Journal of Iranian Water Engineering Research

Research Article, P. 43-56

https://doi.org/10.22034/ijwer.2026.599223.1143

Performance Evaluation of Bridge Piers with Curved Noses Using Scour Hole Spatial Extent Indices

Morteza Bakhtiari[1*], Mohsen Soleimani Babarsad[2], Abbas Safaei[3]

[1]Associate Professor, Department of Marine Structural Engineering, Faculty of Marine Engineering, Khorramshahr University of Marine Science and Technology, Khorramshahr, Iran

[2]Assistant Professor, Department of Water Science, Research Center of Water Science and Environment, Sho.C., Islamic Azad University, Shoushtar, Iran

[3]Ph.D. Student, Department of Water Science, Research Center of Water Science and Environment, Sho.C., Islamic Azad University, Shoushtar, Iran

Corresponding Author's E-mail: Mortezabakhtiari62@gmail.com

Received: **27 Aug 2026** Accepted: **15 Oct. 2026**
Revised: **10 Oct. 2026** Published: **25 Mar. 2025**

Homepage: ijwer.uoz.ac.ir

Abstract: Maximum scour depth is the most common index used to evaluate local scour around hydraulic structures, but it does not fully represent the spatial extent of a scour hole. This study presents a multi-criteria reanalysis of curved-nose pier models using maximum scour depth together with dimensionless longitudinal scour-hole area and dimensionless scour-zone length. Fifteen clear-water scour tests on five models were reconsidered at U/Uc = 0.75, 0.85, and 0.95. Equal, entropy, and CRITIC weights were combined with TOPSIS and VIKOR rankings, and robustness was tested using criterion removal and 20,000 Monte Carlo weight vectors. P5 was fully robust at U/Uc = 0.75, while P4 became the preferred multi-criteria alternative at U/Uc = 0.95. The results show that the geometry minimizing maximum depth is not necessarily the geometry minimizing the overall erosion extent.

Keywords: Local scour, Longitudinal bed profile, Multi-criteria decision-making, Sensitivity analysis, Monte Carlo simulation

Introduction: Local scour around bridge piers and related hydraulic structures is governed by the interaction of downflow, horseshoe vortices, wake vortices, and sediment transport near the structure. Maximum scour depth is commonly used because of its direct relevance to foundation safety, but it represents only the most severe local penetration and does not fully describe the spatial extent of the scour hole (Chiew and Melville, 1987; Ettema et al., 2017; Bento et al., 2022; Rogers et al., 2020). In a previous study based on the same experimental program, increasing the curvature of the upstream nose reduced the reported maximum scour depth and P5 showed the best depth-based performance (Bakhtiari et al., 2024). However, the longitudinal scour-hole area and scour-zone length were not quantitatively integrated with maximum depth, and the stability of the preferred geometry under different design priorities was not examined. The present study therefore does not claim methodological novelty for TOPSIS, VIKOR, entropy, CRITIC, or Monte Carlo methods. Its contribution is a secondary quantitative analysis of archived bed profiles to determine whether a geometry that is preferable based on maximum depth remains preferable when the spatial extent of erosion is also considered. This question becomes relevant when the depth, area, and length criteria favor different alternatives. The research gap addressed here is therefore the lack of a quantitative re-evaluation that jointly considers local scour severity and the spatial extent of the scour hole using the archived profiles.

Methodology: The database comprised 15 clear-water scour experiments on five plexiglass models (P1-P5) at U/Uc = 0.75, 0.85, and 0.95. P1 was the physical control and P2-P5 were decision alternatives. The models had a 3 x 3 cm section in a 31 cm-wide flume, corresponding to a 9.68% blockage ratio; the experimental setup and curved-nose models are shown in Figs. 1 and 2, and their geometric characteristics are summarized in Table 1. Three cost criteria were evaluated: reported maximum scour depth, dimensionless longitudinal scour-hole area, and dimensionless scour-zone length. The two geometric indices were obtained from the dimensionless

longitudinal profiles using Eqs. (1)-(3), and the resulting decision matrix is given in Table 2. Pearson and Spearman correlations and leave-one-criterion-out analysis were used to assess information overlap and criterion influence. Equal weights were a no-preference baseline; entropy and CRITIC weights were calculated from the pooled observations and independently at each velocity. TOPSIS and VIKOR were applied at each velocity. For VIKOR, acceptable advantage and stability were checked and sensitivity to v over 0-1 was examined. Agreement among the six method-weight rankings was assessed using Kendall's W. Robustness to weight uncertainty was evaluated using 20,000 Dirichlet(1,1,1) weight vectors; Monte Carlo sampling was not interpreted as experimental uncertainty because independent replication was unavailable.

