–248. <https://www.researchgate.net/publication/268378292>
5. Arneson, L.A., Zevenbergen, L.W., Lagasse, P.F., Clopper, P.E., 2012. Evaluating Scour at Bridges; National Highway Institute: Washington, DC, USA. <https://rosap.nhtl.gov/view/dot/42053>
6. Abd El-Hady Rady, R., 2020. Prediction of local scour around bridge piers: artificial-intelligence-based modeling versus conventional regression methods. *Applied Water Science*, 10(2), p.57. <https://doi.org/10.1007/s13201-020-1140-4>
7. Alizadeh E., Qaderi K., Gishinzade F., Madadi M.R., 2024. The effect of abutment geometry and application of submerged vanes on bridge abutment scour, *Iranian Water Research Journal*, 18(4), pp. 67-78. [In Persian].doi: 10.22034/iwrj.2025.14692.2586
8. Bento, A.M., Gomes, A., Viseu, T., Couto, L., and Pêgo, J.P., 2020. Risk-based methodology for scour analysis at bridge foundations. *Engineering Structures*, 223, pp.111-115. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2020.111115>
9. Badir, Z., Asadi-aghbolaghi, M., and Ghanbari-adi, E., 2026. Experimental investigation of the effect of wedge-shaped debris on scour depth of square-shaped bridge piers. *Iranian Water Research Journal*, 19(59), pp. 19-38. [In Persian]. 10.22034/IWRJ.2025.15163.2675
10. Bento, A.M., Minh, T.Q., Ferradosa, T., Sousa, H.S., Nguyen, H.X., and Campos e Matos, J., 2023. Study on the model to determine riverbed scour and the influence of bridge construction on riverbed deformation. *Olympiad in Engineering Science* (pp. 69-76). Cham: Springer Nature Switzerland. https://doi.org/10.1007/978-3-031-49723-0_5

این رو، توسعه مدل‌های پیش‌بینی که مبانی فیزیکی را با رویکردهای آماری پیشرفته برای کمی‌سازی عدم قطعیت همراه سازند، همراه با استفاده از داده‌های میدانی بلندمدت و اعتبارسنجی سیستماتیک مدل‌ها، امری ضروری است. از منظر تجزیه و تحلیل داده‌محور با تأکید بر عدم قطعیت، پایش مستمر پایه‌ها و ایجاد سری‌های زمانی آبستگي، به‌عنوان ابزاری حیاتی در مدیریت خطر، امکان بهبود فرایند تصمیم‌گیری در مواجهه با تغییرات اقلیمی و رژیم‌های هیدرولوژیکی متغیر را فراهم می‌آورد و به مدیریت اثربخش‌تر پدیده آبستگي با در نظر گرفتن عدم قطعیت‌های موجود کمک می‌کند. در نهایت، با توجه به پیچیدگی‌های پدیده آبستگي و تعدد ذینفعان در پروژه‌های پل‌سازی، تدوین یک چارچوب تصمیم‌گیرانه واضح و فنی برای انتخاب بهینه‌ترین ترکیب استراتژی‌های حفاظت، همراه با الزامات مربوط به طراحی، بازرسی، نگهداری و از رده خارج‌سازی، ضروری است تا ایمنی، کارایی جریان و پایداری زیست‌محیطی و اقتصادی پروژه‌ها تضمین گردد. پیشنهاد می‌شود که پژوهش‌های آتی، با همکاری فعال صنعت و مؤسسات اجرایی، بر توسعه روش‌های کارآمدتر برای کمی‌سازی و مدیریت عدم قطعیت، استانداردها و ابزارهای تصمیم‌یار با تکیه بر داده‌های میدانی بلندمدت متمرکز شوند تا چارچوبی جامع برای مدیریت ریسک آبستگي فراهم شود.

تضاد منافع نویسندگان

در این مقاله هیچ‌گونه تضاد منافع وجود ندارد و این مسئله مورد تایید همه نویسندگان است.

دسترسی به داده‌ها

همه اطلاعات و نتایج در متن مقاله ارائه شده است.

مشارکت نویسندگان

نویسنده اول: مرور منابع و تحلیل داده‌ها، نگارش، ویرایش و بازبینی مقاله، کنترل نتایج
نویسنده دوم: جمع‌آوری و تحلیل اولیه داده‌ها، جمع‌آوری منابع، نگارش و ویرایش مقاله

اصول اخلاقی

نویسندگان اصول اخلاقی را در انجام و انتشار این اثر عملی رعایت نموده‌اند و این موضوع مورد تایید همه آن‌ها می‌باشد.

- First International Conference on Scour of Foundations, Texas A and M University, College Station, TX, USA, 17–20 November 2002, pp. 70–91. <https://henry.baw.de/server/api/core/bitstreams/f8327fd8-135a-4cf4-9260-0412a882c445/content>
23. Chiew, Y.M., 2004. Local scour and riprap stability at bridge piers in a degrading channel. *Journal of Hydraulic Engineering*, 130(3), pp. 218–226. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9429\(2004\)130:3\(218\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(2004)130:3(218))
24. Chiew, Y. M., 1992. Scour protection at bridge piers. *Journal of Hydraulic Engineering*, 118(9), pp. 1260–1269. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9429\(1992\)118:9\(1260\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(1992)118:9(1260))
25. Choi, S.U., and Choi, S., 2022. Prediction of local scour around bridge piers in the cohesive bed using support vector machines. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 26(5), pp. 2174–2182. <https://doi.org/10.1007/s12205-022-1803-9>
26. Chen, X., Zhang, X., Liu, X., Zhang, F., Yan, J., and Wang, H., 2022. Experimental Study of Scour Characteristics and Scour Hole Dimensions in Consolidated Silt Sediment under a Current. *Ocean Engineering*, 266, pp. 112801. [10.1016/j.oceaneng.2022.112801](https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2022.112801)
27. Chenxi, Q., Lunliang, D., Duoyin, W., Jianting, Z., Bingchuan, D., and Hao, F., 2024. Experimental Study on Silty Seabed Scour around the Single Pile Induced by the Current. *Ocean Engineering*, 293, pp. 116680. [10.1016/j.oceaneng.2024.116680](https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2024.116680)
28. Chibana, T., Quioco, R. and Watanabe, K., 2022. Role of Grain Size Distribution and Pier Aspect Ratio in Scouring and Sorting around Bridge Piers. *Water*, 14, pp. 2066. [10.3390/w14132066](https://doi.org/10.3390/w14132066)
29. Corvaro, S., Marini, F., Mancinelli, A., and Lorenzoni, C., 2018. Scour protection around a single slender pile exposed to waves. *Coastal Engineering Proceedings*, 36, pp. 6. [10.9753/icce.v36.papers.6](https://doi.org/10.9753/icce.v36.papers.6)
30. Chen, S.C., Tfwala, S., Wu, T. Y., Chan, H.C., and Chou, H.T., 2018. A hooked collar for bridge piers protection: Flow fields and scour. *Water*, 10(9), pp. 1–12. <https://doi.org/10.3390/w10091251>
31. Choo-plou, C.A., Vaghefi, M., and Akbari, M., 2023. Effect of repositioned submerged vanes on local scour variations around a pier in a bend: experimental investigation. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 20(8), pp. 8627–8640. <https://doi.org/10.1007/s13762-023-05031-3>
32. Clopper, P.E., Lagasse, P.F., and Zevenbergen, L.W., 2007. Bridge pier scour countermeasures. In *World Environmental and Water Resources Congress 2007: Restoring Our Natural Habitat*, pp. 1–13. [https://doi.org/10.1061/40927\(243\)380](https://doi.org/10.1061/40927(243)380)
33. Chambel, J., Fazeres-Ferradosa, T., Miranda, F., Bento, A. M., Taveira-Pinto, F. and Lomonaco, P., 2024. A comprehensive review on scour and scour protections for complex bottom-fixed offshore and marine renewable energy foundations. *Ocean Engineering*, 304, pp. 117829. [10.1016/j.oceaneng.2024.117829](https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2024.117829)
11. Baranwal, A., Das, B.S., and Choudhary, A., 2021. Bridge pier scour depth prediction model -a review. *Proceedings of the International Conference on Hydraulics, Water Resources and Coastal Engineering*, Singapore: Springer Nature Singapore, pp. 75–88. https://doi.org/10.1007/978-981-19-9151-6_7
12. Baranwal, A., and Das, B.S., 2024. Scouring around bridge pier: A comprehensive analysis of scour depth predictive equations for clear-water and live-bed scouring conditions. *AQUA – Water Infrastructure, Ecosystems and Society*, 73(3), pp. 424–452. <https://doi.org/10.2166/aqua.2024.235>
13. Baranwal, A., Das, B.S., and Setia, B., 2023. A comparative study of scour around various shaped bridge piers. *Engineering Research Express*, 5, pp. 015052. [10.1088/2631-8695/acbfa1](https://doi.org/10.1088/2631-8695/acbfa1)
14. Bharadwaj, M.R., Gupta, L.K., Pandey, M., and Valyrakis, M., 2025. Countermeasures for local scour around the bridge pier: A review. *Acta Geophysica*, 73(1), pp. 701–728. <https://doi.org/10.1007/s11600-024-01361-z>
15. Bezuijen, A., and Pilarczyk, K.W., 2012. Geosynthetics in hydraulic and coastal engineering: filters, revetments and sand filled structures. In *EuroGeo5-2012, 5th European Geosynthetics Congress*, Ghent University, Department of Civil Engineering, pp. 65–80. <http://hdl.handle.net/1854/LU-2999048>
16. Bestawy, A., Eltahawy, T., Alsaluli, A., Almaliki, A., and Alqurashi, M., 2020. Reduction of local scour around a bridge pier by using different shapes of pier slots and collars. *Water Science and Technology: Water Supply*, 20(3), pp. 1006–1015. <https://doi.org/10.2166/ws.2020.022>
17. Baghbadorani, D.A., Ataie-Ashtiani, B., Beheshti, A., Hadjzaman, M. and Jamali, M., 2018. Prediction of current-induced local scour around complex piers: Review, revisit, and integration. *Coastal Engineering*, 133, pp. 43–58. <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2017.12.006>
18. Breusers, H.N.C., Nicollet, G., and Shen, H.W., 1977. Erosion locale autour des piles cylindriques. *Journal of Hydraulic Research*, 15(3), pp. 211–252. <https://doi.org/10.1080/00221687709499645>
19. Chiew, Y., and Lim, S., 2003. Protection of bridge piers using a sacrificial sill. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers – Water and Maritime Engineering*, 156(1), pp. 53–62. Thomas Telford Ltd. <https://doi.org/10.1680/wame.2003.156.1.53>
20. Chiew, Y.M., 1984. Local scour at bridge piers. Doctoral Dissertation, University of Auckland. <https://hdl.handle.net/2292/2520>
21. Chiew, Y.M., 1995. Mechanics of riprap failure at bridge piers. *Journal of Hydraulic Engineering*, 121(6), pp. 635–643. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9429\(1995\)121:9\(635\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(1995)121:9(635))
22. Chiew, Y.M., 2002. Failure Mechanisms of Riprap Layer Around Bridge Piers. In *Proceedings of the*

- [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)HY.1943-7900.0001025](https://doi.org/10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.0001025)
46. Froehlich, D.C., 2013. Protecting bridge piers with loose rock riprap. *Journal of Applied Water Engineering and Research*, 1(1), pp. 39–57. <https://doi.org/10.1080/23249676.2013.828486>
 47. Fael, C., Lança, R. and Cardoso, A., 2016. Effect of pier shape and pier alignment on the equilibrium scour depth at single piers. *International Journal of Sediment Research*, 31, pp. 244–250. <https://doi.org/10.1016/j.ijsrc.2016.04.001>
 48. Farooq, R., and Ghumman, A.R., 2019. Impact assessment of pier shape and modifications on scouring around bridge pier. *Water (Switzerland)*, 11, pp. 14–20. [10.3390/w11091761](https://doi.org/10.3390/w11091761)
 49. Farooq, R., Ghumman, A.R., Tariq, M.A.U.R., Ahmed, A., and Jadoon, K.Z., 2020. Optimal octagonal hooked collar countermeasure to reduce scour around a single bridge pier. *Period Polytech Civ Eng*, 64(4), pp. 1026–1037. <https://doi.org/10.3311/PPci.15966>
 50. Farooq, R., Azimi, A.H., Tariq, M.A.U.R. and Ahmed, A., 2023. Effects of hooked-collar on the local scour around a lenticular bridge pier. *International Journal of Sediment Research*, 38(1), pp. 1–11. <https://doi.org/10.1016/j.ijsrc.2022.07.002>
 51. Fredsøe, J., Sumer, B.M., and Bundgaard, K., 2001. Scour at a riprap revetment in currents. In Proceedings of the 2nd IAHR Symposium on River, Coastal and Estuarine Morphodynamics, Obihiro, Japan, 10–14 September 2001, pp. 245–254. <https://orbit.dtu.dk/en/publications/scour-at-a-riprap-revetment-in-currents/>
 52. Ferraro, D., Fenocchi, A., and Gaudio, R., 2020. Hydrodynamics of a bordered collar as a countermeasure against pier scouring: Hydrodynamics countermeasure scouring. Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences, 476, pp. 20200393. <https://doi.org/10.1098/rspa.2020.0393>
 53. Frahadi, S., Asadi-Aghbolaghi, M., Ghanbari-Adivi, E., and Raeisi, A., 2025. Study of the effect of sub-surface slot on reducing scour at the base of a square nose bridge. *Advanced Technologies in Water Efficiency*, 5 (1), pp. 16–34. [In Persian]. <https://doi.org/10.22126/atwe.2024.11120.1138>
 54. Fazerer-Ferradosa, T., Chambel, J., Taveira-Pinto, F., Rosa-Santos, P., Giannini, G., and Haerens, P., 2021. Scour protections for offshore foundations of marine energy harvesting technologies: A review. *Journal of Marine Science and Engineering*, 9, pp. 297. <https://doi.org/10.3390/jmse9030297>
 55. Gilja, G., Kuspilić, N., and Bekić, D., 2011. Impact of morphodynamical changes on the bridge stability: Case study of Jakuševac bridge in Zagreb. In: Sawicki, J.M. and Zima, P. *Current Events in Hydraulic Engineering*. Gdansk University of Technology, Gdansk, Poland, pp. 112–122. <https://www.croris.hr/crosbi/publikacija/prilog-knjiga/44122>
 34. Deng, L., Wang, W., and Yu, Y., 2016. State-of-the-art review on the causes and mechanisms of bridge collapse. *Journal of Performance of Constructed Facilities*, 30(2), pp. 04015005. [10.1061/\(ASCE\)CF.1943-5509.0000731](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CF.1943-5509.0000731)
 35. Dang, N.M., Tran Anh, D., and Dang, T.D., 2021. ANN optimized by PSO and Firefly algorithms for predicting scour depths around bridge piers. *Engineering with Computers*, 37(1), pp. 293–303. <https://doi.org/10.1007/s00366-019-00824-y>
 36. Das, S., Das, R., and Mazumdar, A., 2014. Vorticity and Circulation of Horseshoe Vortex in Equilibrium Scour Holes at Different Piers. *Journal of the Institution of Engineers (India) Ser A*, 95, pp. 109–115. <https://doi.org/10.1007/s40030-014-0078-7>
 37. Daneshfaraz, R., Karajabad, M.S., Alinejad, B. and Asl, M.M., 2021a. Experimental investigation of the effects of flow discharge on the scour rate around the groups of bridge piers with a rough surface in the presence of aggregate extraction pits. *Journal of Water and Soil Science*, 24(4), pp. 111–125. [In Persian]. [10.47176/Journal_of_Water_and_Soil_Science.24.4.37953](https://doi.org/10.47176/Journal_of_Water_and_Soil_Science.24.4.37953)
 38. Daneshfaraz, R., Ghaderi, A., Sattariyan, M., Alinejad, B., Asl, M.M., and Di Francesco, S., 2021b. Investigation of local scouring around hydrodynamic and circular pile groups under the influence of river material harvesting pits. *Water*, 13(16), p. 2192. <https://doi.org/10.3390/w13162192>
 39. Duan, B., Wang, D., Qin, C., and Duan, L., 2025. Local Scour Around Marine Structures: A comprehensive review of influencing factors, prediction methods, and future directions. *Buildings*, 15(12), p.2125. [10.3390/buildings15122125](https://doi.org/10.3390/buildings15122125)
 40. De Vos, L., De Rouck, J., Troch, P., and Frigaard, P., 2011. Empirical design of scour protections around monopile foundations. *Coast Engineering*, 58, pp. 540–543. <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2011.02.001>
 41. De Vos, L., De Rouck, J., Troch, P. and Frigaard, P., 2012. Empirical design of scour protections around monopile foundations. Part 2: Dynamic approach. *Coast Engineering*, 60, pp. 286–298. <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2011.11.001>
 42. Dey, S., Sumer, B.M., and Fredsøe, J., 2006. Control of scour at vertical circular piles under waves and current. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 132(3), pp. 270–279. <https://doi.org/10.1080/09715010.2017.1420498>
 43. Ettema, R., Melville, B.W., and Barkdoll, B., 1998. Scale effect in pier scour experiments. *Journal of Hydraulic Engineering*, 124, pp.639–642. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9429\(1998\)124:6\(639\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(1998)124:6(639))
 44. Ettema, R., 1980, Scour at Bridge Piers. PhD dissertation, The University of Auckland, Auckland.
 45. Ettmer, B., Orth, F. and Link, O., 2015, Live-bed scour at bridge piers in a lightweight polystyrene bed. *Journal of Hydraulic Engineering*, 141, pp. 04015017.