Results and Discussion: The three criteria were not fully independent. Across the 12 observations, Pearson correlations for depth-area, depth-length, and area-length were 0.657, 0.408, and 0.825, respectively; the corresponding Spearman coefficients were 0.753, 0.511, and 0.818. Thus, the strongest information overlap occurred between area and length. Nevertheless, leave-one-criterion-out analysis showed that P5 at U/Uc = 0.75 and P4 at U/Uc = 0.95 retained the first rank after removal of any single criterion, whereas the intermediate velocity was more sensitive to criterion composition. The longitudinal profiles and criterion trends are presented in Figs. 3 and 4. Velocity-specific entropy and CRITIC weights changed in magnitude relative to the pooled weights but did not change the first-ranked alternative in the corresponding TOPSIS/VIKOR cases; the pooled and velocity-specific weights are summarized in Table 3. In VIKOR at v = 0.5, acceptable stability was satisfied in all scenarios, but acceptable advantage was not; P4 and P5 were therefore interpreted as close compromise alternatives where appropriate. Sensitivity over $0 <= v <= 1$ did not change the first-ranked alternative within a given weighting scheme. The consensus rankings and Kendall's W values are reported in Table 4. At U/Uc = 0.75, all three criteria favored P5 and the multi-criteria analysis mainly confirmed the depth-based decision. At U/Uc = 0.95, P5 retained the minimum maximum depth, whereas P4 produced a dimensionless scour area and scour-zone length approximately 25.5% and 31.8% lower than P5. Monte Carlo first-rank probabilities are listed in Table 5 and illustrated in Fig. 5. The multi-criteria framework therefore added the most value when local scour penetration and erosion extent pointed toward different designs.

Conclusion: The multi-criteria framework should be regarded as a complement to, rather than a replacement for, conventional maximum-depth assessment. Its added value is greatest when maximum depth, scour-hole area, and scour-zone length favor different alternatives. P5 was highly robust at the lowest relative velocity, while P4 provided the more balanced response at U/Uc = 0.95 when erosion extent was considered together with maximum depth. The analysis also showed that the intermediate velocity was the most sensitive to criterion composition and weighting assumptions. The principal limitations are the absence of independent experimental replication, correlation among some morphological criteria, and restriction of the decision matrix to three longitudinal scour indices. The Monte Carlo analysis quantifies weight sensitivity only and does not represent experimental repeatability or measurement uncertainty. Future work should include replicated tests, three-dimensional bed surveys, scour-hole volume, protection length, constructability, cost, and project-specific expert weighting where appropriate.

© 2025 University of Zabol, Zabol, Iran.

This is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0 license) (http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

نشریه علمی
پژوهش‌های مهندسی آب ایران

مقاله پژوهشی، ص ۵۶-۴۳
https://doi.org/10.22034/ijwer.2026.599223.1143

ارزیابی عملکرد پایه‌های دارای دماغه منحنی با استفاده از شاخص‌های گستره فضایی حفره آبشستگی

مرتضی بختیاری[1*]، محسن سلیمانی بابرصاد[2]، عباس صفائی[3]

[1]دانشیار، گروه مهندسی سازه های دریایی، دانشکده مهندسی دریا، دانشگاه علوم و فنون دریایی خرمشهر، خرمشهر، ایران
[2]استادیار، گروه مهندسی آب، مرکز تحقیقات علوم آب و محیط زیست، واحد شوشتر، دانشگاه آزاد اسلامی شوشتر، شوشتر، ایران
[3]دانشجوی دکتری، گروه مهندسی آب، مرکز تحقیقات علوم آب و محیط زیست، واحد شوشتر، دانشگاه آزاد اسلامی، شوشتر، ایران