- airfoil-shaped collar. *Hydrology*, 10(4), p. 77. <https://doi.org/10.3390/hydrology10040077>
68. Gupta, L.K., Pandey, M., and Anand Raj, P., 2023b. Numerical simulation of local scour around the pier with and without airfoil collar (AFC) using FLOW-3D. *Environmental Fluid Mechanics*, 24(4), pp. 631-649. <https://doi.org/10.1007/s10652-023-09932-2>
69. Gupta, L.K., Pandey, M., and Raj, P.A., 2023c. Impact of airfoil collar on scour reduction around the bridge pier. *Ocean Engineering*, 290, p. 116271. [10.1016/j.oceaneng.2023.116271](https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2023.116271)
70. Gao, D., Posada, G., and Nordin, C.F., 1993. Pier scour equations used in China. *Hydraulic engineering* (pp. 1031-1036). ASCE. <https://rosap.nrl.bts.gov/view/dot/855>
71. Hamidi, M., Koohsari, A., and Khalili, A.M., 2024. Numerical investigation of mining pit effects on maximum scour depth around bridge pier with different shape. *Modeling Earth Systems and Environment*, 10(4), pp. 5189-5203. <https://doi.org/10.1007/s40808-024-02057-5>
72. Huber, F., 1991. Update: Bridge Scour. *Civil Engineering* (ASCE), 61(9), pp.62-63. Also HW Shen and VR Schneider, ASCE National Meeting, *Transportation Engineering*, Boston, USA, Paper No.1238 (1970). <https://www.semanticscholar.org/paper/UPDATE%3A-BRIDGE-SCOUR-Huber/2d0bcd54c53b36a49198189368efd26d2d2a529f>
73. Heidarpour, M., Afzalimehr, H., and Izadinia, E., 2010. Reduction of local scour around bridge pier groups using collars. *International Journal of Sediment Research*, 25, pp. 411-422. [https://doi.org/10.1016/S1001-6279\(11\)60008-5](https://doi.org/10.1016/S1001-6279(11)60008-5)
74. Habib, I.A., Wan Mohtar, W.H.M., Shahot, K.M., El-Shafie, A., and Abd Manan, T.S., 2021. Bridge failure prevention: An overview of self-protected pier as flow-altering countermeasures for scour protection. *Civil Engineering Infrastructures Journal*, 54(1), pp. 1-22. [10.22059/cej.2020.292296.1627](https://doi.org/10.22059/cej.2020.292296.1627)
75. Hajikandi, H., and Golnabi, M., 2018. October. Y-shaped and T-shaped slots in river bridge piers as scour countermeasures. In Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Water Management (Vol. 171, No. 5, pp. 253-263). <https://doi.org/10.1680/jwama.16.00063>
76. Hamidifar, H., Shahabi-Haghighi, S.M.B., and Chiew, Y.M., 2022. Collar performance in bridge pier scour with debris accumulation. *International Journal of Sediment Research*, 37(3), pp. 328-334. [10.1016/j.ijsrc.2021.10.002](https://doi.org/10.1016/j.ijsrc.2021.10.002)
77. Harasti, A., Gilja, G., Potočki, K., and Lacko, M., 2021. Scour at bridge piers protected by the riprap sloping structure: A review. *Water*, 13(24), p. 3606. <https://doi.org/10.3390/w13243606>
78. Heibaum, M., and Trentmann, J., 2010. Partial grouted riprap for enhanced scour resistance. In *Scour and Erosion*, pp. 1-10. [https://doi.org/10.1061/41147\(392\)1](https://doi.org/10.1061/41147(392)1)
56. Ghanbari Adivi, E., and Kashfi-Pour, S.M., 2016. Estimating scour depth around bridge piers using the integration of empirical models with the FASTER numerical model. *Water Resources Engineering Scientific*, 9(31), pp. 1-10. [In Persian]. [20.1001.1.20086377.1395.9.31.1.8](https://doi.org/10.1001.1.20086377.1395.9.31.1.8)
57. Ghanbari Adivi, E., Shafaei Bajestan, M., Saghi, M., 2013. Laboratory study of the stability of riprap bed materials at river confluences. *Journal of Water and Soil Knowledge*, 24(1), pp. 69-83. [In Persian].
58. Geo-institute., 2009. The problem of scour, Retrieved February 1, 2009, from <https://ceprofs.civil.tamu.edu/gbiscontin/erosion-gi/index.html>.
59. Gazi, A.H., and Afzal, M.S., 2020. A review on hydrodynamics of horseshoe vortex at a vertical cylinder mounted on a flat bed and its implication to scour. *Acta Geophysica*, 68(3), pp. 861-875. <https://doi.org/10.1007/s11600-020-00439-8>
60. Gazi, A.H., Afzal, M.S. and Dey, S., 2019. Scour around piers under waves: Current status of research and its future prospect. *Water*, 11(11), p. 2212. [10.3390/w11112212](https://doi.org/10.3390/w11112212)
61. Gokmener, S., Gogus, M., and Altan-Sakarya, A.B., 2025. Effects of collars in reducing local scour depth around bridge abutments under unsteady flow conditions. *Acta Geophysica*, 73(1), pp. 729-753. <https://doi.org/10.1007/s11600-024-01363-x>
62. Grüne, J., Sparboom, U., Oumeraci, H., Schmidt-Koppenhagen, R., and Wang, Z., 2007. Untersuchungen zur Stabilität von Geotextilen Sandcontainern unter Seegang und die Anwendung für den Kolkschutz von Tragkonstruktionen für Offshore-Windenergieanlagen. In FZK-Kolloquium Küstenschutz und Seebau, Hannover. https://www.fzk.uni-hannover.de/fileadmin/fzk/publications/024_FZK_Sandcontainer_Gruene.pdf
63. Gaudio, R., Tafarojnoruz, A., and Calomino, F., 2012. Combined flow-altering countermeasures against bridge pier scour. *Journal of Hydraulic Research*, 50(1), pp. 35-43. <https://doi.org/10.1080/00221686.2011.649548>
64. Grimaldi, C., Gaudio, R., Calomino, F., and Cardoso, A.H., 2009. Countermeasures against local scouring at bridge piers: Slot and combined system of slot and bed sill. *Journal of Hydraulic Engineering*, 135(5), pp. 425-431. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)HY.1943-7900.0000035](https://doi.org/10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.0000035)
65. Ghorbani, B., and Kells, J.A., 2008. Effect of submerged vanes on the scour occurring at a cylindrical pier. *Journal of Hydraulic Research*, 46(5), pp. 610-619. <https://doi.org/10.3826/jhr.2008.3003>
66. Garg, V., Setia, B., and Verma, D.V.S., 2008. Combination of scour protection devices around oblong bridge pier. *ISH Journal of Hydraulic Engineering*, 14(3), pp. 56-68. <https://doi.org/10.1080/09715010.2008.10514922>
67. Gupta, L.K., Pandey, M., Raj, P.A., and Pu, J.H., 2023a. Scour reduction around bridge pier using the

91. Kumar, L., and Afzal, M.S., 2024. Estimating pier scour depth under combined waves and current using boosting machine-learning models. *Acta Geophysica*, 72(3), pp.1895-1911. <https://doi.org/10.1007/s11600-023-01089-2>
92. Kumar, V., Raju, K.G.R., and Vittal, N., 1999. Reduction of local scour around bridge piers using slots and collars. *Journal of Hydraulic Engineering*, 125(12), pp. 1302-1305. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9429\(1999\)125:12\(1302\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(1999)125:12(1302))
93. Khosravi-Hamouleh, M., and Ghanbari Adivi, E., 2026. Baffle Structure in Water Engineering: A Review of Applications, Challenges, and Innovative Methods in Flow Control and Flood Management. *Journal of New Approaches in Water Engineering and Environment*, 5(3), pp. 37-72. [In Persian]. <https://doi.org/10.22034/na-wee.2025.553107.1171>
94. Kaveh, K., Mai, D.N., Pham, Q.B., and Anh, D.T., 2021. A hybrid feed-forward neural network with grasshopper optimization for observing pattern of scour depth around bridge piers. *Arabian Journal of Geosciences*, 14(22), p. 2352. <https://doi.org/10.1007/s12517-021-08617-8>
95. Khan, M., Tufail, M., Ajmal, M., Haq, Z.U., and Kim, T.W., 2017. Experimental analysis of the scour pattern modeling of scour depth around bridge piers. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 42, pp. 4111-4130. <https://doi.org/10.1007/s13369-017-2599-7>
96. Kothyari, U. C., Garde, R.J., and Ranga Raju, K.G., 1992. Temporal variation of scour around circular bridge piers. *Journal of Hydraulic Engineering*, 16, pp. 35-48. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9429\(1992\)118:8\(1091\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(1992)118:8(1091))
97. Krishna, A., and Latha, G.M., 2023. Evolution of Geocells as Sustainable Support to Transportation Infrastructure. *Sustainability*, 15, p. 11773. <https://doi.org/10.3390/su15111773>
98. Keshavarz, A., Vaghefi, M., and Ahmadi, G., 2024. Collars for scour reduction around different shapes of bridge piers in a 180° sharp bend. *International Journal of Civil Engineering*, 22(10), pp. 1733-1751. <https://doi.org/10.1007/s40999-024-00994-x>
99. Kim, D., Jung, S., and Na, W.B., 2021. Evaluation of turbulence models for estimating the wake region of artificial reefs using particle image velocimetry and computational fluid dynamics. *Ocean Engineering*, 223, p. 108673. [10.1016/j.oceaneng.2021.108673](https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2021.108673)
100. Kim, T., Kwon, Y., Lee, J., Lee, E., and Kwon, S., 2022. Wave attenuation prediction of artificial coral reef using machine-learning integrated with hydraulic experiment. *Ocean Engineering*, 248, p. 110324. [10.1016/j.oceaneng.2021.110324](https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2021.110324)
101. Kharbeche, M., 2022. The role of pier shape and aspect ratio on local scour with and without sacrificial piles. Masters thesis, University of Windsor (Canada). <https://uwindsor.scholaris.ca/bitstreams/a3ab965c-0306-43d4-85b9-81c6dfabd5f9/download>
79. Heibaum, M., 2004, November, Geotechnical filters – The important link in scour protection. In Proceedings of the 2nd International Conference on Scour and Erosion. https://www.researchgate.net/publication/272576993_Geotechnical_filters_-_the_important_link_in_scour_protection
80. Heibaum, M., 2006. The use of geosynthetics in scour protection. In 3rd International Conference on Scour and Erosion (ICSE-3); Verheij, HJ, Hoffmans, GJ, Eds. https://izw.baw.de/publikationen/tc213/0/third_icse_contributions.pdf
81. Hong, J.H., Chiew, Y.M., Lu, J.Y., Lai, J.S., Lin, Y.B., 2012. Houfeng bridge failure in Taiwan. *Journal of Hydraulic Engineering*, 138(2), pp. 186-198. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)HY.1943-7900.0000430](https://doi.org/10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.0000430)
82. Hancu, S., 1971. Sur le calcul des affouillements locaux dans la zone des piles des ponts. In Proceedings of the 14th IAHR congress, Paris, France (Vol. 3, No. 1, pp. 299-313). https://books.google.com/books/about/Fourteenth_Congress_of_the_International.html?id=tpvPGVtzbtOC
83. Inoue, T., Hirotsugu, Y., Kashiwada, J., and Nihei, Y., 2025. Interaction between horseshoe vortex structure and sediment transport around a river rectangular pier using a solid-liquid two-phase turbulent LES model. *International Journal of Multiphase Flow*, 186, pp. 105153. [10.1016/j.ijmultiphaseflow.2025.105153](https://doi.org/10.1016/j.ijmultiphaseflow.2025.105153)
84. Ismael, A., Gunal, M., and Hussein, H., 2015. Effect of bridge pier position on scour reduction according to flow direction. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 40(6), pp. 1579-1590. <https://doi.org/10.1007/s13369-015-1625-x>
85. Izadinia, E., and Heidarpour, M., 2022. Parametric study for hydraulic design of air-bubble injections to control scour around circular bridge piers. *ISH Journal of Hydraulic Engineering*, 29(3), pp.281-288. <https://doi.org/10.1080/09715010.2022.2058331>
86. Jazaeri, S.A., Nistor, I., Mohammadian, A., and Liu, X., 2024. A critical review on the tsunami-induced scour around structures. *Coastal Engineering Journal*, 66(3), pp. 563-590. <https://doi.org/10.1080/21664250.2024.2380158>
87. Jahangirzadeh, A., Basser, H., Akib, S., Karami, H. Naji, S., 2014. Experimental and numerical investigation of the effect of different shapes of collars on the reduction of scour around a single bridge pier. *PLoS ONE* 9(6):e98592. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0098592>
88. Jain, S.C., and Fischer, E.E., 1979. Scour around circular bridge piers at high Froude numbers.
89. Jain, S.C., 1981. Maximum clear-water scour around circular piers. *Journal of the Hydraulics Division*, 107(5), pp.611-626. <https://doi.org/10.1061/JYCEAJ.0005667>
90. Kumar, A., 2017. Three-dimensional flow measurements at circular pier. In: *Proceedings of Hydraulic Measurements*, pp. 397-406. https://doi.org/10.1007/978-3-319-55125-8_34