پست الکترونیکی نگارنده مسئول: Mortezabakhtiari62@gmail.com

تاریخ دریافت: ۱۴۰۵/۰۶/۰۵ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۷/۲۳
تاریخ ویرایش: ۱۴۰۵/۰۷/۱۸ تاریخ چاپ: ۱۴۰۴/۰۱/۰۵
وبگاه نشریه: ijwer.uoz.ac.ir

چکیده: حداکثر عمق آبشستگی به‌تنهایی نمی‌تواند گستره کامل حفره را توصیف کند. هدف این پژوهش، رتبه‌بندی چندمعیاره مدل‌های اسکله دارای دماغه منحنی با در نظر گرفتن هم‌زمان عمق بیشینه، مساحت بی‌بعد مقطع طولی حفره و طول بی‌بعد ناحیه آبشستگی بود. داده‌های ۱۵ آزمایش روی پنج مدل P_1 تا P_5 در سرعت‌های نسبی (U/Uc) ۰/۷۵، ۰/۸۵، و ۰/۹۵ تحلیل شد. مدل P_1 به‌عنوان شاهد و مدل‌های P_2 تا P_5 به‌عنوان گزینه‌های تصمیم در نظر گرفته شدند. شاخص‌های هندسی از پروفیل‌های طولی بستر با درون‌یابی خطی در محل عبور از تراز صفر و انتگرال‌گیری ذوزنقه‌ای استخراج شدند. وزن معیارها با روش‌های مساوی، آنتروپی و کرتیک[1] تعیین و رتبه‌بندی با تاپسیس[2] و ویکور[3] انجام شد. پایداری نتایج با حذف معیار، ضریب توافق کندال و شبیه‌سازی ۲۰ هزار ترکیب وزنی تصادفی بررسی شد. در U/Uc=۰/۷۵، مدل P_5 در هر سه معیار برتر و در همه شبیه‌سازی‌ها رتبه نخست را کسب کرد. در U/Uc=۰/۹۵، اگرچه P_5 کمترین عمق را ایجاد کرد، مساحت و طول بی‌بعد حفره P_4 به‌ترتیب ۲۵/۵ و ۳۱/۸ درصد کمتر بود و احتمال رتبه نخست P_4 به ۸۰/۹ درصد رسید. نتایج نشان داد هندسه کمینه‌کننده عمق بیشینه الزاما بهترین گزینه برای محدودکردن گستره فرسایش نیست.

کلیدواژه‌ها: آبشستگی موضعی، پروفیل طولی بستر، تصمیم‌گیری چندمعیاره، تحلیل حساسیت، شبیه‌سازی مونت‌کارلو[4]

۱- مقدمه

آبشستگی موضعی پیرامون سازه‌های واقع در مسیر جریان از مهم‌ترین عوامل تهدیدکننده پایداری پی و بهره‌برداری ایمن از سازه‌های آبی است. برخورد جریان با بخش بالادست سازه، گرادیان فشار قائم و جریان پایین‌رونده ایجاد می‌کند؛ برهم‌کنش این جریان با بستر به تشکیل گرداب نعل‌اسبی منجر می‌شود و جدایش جریان در طرفین نیز گردابه‌های