113. Liang, S., Zhang, Y., and Yang, J., 2015. An experimental study on pile scour mitigating measures under waves and currents. *Science China Technological Sciences*, 58(6), pp. 1031–1045. <https://doi.org/10.1007/s11431-015-5829-9>
114. Lauchlan, C.S., 1999. Pier Scour Countermeasures. PhD dissertation, The University of Auckland, Auckland.
115. Lai, Y.G., Liu, X., Bombardelli, F.A., and Song, Y., 2022. Three-dimensional numerical modeling of local scour: A state-of-the-art review and perspective. *Journal of Hydraulic Engineering*, 148(11), p. 03122002. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)HY.1943-7900.0002019](https://doi.org/10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.0002019)
116. Lee, C.H., Low, Y.M., and Chiew, Y.M., 2016. Multi-dimensional rheology-based two-phase model for sediment transport and applications to sheet flow and pipeline scour. *Physics of Fluids*, 28(5). <https://doi.org/10.1063/1.4948987>
117. Melville, B.W., and Sutherland, A.J., 1988. Design method for local scour at bridge piers. *Journal of Hydraulic Engineering*, 114(10), pp. 1210–1226. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9429\(1988\)114:10\(1210\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(1988)114:10(1210))
118. Melville, B.W., 1992. Local scour at bridge abutments. *Journal of Hydraulic Engineering*, 118(4), pp. 615–631. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9429\(1992\)118:4\(615\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(1992)118:4(615))
119. Melville, B.W., and Raudkivi, A.J., 1977. Flow characteristics in local scour at bridge piers. *Journal of Hydraulic Research*, 15, pp. 373–380. <https://doi.org/10.1080/00221687709499641>
120. Melville, B.W., 1984. Live-bed scour at bridge piers. *Journal of Hydraulic Engineering*, 110(9), pp. 1234–1247. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9429\(1984\)110:9\(1234\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(1984)110:9(1234))
121. Melville, B.W., and Chiew, Y.M., 1999. Time scale for local scour at bridge piers. *Journal of Hydraulic Engineering*, 125(1), pp. 59–65. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9429\(1999\)125:1\(59\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(1999)125:1(59))
122. Melville, B.W., and Coleman, S.E., 2000. *Bridge scour*. Water Resources Publication. <https://books.google.com.et/books?id=SoIA3P1zLAE&printsec=frontcover>
123. Melville, B.W., 1975. Local Scour at Bridge Site. PhD dissertation, The University of Auckland. <https://hdl.handle.net/2292/2537>
124. Melville, B.W., and Hadfield, A.C., 1999. Use of sacrificial piles as pier scour countermeasures. *Journal of Hydraulic Engineering*, 125(11), pp. 1221–1224. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9429\(1999\)125:11\(1221\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(1999)125:11(1221))
125. Maddison, B., 2012. Scour failure of bridges. Proceedings of the Institution of Civil Engineers – Forensic Engineering, 165(1), pp. 39–52. <https://doi.org/10.1680/feng.2012.165.1.39>
126. Mathew, B.K., Lakshmi, S., and Hari, G., 2022. Design of a self-lifting pedestrian bridge for flood-prone locations. In: Recent Advances in Structural Engineering and Construction Management: Select
102. Khalfin, I.S., 1983. April. Local scour around ice-resistant structures caused by wave and current effect. In Proceedings of the Seventh International Conference on Port and Ocean Engineering under Arctic Conditions, Helsinki, Finland (pp. 5–9). https://books.google.com/books/about/The_Seventh_International_Conference_on.html?id=LAjI0AEACAAJ
103. Lee, M., Yoo, M., Jung, H.-S., Kim, K.H., and Lee, I.W., 2020. Study on dynamic behavior of bridge pier by impact load test considering scour. *Applied Sciences*, 10, p. 6741. <https://doi.org/10.3390/app10196741>
104. Liang, B., Du, S., Pan, X., and Zhang, L., 2020. Local scour for vertical piles in steady currents: review of mechanisms, influencing factors and empirical equations. *Journal of Marine Science and Engineering*, 8(1), pp. 0004. <https://doi.org/10.3390/jmse8010004>
105. Li, S., He, S., Li, H., and Jin, Y., 2017. Scour depth determination of bridge piers based on time-varying modal parameters: Application to Hangzhou Bay Bridge. *Journal of Bridge Engineering*, 22(12), pp. 1–13. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)BE.1943-5592.0001154](https://doi.org/10.1061/(ASCE)BE.1943-5592.0001154)
106. Lad, V.H., Patel, D.A., Chauhan, K.A., and Patel, K.A., 2022. Development of fuzzy system dynamics model to forecast bridge resilience. *Journal of Bridge Engineering*, 27(4), pp. 04022114. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)BE.1943-5592.0001952](https://doi.org/10.1061/(ASCE)BE.1943-5592.0001952)
107. Lança, R. M., Fael, C. S., Maia, R. J., Pêgo, J. P. and Cardoso, A.H., 2013. Clear-water scour at comparatively large cylindrical piers. *Journal of Hydraulic Engineering*, 139, pp. 1117–1125. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)HY.1943-7900.0000788](https://doi.org/10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.0000788)
108. Link, O., Henríquez, S., and Ettmer, B., 2019. Physical scale modelling of scour around bridge piers. *Journal of Hydraulic Research*, 57, pp. 227–237. <https://doi.org/10.1080/00221686.2018.1475428>
109. Li, J., Guo, Y., Lian, J., and Wang, H., 2023. Mechanisms, assessments, countermeasures, and prospects for offshore wind turbine foundation scour research. *Ocean Engineering*, 281, p. 114893. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2023.114893>
110. Lagasse, P.F., 2007. *Countermeasures to protect bridge piers from scour* (Vol. 593). Transportation Research Board.
111. Liang, Z., Jeng, D. S., Liu, J., and Zhang, J., 2022. Numerical study of Articulated Concrete Mattresses (ACMs) for offshore pipeline protection. *Ocean Engineering*, 255, p. 111467. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2022.111467>
112. López, I., Tinoco, H., Aragonés, L., and Garcia-Barba, J., 2016. The multifunctional artificial reef and its role in the defence of the Mediterranean coast. *Science of the Total Environment*, 550, pp. 910–923. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.01.180>