[1] CRITIC
[2] TOPSIS
[3] VIKOR
[4] Monte Carlo simulation

دنباله‌ای را پدید می‌آورد. هم‌افزایی این ساختارها تنش برشی موضعی و انتقال رسوب را افزایش داده و حفره آبشستگی را توسعه می‌دهد (Chiew and Melville, 1987; Guan et al., 2019). پیچیدگی میدان جریان و وابستگی آن به هندسه سازه سبب شده است که برآورد آبشستگی همچنان یکی از موضوعات اصلی طراحی هیدرولیکی باشد (Ettema et al., 2017). شدت آبشستگی به سرعت و عمق جریان، نسبت سرعت جریان به سرعت بحرانی آغاز حرکت ذرات، اندازه و یکنواختی رسوبات، زمان آزمایش و هندسه سازه وابسته است. در شرایط آب زلال، سرعت جریان در بالادست کمتر از سرعت بحرانی آغاز حرکت ذرات است و رسوب قابل‌توجهی از بالادست وارد حفره نمی‌شود. از این‌رو، این شرایط برای بررسی محافظه‌کارانه اثر هندسه و توسعه زمانی حفره به‌طور گسترده استفاده شده است (Melville and Chiew, 1999). راهکارهای کنترل آبشستگی را می‌توان در دو گروه مستقیم و غیرمستقیم قرار داد. روش‌های مستقیم با حفاظت بستر و روش‌های غیرمستقیم با اصلاح میدان جریان، توان فرسایشی ساختارهای گردابه‌ای را کاهش می‌دهند. تغییر شکل بخش روبه‌جریان، کشیده‌کردن دماغه و ایجاد هندسه‌های آیرودینامیکی از جمله روش‌های غیرمستقیم‌اند. آزمایش‌های مربوط به امتداد دماغه پایه نشان داده‌اند که اصلاح مناسب مسیر خطوط جریان می‌تواند خطر آبشستگی را کاهش دهد (Sharp and McAlpin, 2022). همچنین مطالعات هندسه‌های مرکب تاکید کرده‌اند که ابعاد و آرایش اجزای سازه بر عمق بیشینه اثر مستقیم دارد (Ghodsi et al., 2021). بخش زیادی از پژوهش‌های هندسی، عملکرد سازه را با حداکثر عمق آبشستگی می‌سنجند. این شاخص برای تعیین تراز ایمن پی ضروری است، اما تنها یک ویژگی موضعی از حفره را بیان می‌کند. دو حفره با عمق بیشینه مشابه می‌توانند از نظر طول، مساحت مقطع و حجم فرسایش تفاوت زیادی داشته باشند. توسعه روش‌های تصویربرداری و اسکن سه‌بعدی نیز نشان داده است که محدودکردن ارزیابی به عمق بیشینه، بخشی از اطلاعات مورفولوژیک موثر بر طراحی حفاظت بستر را پنهان می‌کند. (Bento et al., 2022; Rogers et al., 2020). در پژوهش پیشین مبتنی بر همین برنامه آزمایشگاهی، اثر دماغه منحنی بر کنترل آبشستگی عمدتا بر پایه حداکثر عمق ارزیابی شد و با افزایش انحنای دماغه، کاهش عمق بیشینه گزارش گردید (Bakhtiari et al., 2024). بااین‌حال، حداکثر عمق تنها شدت موضعی فرسایش را بیان می‌کند و به تنهایی اطلاعاتی درباره بزرگی و گستره طولی حفره فراهم نمی‌کند. در داده‌های موجود، پروفیل‌های طولی بستر ثبت شده بودند، اما شاخص‌های کمی بیانگر گستره فضایی حفره از این پروفیل‌ها استخراج و همراه با حداکثر عمق در یک ارزیابی یکپارچه بررسی نشده بودند. بنابراین مشخص نبود که آیا هندسه برتر بر مبنای حداکثر عمق، با واردکردن شاخص‌های گستره فرسایش نیز همچنان گزینه برتر باقی می‌ماند یا خیر. ضرورت استفاده از چارچوب چندمعیاره در این مطالعه از وجود تعارض واقعی میان شاخص‌ها ناشی می‌شود، نه صرفا از تعدد معیارها. در U/Uc=۰/۷۵ هر سه شاخص مدل P_5 را ترجیح می‌دهند و تحلیل چندمعیاره عمدتا نتیجه ارزیابی عمق‌محور را تایید می‌کند. در U/Uc=۰/۸۵، P_5 از نظر عمق بیشینه و مساحت بی‌بعد بهتر است، در حالی که P_4 کوتاه‌ترین ناحیه آبشستگی را ایجاد می‌کند. این تعارض در U/Uc=۰/۹۵ آشکارتر است؛ P_5 کمترین عمق بیشینه را دارد، اما مساحت و طول بی‌بعد حفره P_4 به‌ترتیب حدود ۲۵/۵ و ۳۱/۸ درصد کمتر از P_5 است. بنابراین، در شرایطی که شدت موضعی آبشستگی و گستره فضایی فرسایش به گزینه‌های متفاوتی منجر می‌شوند، MCDM برای بررسی مصالحه میان اهداف مهندسی به کار گرفته شده است.

بر این اساس، خلأ مورد توجه پژوهش حاضر نبود یک بازارزیابی کمی از عملکرد هندسه‌های دماغه منحنی است که در آن شدت موضعی آبشستگی و گستره فضایی حفره به‌طور هم‌زمان بررسی شوند. در این مطالعه آزمایش جدیدی انجام نشده است؛ از پروفیل‌های طولی موجود دو شاخص مکمل شامل مساحت بی‌بعد مقطع طولی حفره و طول بی‌بعد ناحیه آبشستگی استخراج و پایداری انتخاب هندسه در برابر تغییر وزن معیارها، حذف معیارها و روش

رتبه‌بندی بررسی شد تاپسیس، ویکور، آنتروپی[1]، کریتیک و مونت کارلو و ابزارهای تحلیل این پرسش مهندسی هستند و خود آنها به‌عنوان نوآوری روش‌شناختی مقاله مطرح نمی‌شوند.

۲- روش‌شناسی

۲-۱- تجهیزات و شرایط آزمایشگاهی

آزمایش‌ها در فلوم مستطیلی به طول ۱۰ متر، عرض ۳۱ سانتی‌متر و عمق ۵۰ سانتی‌متر با جداره‌های شیشه‌ای انجام شد. سامانه شامل مخزن، پمپ سانتریفیوژ، شیر تنظیم، دبی‌سنج، حوضچه آرامش و سازوکار تنظیم تراز آب بود. محدوده رسوبی به طول ۲ متر و ضخامت تقریبی ۱۴ سانتی‌متر آماده شد. رسوبات یکنواخت با d_{50} برابر ۰/۹۵ میلی‌متر، d_{16} برابر ۰/۸۵ میلی‌متر و d_{84} برابر ۱/۱۰ میلی‌متر به کار رفتند. پیش از هر آزمایش، مدل پلکسی‌گلاس در محل نصب و بستر تسطیح شد. جریان به‌آرامی وارد فلوم شد و هر آزمایش پس از تثبیت دبی و تراز آب، ۱۸۰ دقیقه ادامه یافت. پس از تخلیه آرام آب، پروفیل بستر با متر لیزری و صفحه شبکه‌بندی‌شده در فواصل طولی یک سانتی‌متر برداشت شد. تجهیزات اصلی و مراحل آزمایش در شکل ۱ نشان داده شده‌اند.

۲-۲- مدل‌ها و سناریوها

پنج مدل P_1 تا P_5 با مقطع پایه ۳×۳ سانتی‌متر بررسی شدندP_1 . مدل شاهد با دماغه مستقیم بود و مدل‌های P_2 تا P_5 دارای دماغه منحنی بودند. شعاع انحنای P_2، P_3، P_4 و P_5 به‌ترتیب ۲۸/۵۲، ۲۰/۲۰، ۱۲/۹۰ و ۱۱/۰۶ سانتی‌متر و زاویه متناظر آنها به‌ترتیب ۱۸، ۴۸، ۷۹ و ۱۰۲ درجه بود. عرض فلوم B=۳۱ cm و عرض مدل b=۳ cm بود؛ بنابراین نسبت انسداد عرضی به‌صورت b/B تعریف شد و برای همه مدل‌ها حدود ۰/۰۹۷ (۶۸/۹ درصد) به دست آمد. در جدول ۱ و شکل ۲ مشخصات هندسی و تصاویری از مدل های آزمایشگاهی آورده شده است.