- scour reduction around side-by-side piers by a downstream bed sill and continuous footing. *ISH Journal of Hydraulic Engineering*, 30(5), pp. 633–644. <https://doi.org/10.1080/09715010.2024.2397401>
137. Nielsen, A.W., Sumer, B. M., Fredsøe, J., and Christensen, E.D., 2011. Sinking of armour layer around a cylinder exposed to a current. Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Marine Engineering, 164(4), pp. 159–172. <https://doi.org/10.1680/maen.2011.164.4.159>
 138. Nielsen, A.W., Probst, T., Petersen, T.U., and Sumer, B.M., 2015. Sinking of armour layer around a vertical cylinder exposed to waves and current. *Coastal Engineering*, 100(6), pp. 58–66. <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2015.03.010>
 139. Nazari-Sharabian, M., Nazari-Sharabian, A., Karakouzian, M., and Karami, M., 2020. Sacrificial piles as scour countermeasures in river bridges: A numerical study using FLOW-3D. *Civil Engineering Journal*, 6(6), pp. 1091–1103. <https://doi.org/10.28991/cej-2020-03091531>
 140. Najafzadeh, M., and Oliveto, G., 2021. More reliable predictions of clear-water scour depth at pile groups by robust artificial intelligence techniques while preserving physical consistency. *Soft Computing*, 25(7), pp. 5723–5746. <https://doi.org/10.1007/s00500-020-05567-3>
 141. Nandi, B., and Das, S., 2025. A novel formula to determine the time to achieve quasi-equilibrium scour around a circular pier. *ISH Journal of Hydraulic Engineering*, pp. 1–16. <https://doi.org/10.1080/09715010.2025.2507924>
 142. Nandi, B., Patel, G., and Das, S., 2024. Prediction of maximum scour depth at clear water conditions: Multivariate and robust comparative analysis between empirical equations and machine learning approaches using extensive reference metadata. *Journal of Environmental Management*, 354, p. 120349. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2024.120349>
 143. Odgaard, A.J., and Kennedy, J.F., 1983. River-bend bank protection by submerged vanes. *Journal of Hydraulic Engineering*, 109(8), pp. 1161–1173. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9429\(1983\)109:8\(1161\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(1983)109:8(1161))
 144. Obied, N.A., and Khassaf, S.I., 2019. Experimental study for protection of piers against local scour using slots. *International Journal of Engineering*, 32(2), pp. 217–222. doi: 10.5829/ije.2019.32.02b.05
 145. Oliveto, G., and Hager, W.H., 2002. Temporal evolution of clear-water pier and abutment scour. *Journal of Hydraulic Engineering*, 128(9), pp. 811–820. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9429\(2002\)128:9\(811\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(2002)128:9(811))
 146. Prendergast, L.J., and Gavin, K., 2014. A review of bridge scour monitoring techniques. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 6(2), pp. 138–149. <https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2014.01.007>
 147. Pandey, M., Pu, J.H., Pourshahbaz, H., and Khan, M.A., 2022. Reduction of scour around circular piers using collars. *Journal of Flood Risk Management*, 15, pp. e12812. <https://doi.org/10.1111/jfr3.12812>
 - Proceedings of ICSMC 2021. Springer Nature Singapore, pp. 393–410. [10.1007/978-981-19-4040-8_32](https://doi.org/10.1007/978-981-19-4040-8_32)
 127. Mohamed, Y.A., Abdel-Aal, G.M., Nasr-Allah, T.H., and Shawky, A.A., 2016. Experimental and theoretical investigations of scour at bridge abutment. *Journal of King Saud University – Engineering Sciences*, 28, pp. 32–40. <https://doi.org/10.1016/j.jksues.2013.09.005>
 128. Misuriya, G., and Eldho, T.I., 2023. Turbulent structures and local scour around a cylindrical pier under unsteady flows. *Environmental Fluid Mechanics*, 23, pp. 1359–1380. <https://doi.org/10.1007/s10652-023-09951-z>
 129. Majedi-Asl, M., Daneshfaraz, R., Abraham, J., and Valizadeh, S., 2021. Effects of hydraulic characteristics, sedimentary parameters, and mining of bed material on scour depth of bridge pier groups. *Journal of Performance of Constructed Facilities*, 35(2), p. 04020148. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CF.1943-5509.0001549](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CF.1943-5509.0001549)
 130. Majedi Asl, M., Daneshfaraz, R., and Valizadeh, S., 2019. The experimental study of the river sand and gravel mining on the scouring pattern around pier group. *Journal of Hydraulics*, 14(3), pp. 129–145. [In Persian]. [10.30482/jhyd.2019.186662.1391](https://doi.org/10.30482/jhyd.2019.186662.1391)
 131. Mahalder, B., Schwartz, J.S., Palomino, A.M., and Zirkle, J., 2024. Influence of Cumulative Effective Stream Power on Scour Depth Prediction Around Bridge Piers in Cohesive Bed Sediments. Transportation Research Record: *Journal of the Transportation Research Board*, 2678, pp. 710–723. [10.1177/03611981241230514](https://doi.org/10.1177/03611981241230514)
 132. Mohr, H., Draper, S., White, D.J., and Cheng, L., 2018. The Influence of Permeability on the Erosion Rate of Fine-Grained Marine Sediments. *Coastal Engineering*, 140, pp. 124–135. <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2018.04.013>
 133. Mehta, A.J., 2022. Introduction To Hydraulics Of Fine Sediment Transport, Vol. 56. *World Scientific*. https://www.worldscientific.com/doi/pdf/10.1142/9789811257247_0001
 134. Mahan, N., and Jahromi, S.H.M., 2017. Comparative study of slot shapes effects on the scour around bridge pier. *International Journal of Science and Engineering Investigations*, 6(70). https://www.researchgate.net/profile/Naser-Mahan/publication/322132029_Comparative_Study_of_Slot_Shapes_Effects_on_the_Scour_around_Bridge_Pier/links/5d7ef001a6fdcc2f0f713d09/Comparative-Study-of-Slot-Shapes-Effects-on-the-Scour-around-Bridge-Pier.pdf
 135. Marandi, M.O., 2022. Erosion Control of Steep Open Channels Using Articulated Concrete Blocks. Masters thesis, The University of Western Ontario (Canada). <https://uwo.scholaris.ca/bitstreams/277f65a5-170f-4634-adbf-e0b43f52a487/download>
 136. Movahedi, N., Dehghani, A.A., Zahiri, A. and Aarabi, M.J., 2024. Experimental investigation of

- Seabed Considering Soil Cohesion (SedCoh-FOAM): Model and Validation. *Physics of Fluids*, 36, p. 053340. <https://doi.org/10.1063/5.0207743>
161. Raudkivi, A.J., and Ettema, R., 1983. Clear-water scour at cylindrical piers. *Journal of Hydraulic Engineering*, 109(3), pp. 338–350. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9429\(1983\)109:3\(338\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(1983)109:3(338))
162. Raudkivi, A.J., 1986. Functional trends of scour at bridge piers. *Journal of Hydraulic Engineering*, 112(1), pp. 1–13. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9429\(1986\)112:1\(1\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(1986)112:1(1))
163. Rathod, P., and Manekar, V.L., 2022. Gene expression programming to predict local scour using laboratory and field data. *ISH Journal of Hydraulic Engineering*, 28(2), pp. 143–151. <https://doi.org/10.1080/09715010.2020.1846144>
164. Raikar, R.V., and Dey, S., 2005. Clear-water scour at bridge piers in fine and medium gravel beds. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 32(4), pp. 775–781. <https://doi.org/10.1139/05-022>
165. Rezaie, M., Daneshfaraz, R., and Dasineh, M., 2018. Experimental investigation of adding clay and PAM on scour reduction bridge piers under the influence removal of river materials. *Journal of Hydraulics*, 13(3), pp. 59–70. [In Persian]. [10.30482/jhyd.2018.81358](https://doi.org/10.30482/jhyd.2018.81358)
166. Roulund, A., Sumer, B.M., Fredsøe, J., and Michelsen, J., 2005. Numerical and experimental investigation of flow and scour around a circular pile. *Journal of Fluid mechanics*, 534, pp. 351–401. <https://doi.org/10.1017/S0022112005004507>
167. Radice, A., Porta, G., and Franzetti, S., 2009. Analysis of the time-averaged properties of sediment motion in a local scour process. *Water Resources Research*, 45(3). <https://doi.org/10.1029/2007WR006754>
168. Rebai, D., Radice, A., Ballio, F., and Franzetti, S., 2026. Predictors for Clear-Water and Live-Bed Scour at Circular Piers. *Journal of Hydraulic Engineering*, 152(2), p. 06025016. <https://doi.org/10.1061/JHEND8.HYENG-14569>
169. Sholtes, J.S., Ubung, C., Randle, T.J., Fripp, J., Cenderelli, D., and Baird, D.C., 2017. *Managing Infrastructure in the Stream Environment*. U.S. Department of the Interior and U.S. Department of Agriculture, Denver, CO, USA, pp. 65. <https://doi.org/10.1111/1752-1688.12692>
170. Sheppard, D.M., Melville, B., and Yang, Y., 2023a. Local equilibrium sediment scour prediction at bridge piers with complex geometries. *Journal of Hydraulic Engineering*, 149, pp. 1–14. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)HY.1943-7900.0002026](https://doi.org/10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.0002026)
171. Sheppard, D.M., Yang, Y., and Melville, B., 2023b. Method for estimating clear-water local scour rate at complex piers. *Journal of Hydraulic Engineering*, 149(10), p. 04023039. <https://doi.org/10.1061/JHEND8.HYENG-13656>
148. Pandey, M., Sharma, P.K., Ahmad, Z., and Karna, N., 2018. Maximum scour depth around bridge pier in gravel bed streams. *Natural Hazards*, 91(2), pp. 819–836. <https://doi.org/10.1007/s11069-017-3157-z>
149. Pandey, M., Azamathulla, H.M., Chaudhuri, S., Pu, J.H., and Pourshahbaz, H., 2020. Reduction of time-dependent scour around piers using collars. *Ocean Engineering*, 213(7), p. 107692. [10.1016/j.oceaneng.2020.107692](https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2020.107692)
150. Porhemmat, M., 2018. Spatial and temporal scour profile of cylindrical pier in cohesive sediment mixture. Ph.D. Thesis, Universiti Kebangsaan Malaysia, Malaysia. [10.1007/s40996-024-01443-4](https://doi.org/10.1007/s40996-024-01443-4)
151. Parker, G., Toro-Escobar, C., and Voigt Jr, R.L., 1998. Countermeasures to protect bridge piers from scour. <https://hdl.handle.net/11299/108221>
152. Pagliara, S., Carnacina, I., and Cigni, F., 2010. Sills and gabions as countermeasures at bridge pier in presence of debris accumulations. *Journal of Hydraulic Research*, 48(6), pp. 764–774. <https://doi.org/10.1080/00221686.2010.528184>
153. Pilarczyk, K., 2000. Geosynthetics and Geosystems in Hydraulic and Coastal Engineering. Rotterdam: Balkema Publishers. <https://api.taylorfrancis.com/content/books/mono/download?identifierName=doi&identifierValue=10.1201/9781003762188&type=googlepdf>
154. Park, J.H., Sok, C., Park, C.K., and Kim, Y.D., 2016. A study on the effects of debris accumulation at sacrificial piles on bridge pier scour: I. Experimental results. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 20(4), pp. 1546–1551. <https://doi.org/10.1007/s12205-015-0207-5>
155. Peng, Y., and Yin, Z.Y., 2025. Micromechanical analysis of local scour behaviors around circular piles in granular soil under steady flows with SPHDEM. *Ocean engineering*, 328, p. 121061. [10.1016/j.oceaneng.2025.121061](https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2025.121061)
156. Pizarro, A., Manfreda, S., and Tubaldi, E., 2020. The science behind scour at bridge foundations: A review. *Water*, 12(2), p. 374. <https://doi.org/10.3390/w12020374>
157. Qi, M., Chiew, Y.M., and Hong, J.H., 2013. Suction effects on bridge pier scour under clear-water conditions. *Journal of Hydraulic Engineering*, 139(6), pp. 621–629. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)HY.1943-7900.0000711](https://doi.org/10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.0000711)
158. Qi, H., Yuan, T., Zhao, F., Chen, G., Tian, W., and Li, J., 2023. Local scour reduction around cylindrical piers using permeable collars in clear water. *Water*, 15(5), p. 897. <https://doi.org/10.3390/w15050897>
159. Qi, H., Tian, W., and Zhang, H., 2021. Modeling local scour around a cylindrical pier with circular collar with tilt angles (counterclockwise around the direction of the channel cross-section) in clear-water. *Water*, 13(22), p. 3281. <https://doi.org/10.3390/w13223281>
160. Qin, C., Duan, L., Wang, D., Duan, B., and Liu, W., 2024. A Local Scour Model for Single Pile on Silty