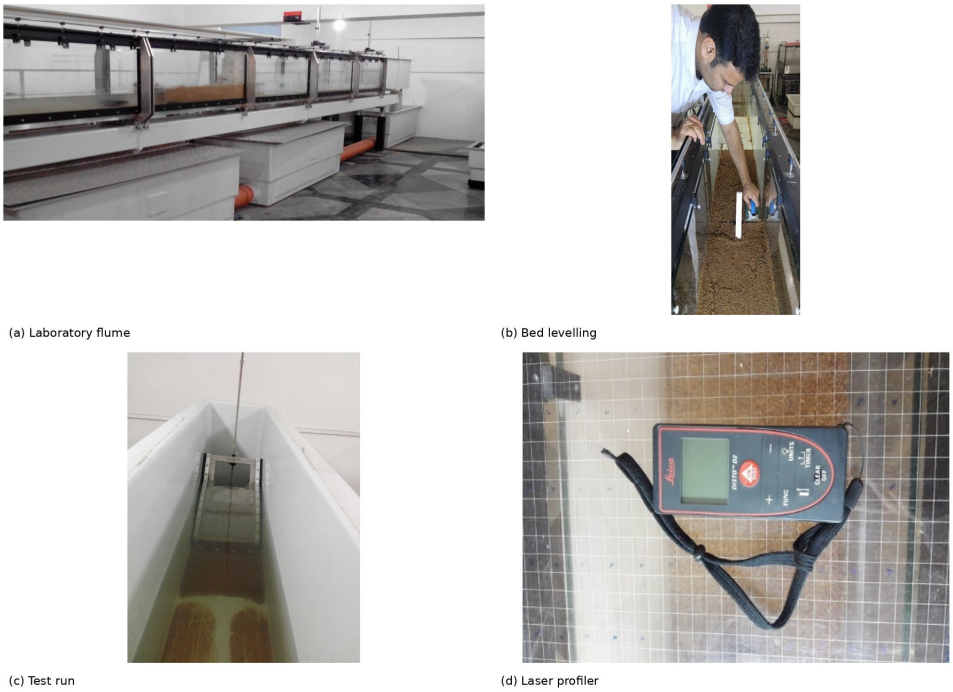


Fig. 1 Experimental equipment and test procedure: (a) laboratory flume, (b) bed leveling, (c) test run, and (d) laser profiling system.

شکل ۱ تجهیزات و مراحل آزمایش: آ (a) نمای فلوم، ب (b) تسطیح بستر، ج (c) اجرای آزمایش و د (d) سامانه برداشت لیزری.

[1] Entropy

طول مستقل دماغه در مستندات اولیه آزمایش به‌عنوان یک پارامتر هندسی مجزا ثبت نشده بود؛ ازاین‌رو، برای جلوگیری از ارائه مقدار تخمینی یا غیرمستند، مقدار عددی مستقلی برای این پارامتر گزارش نشده است. آزمایش‌ها در سه سرعت نسبی (U/Uc) ۰/۷۵، ۰/۸۵، و ۰/۹۵ انجام شدند و ۱۵ ترکیب مدل–سرعت در دسترس بود.سه معیار هزینه شامل حداکثر عمق آبشستگی گزارش‌شده، مساحت بی‌بعد مقطع طولی حفره و طول بی‌بعد ناحیه آبشستگی برای ارزیابی مدل‌ها انتخاب شدند. انتخاب معیارها بر پایه دو شرط انجام شد: هر معیار باید تفسیر مهندسی مشخص داشته باشد و مقدار آن مستقیما از داده‌های موجود قابل استخراج باشد. عمق بیشینه شدت موضعی فرسایش، مساحت بی‌بعد بزرگی فرسایش در پروفیل طولی و طول بی‌بعد گستره طولی ناحیه آبشستگی را توصیف می‌کند. این سه معیار از نظر فیزیکی کاملا مستقل فرض نشدند و میزان همپوشانی اطلاعاتی آنها با ضرایب همبستگی و تحلیل حذف یک معیار بررسی شد. مقادیر عمق بیشینه از مطالعه پیشین و دو شاخص هندسی مستقیما از پروفیل‌های طولی بی‌بعد استخراج شدند. P_1فقط شاهد فیزیکی و P_2 تا P_5 گزینه‌های تصمیم بودند.