540. <https://doi.org/10.1080/09715010.2020.1752830>
183. Schendel, A., Goseberg, N., and Schlurmann, T., 2014. Experimental study on the performance of coarse grain materials as scour protection. In Coastal Engineering Conference 2014, ASCE, Reston, VA. <https://doi.org/10.15488/895>
184. Soltani-Gerdefaramarzi, S., Afzalimehr, H., Chiew, Y.M., and Lai, J.S., 2013. Jets to control scour around circular bridge piers. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 40(3), pp. 204–212. <https://doi.org/10.1139/cjce-2012-0240>
185. Safaripour, N., Vaghefi, M. and Mahmoudi, A., 2022. Experimental study of the effect of submergence ratio of double submerged vanes on topography alterations and temporal evaluation of the maximum scour in a 180-degree bend with a bridge pier group. *International Journal of River Basin Management*, 20(4), pp. 427–441. <https://doi.org/10.1080/15715124.2020.1837144>
186. Sultana, T., Nandi, B. and Das, S., 2026. A Systematic Review of Collar-based Scour Countermeasures for Bridge Piers. *Archives of Computational Methods in Engineering*, 33(2), pp. 2229–2252. <https://doi.org/10.1007/s11831-025-10362-0>
187. Sui, S.H., Zhao, X.L., Chen, X.R., Deng, W.N. and Shen, K.M., 2023. Full-scale numerical simulation of the local scour under combined current and wave conditions based on field data. *China Ocean Engineering*, 37(6), pp. 1032–1043. <https://doi.org/10.1007/s13344-023-0086-3>
188. Sheppard, D.M., and Renna, R., 2005. *Bridge Scour Manual*; Florida Department of Transportation.
189. Tafarojnoruz, A., Gaudio, R., and Dey, S., 2010. Flow-altering countermeasures against scour at bridge piers: A review. *Journal of Hydraulic Research*, 48, pp. 441–452. <https://doi.org/10.1080/00221686.2010.491645>
190. Tan, G., Wang, J., Shu, C., and Lai, Y., 2007. Effects of Consolidation Time and Particle Size on Scour Rates of Cohesive Sediment. *Journal of Hydrodynamics*, 19, pp. 160–164. [https://doi.org/10.1016/S1001-6058\(07\)60043-2](https://doi.org/10.1016/S1001-6058(07)60043-2)
191. Tang, Z.H., Melville, B., Singhal, N., Shamseldin, A., Zheng, J.H., Guan, D.W., and Cheng, L., 2022. Countermeasures for local scour at offshore wind turbine monopile foundations: A review. *Water Science and Engineering*, 15(1), pp. 15–28. <https://doi.org/10.1016/j.wse.2021.12.010>
192. Vasudeva, R., 2023. *Damage of nearly one-fifty rural roads and ten bridges in floods across Punjab, India*. Hindustan Times, Delhi, India, Report No.08569, pp. 1–8. <https://www.hindustantimes.com/cities/chandigarh-news/floods-in-punjab-cause-extensive-damage-to-rural-roads-and-bridges-no-major-damage-reported-to-buildings-101689020031758.html>
193. Vijayasree, B.A., Eldho, T.I., and Mazumder, B.S., 2020. Turbulence statistics of flow causing scour around circular and oblong piers. *Journal of Hydraulic Research*, 58(4), pp. 673–686. <https://doi.org/10.1080/00221686.2019.1661292>
172. Schaap, H.S., and Caner, A., 2022. Bridge collapses in Turkey: causes and remedies. *Structure and Infrastructure Engineering*, 18, pp. 694–709. <https://doi.org/10.1080/15732479.2020.1867198>
173. Shahriar, A.R., Ortiz, A.C., Montoya, B.M., and Gabr, M.A., 2021. Bridge pier scour: an overview of factors affecting the phenomenon and comparative evaluation of selected models. *Transportation Geotechnics*, pp. 100549. <https://doi.org/10.1016/j.trgeo.2021.100549>
174. Schendel, A., Goseberg, N., and Schlurmann, T., 2016. Erosion stability of wide-graded quarry-stone material under unidirectional current. *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering*, 142, pp. 04015023. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)WW.1943-5460.0000321](https://doi.org/10.1061/(ASCE)WW.1943-5460.0000321)
175. Shrestha, C.K., 2015. Bridge pier flow interaction and its effect on the process of scouring (Doctoral dissertation). University of Technology Sydney (Australia). <https://search.proquest.com/open-view/66f898b068d9da02aeb-fff3be633f4b0/1.pdf?pq-origsite=gscholar&cbl=2026366&diss=y>
176. Sharp, J.A., and McAlpin, T.O., 2022. Case study: experimental investigation into the feasibility of pier nose extensions to reduce local scour around bridge piers. *Journal of Hydraulic Engineering*, 148, 05021010. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)HY.1943-7900.0001948](https://doi.org/10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.0001948)
177. Sumer, B.M., Christiansen, N., and Fredsøe, J., 1993. Influence of cross section on wave scour around piles. *Journal of waterway, port, coastal, and ocean engineering*, 119(5), pp. 477–495. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-950X\(1993\)119:5\(477\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-950X(1993)119:5(477))
178. Shams Shirband, S., Mosavi, A., and Rabczuk, T., 2020. Particle swarm optimization model to predict scour depth around a bridge pier. *Frontiers of Structural and Civil Engineering*, 14(4), pp. 855–866. <https://doi.org/10.1007/s11709-020-0619-2>
179. Sreedhara, B.M., Patil, A.P., Pushparaj, J., Kuntoji, G., and Naganna, S.R., 2021. Application of gradient tree boosting regressor for the prediction of scour depth around bridge piers. *Journal of Hydroinformatics*, 23(4), pp. 849–863. <https://doi.org/10.2166/hydro.2021.011>
180. Silvia, C.S., Ikhsan, M., and Wirayuda, A., 2021. Analysis of scour depth around bridge piers with round nose shape by HEC-RAS 5.0.7 software. In *Journal of Physics: Conference Series*, 1764(1), p. 012151. [10.1088/1742-6596/1764/1/012151](https://doi.org/10.1088/1742-6596/1764/1/012151)
181. Sonia Devi, Y., and Barbhuiya, A.K., 2017. Bridge Pier Scour in Cohesive Soil: A Review. *Sādhanā*, 42, pp. 1803–1819. <https://doi.org/10.1007/s12046-017-0698-5>
182. Singh, N.B., Devi, T.T., and Kumar, B., 2022. The local scour around bridge piers—a review of remedial techniques. *ISH Journal of Hydraulic Engineering*, 28(Suppl.1), pp. 527–

205. Wang, C., Wu, Q., Liang, J., Liang, F., and Yu, X.B., 2024. Establishment and implementation of an artificial intelligent flume for investigating local scour around underwater foundations. *Transportation Geotechnics*, 49, p. 101433. <https://doi.org/10.1016/j.trgeo.2024.101433>
206. Wang, C., Yuan, Y., Liang, F., and Tao, J., 2022. Experimental Investigation of Local Scour around Cylindrical Pile Foundations in a Double-Layered Sediment under Current Flow. *Ocean Engineering*, 251, 111084. [10.1016/j.oceaneng.2022.111084](https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2022.111084)
207. Wang, W., Yan, J., Chen, S., Liu, J., Jin, F., and Wang, B., 2023a. Gridded cemented riprap for scour protection around monopile in the marine environment. *Ocean Engineering*, 272, p. 113876. [10.1016/j.oceaneng.2023.113876](https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2023.113876)
208. Wang, G., Xu, S., Zhang, Q., and Zhang, J., 2023b. An experimental study of the local scour protection methods around the monopile foundation of offshore wind turbines. *Ocean Engineering*, 273, p. 113957. [10.1016/j.oceaneng.2023.113957](https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2023.113957)
209. Wang, L., Melville, B.W., Whittaker, C.N., and Guan, D., 2018. Effects of a downstream submerged weir on local scour at bridge piers. *Journal of Hydraulic and Environmental Research*, 20(6), pp. 101–109. [10.1016/j.jher.2018.06.001](https://doi.org/10.1016/j.jher.2018.06.001)
210. Xiong, H., Xiao, J., Jin, Y.F., Sun, X. and Chen, X., 2024. Numerical investigation of scour development around offshore tensioners under steady current. *Ocean Engineering*, 313, p. 119373. [10.1016/j.oceaneng.2024.119373](https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2024.119373)
211. Yang, Y., Melville, B.W., Xiong, X., and Wang, L., 2022. Temporal evolution of scour at bridge abutments in compound channels. *International Journal of Sediment Research*, 37(5), pp. 662–674. <https://doi.org/10.1016/j.ijsrc.2022.03.004>
212. Yoon, T.H., 2005. Wire gabion for protecting bridge piers. *Journal of Hydraulic Engineering*, 131(11), pp. 942–949. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9429\(2005\)131:11\(942\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(2005)131:11(942))
213. Zhang, W., Rennie, C.D. and Nistor, I., 2023b. A new model developed by multigene genetic programming for the temporal evolution of bridge pier scour. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 50(7), pp. 549–559. <https://doi.org/10.1139/cjce-2022-0430>
214. Zhang, F., Chen, X., Yan, J. and Gao, X. 2023a. Countermeasures for local scour around offshore wind turbine monopile foundations: A review. *Applied Ocean Research*, 141, p. 103764. [10.1016/j.apor.2023.103764](https://doi.org/10.1016/j.apor.2023.103764)
215. Zhang, F., Chen, X., Feng, T., Wang, Y., Liu, X., and Liu, X., 2022. Experimental study of grouting protection against local scouring of monopile foundations for offshore wind turbines. *Ocean Engineering*, 258, p. 111798. [10.1016/j.oceaneng.2022.111798](https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2022.111798)
216. Zhang, R., Xiong, W., and Gao, Y., 2024. A meshless model for three-dimensional direct numerical simulation of local scour around cylinder bridge
194. Vijayasree, B.A., Eldho, T.I., Mazumder, B.S., and Ahmad, N., 2019. Influence of bridge pier shape on flow field and scour geometry. *International Journal of River Basin Management*, 17(1), pp. 109–129. <https://doi.org/10.1080/15715124.2017.1394315>
195. Vasquez, J., McLean, D., and Walsh, B., 2007. Modeling Scour and Riprap Protection in Golden Ears Bridge. In Proceedings of the 18th Canadian Hydrotechnical Conference, Winnipeg, MB, Canada, 22–24 August 2007. https://www.researchgate.net/publication/327671455_Modeling_Scour_and_Riprap_Protection_in_Golden_Ears_Bridge
196. Valela, C., Nistor, I., Rennie, C.D., Lara, J.L., and Maza, M., 2021. Hybrid modelling for design of a novel bridge pier collar for reducing scour. *Journal of Hydraulic Engineering*, 147(5), p. 4021012. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)HY.1943-7900.0001875](https://doi.org/10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.0001875)
197. Valela, C., Rennie, C.D., and Nistor, I., 2022a. Improved bridge pier collar for reducing scour. *International Journal of Sediment Research*, 37(1), pp. 37–46. <https://doi.org/10.1016/j.ijsrc.2021.04.004>
198. Valela, C., Whittaker, C.N., Rennie, C.D., Nistor, I., and Melville, B.W., 2022b. Novel riprap structure for improved bridge pier scour protection. *Journal of Hydraulic Engineering*, 148(3), p. 04022002. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)HY.1943-7900.0001967](https://doi.org/10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.0001967)
199. Vaghefi, M., Zarei, E., Ahmadi, G., and Behrooz, A.M., 2023. Experimental analysis of submerged vanes configuration for mitigating local scour at piers in a sharp bend: Influence of quantity, length, and orientation. *Ocean Engineering*, 289, p. 116267. [10.1016/j.oceaneng.2023.116267](https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2023.116267)
200. Vonkeman, J.K., and Basson, G.R., 2019. Evaluation of empirical equations to predict bridge pier scour in a non-cohesive bed under clear-water conditions. *Journal of the South african institution of civil engineering*, 61(2), pp. 2–20. [10.17159/2309-8775/2019/v61n2a1](https://doi.org/10.17159/2309-8775/2019/v61n2a1)
201. Wang, S., Wei, K., Shen, Z., and Xiang, Q., 2019. Experimental investigation of local scour protection for cylindrical bridge piers using anti-scour collars. *Water*, 11(7), pp. 1515. <https://doi.org/10.3390/w11071515>
202. Wardhana, K., and Hadipriono, F.C., 2003. Analysis of recent bridge failures in the United States. *Journal of Performance of Constructed Facilities*, 17(3), pp. 144–150. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0887-3828\(2003\)17:3\(144\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0887-3828(2003)17:3(144))
203. Kalidindi, M.K., and Khosa, R., 2025. Coherent structure variations in the flow around a square pier with an evolving scour hole. *Journal of Hydraulic Engineering*, 151(4), p. 04025009. <https://doi.org/10.1061/JHEND8.HYENG-14263>
204. Wang, C., Liang, F., and Yu, X., 2017. Experimental and numerical investigations on the performance of sacrificial piles in reducing local scour around pile groups. *Natural Hazards*, 85, pp. 1417–1435. <https://doi.org/10.1007/s11069-016-2634-0>

- foundation. *Ocean Engineering*, 312, p. 119220.
[10.1016/j.oceaneng.2024.119220](https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2024.119220)
217. Zarrati, A.R., Gholami, H., and Mashahir, M.B., 2004. Application of collar to control scouring around rectangular bridge piers. *Journal of hydraulic research*, 42(1), pp. 97-103.
<https://doi.org/10.1080/00221686.2004.9641188>
218. Zarrati, A.R., Chamani, M.R., Shafaie, A. and Latifi, M., 2010. Scour countermeasures for cylindrical piers using riprap and combination of collar and riprap. *International Journal of Sediment Research*, 25(3), pp. 313-322
[https://doi.org/10.1016/S1001-6279\(10\)60048-0](https://doi.org/10.1016/S1001-6279(10)60048-0)
219. Zhao, M., 2022. A review on recent development of numerical modelling of local scour around hydraulic and marine structures. *Journal of Marine Science and Engineering*, 10(8), p. 1139.
<https://doi.org/10.3390/jmse10081139>