۲-۳- منابع داده و معیارهای ارزیابی

سه معیار هزینه شامل حداکثر عمق آبشستگی گزارش‌شده، مساحت بی‌بعد مقطع طولی حفره و طول بی‌بعد ناحیه آبشستگی برای ارزیابی مدل‌ها انتخاب شدند. مقادیر عمق بیشینه از نمودار مرجع مطالعه پیشین استخراج و به همان مقیاس گزارش‌شده وارد ماتریس تصمیم شدند. از آنجا که تاپسیس و ویکور هر معیار را پیش از رتبه‌بندی نرمال می‌کنند، تبدیل خطی واحد این معیار بر رتبه نسبی گزینه‌ها اثر نمی‌گذارد. در مقابل، دو شاخص هندسی مستقیما از پروفیل‌های طولی بی‌بعد استخراج شدند. مدل P_1 فقط به‌عنوان شاهد فیزیکی استفاده شد و مدل‌های P_2 تا P_5 گزینه‌های تصمیم بودند.

مقادیر سه معیار برای چهار گزینه تصمیم در هر سه سرعت نسبی در جدول ۲ ارائه شده و مبنای رتبه‌بندی‌های بعدی را تشکیل می‌دهند.

تحلیل وابستگی و همپوشانی معیارها

برای کمی‌سازی وابستگی میان سه معیار، ضرایب همبستگی پیرسون و اسپیرمان بر پایه ۱۲ مشاهده مربوط به P_2 تا P_5 در سه سرعت محاسبه شدند. با توجه به تعداد محدود مشاهدات و نبود تکرار مستقل، این ضرایب فقط به‌صورت توصیفی تفسیر شدند. علاوه بر این، تحلیل حذف

جدول ۱ مشخصات هندسی مدل‌های آزمایشگاهی.

Table 1 Geometric characteristics of the experimental models.

Model	R (cm)	θ (°)	b/B (%)
P1	–	–	9.68
P2	28.52	18	9.68
P3	20.20	48	9.68
P4	12.90	79	9.68
P5	11.06	102	9.68

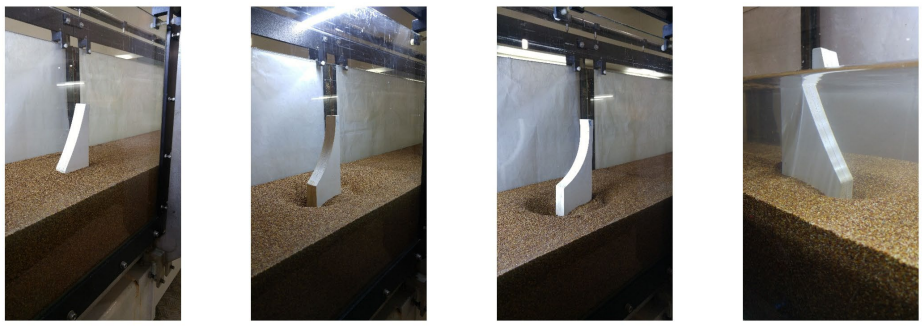


Fig. 2 Examples of plexiglass pier models with curved noses, P2-P5.

شکل ۲ نمونه مدل‌های پلکسی‌گلاس دارای دماغه منحنی P2-P5.

یک معیار[1] Ileانجام شد؛ در هر مرحله یکی از سه معیار حذف و رتبه‌بندی با دو معیار باقی‌مانده و وزن مساوی مجددا با تاپسیس و ویکور اجرا شد تا مشخص شود رتبه‌های P_4 و P_5 تا چه حد به حضور هر معیار وابسته‌اند. این تحلیل برای ارزیابی این موضوع به کار رفت که آیا همبستگی میان معیارها می‌تواند از طریق شمارش چندباره اطلاعات، رتبه یک گزینه را به‌طور مصنوعی تقویت کند یا خیر.

۲-۴- استخراج شاخص‌های هندسی

مختصات پروفیل بر پایه روابط (۱) تا (۳) تعریف شد که در آنها d بعد مشخصه مدل و Δz تغییر تراز بستر نسبت به تراز اولیه است. مقادیر منفی z^* نشان‌دهنده فرسایش بودند. مساحت بی‌بعد مقطع طولی حفره از انتگرال قدر مطلق بخش منفی پروفیل و طول بی‌بعد ناحیه آبشستگی از مجموع طول بازه‌های واقع در زیر تراز اولیه محاسبه شد. در محل عبور پروفیل از تراز صفر، موقعیت تقاطع با درون‌یابی خطی تعیین شد و انتگرال‌گیری به روش ذوزنقه‌ای انجام گرفت.

$$x^* = x/d,\ z^* = \Delta z/d \qquad (1)$$

$$A_s^* = A_s/d^2 = \int_{\Omega_s} |z^*(x^*)|\, dx^*,\ \Omega_s = \{x^* \mid z^*(x^*) < 0\} \qquad (2)$$

$$L_s^* = L_s/d = \int_{\Omega_s} dx^* \qquad (3)$$

۲-۵- وزن‌دهی و رتبه‌بندی

برای هر سرعت نسبی، ماتریس تصمیم مستقلی با چهار گزینه و سه معیار تشکیل شد. وزن مساوی (wj=1/3) صرفا به‌عنوان حالت مرجع بدون ترجیح قبلی استفاده شد و به معنی برابری اهمیت فیزیکی معیارها نیست. وزن‌های عینی با روش‌های آنتروپی و کریتیک محاسبه شدند. در تحلیل اولیه، یک مجموعه وزن ثابت از ۱۲ مشاهده محاسبه شد تا مقایسه میان سرعت‌ها تسهیل شود. سپس، برای بررسی اثر تجمیع داده‌های سه سرعت، وزن‌های آنتروپی و کریتیک برای هر سرعت نیز به‌صورت مستقل محاسبه و رتبه‌بندی‌های متناظر تکرار شدند.

در تاپسیس پس از نرمال‌سازی برداری و اعمال وزن‌ها، فاصله هر گزینه از راه‌حل ایده‌آل و ضدایده‌آل و ضریب نزدیکی[2] محاسبه شد؛ مقدار بزرگ‌تر این ضریب نشان‌دهنده رتبه بهتر است.

جدول ۲ ماتریس معیارهای مورد استفاده برای رتبه بندی مدل ها

Table 2 Decision matrix used for ranking the pier models.

U/Uc	Model	Reported maximum depth	Dimensionless area, A_s^*	Dimensionless length, L_s^*
0.75	P2	6.10	2.288	9.000
0.75	P3	2.00	4.459	13.375
0.75	P4	1.10	1.400	7.000
0.75	P5	0.70	0.824	6.324
0.85	P2	8.50	4.875	10.500
0.85	P3	4.00	9.044	15.750
0.85	P4	2.20	3.500	8.000
0.85	P5	1.80	2.700	9.500
0.95	P2	10.00	11.091	11.625
0.95	P3	7.00	13.368	16.071
0.95	P4	4.00	4.827	7.938
0.95	P5	3.10	6.482	11.640

[1] Eave-one-criterion-out

[2] CCi

در این مطالعه وزن‌دهی ذهنی یا خبره‌محور به کار نرفت، زیرا فرآیند مستقل و از پیش طراحی‌شده‌ای برای اخذ نظر خبرگان وجود نداشت و افزودن وزن‌های ذهنی پس از مشاهده نتایج می‌توانست قضاوتی پسینی و غیرقابل‌بازتولید وارد تحلیل کند. این انتخاب به معنی بی‌اهمیت‌بودن قضاوت مهندسی نیست و در کاربردهای پروژه‌محور می‌توان از فرایند تحلیل سلسله مراتبی[1] یا استخراج ساختار یافته نظر خبرگان استفاده کرد.

در ویکور شاخص‌های مطلوبیت جمعی Si، بیشینه نارضایتی Ri و شاخص سازشی Qi محاسبه شدند. مقدار $V = 0.5$ به‌عنوان حالت مرجع در نظر گرفته شد و حساسیت رتبه‌ها در بازه $0 \le V \le 1$ بررسی شد. علاوه بر کمینه بودن Q، دو شرط استاندارد راه‌حل سازشی نیز ارزیابی شدند: شرط برتری قابل قبول

$$DQ = \frac{1}{m-1} = 0.333 \text{ با } Q(a_2) - Q(a_1) \ge DQ$$

برای چهار گزینه، و شرط پایداری قابل قبول که بر اساس آن گزینه نخست Q باید در رتبه‌بندی S یا R نیز بهترین باشد. در صورت برقرار نبودن شرط برتری قابل قبول، گزینه‌های نزدیک مطابق قواعد ویکور به عنوان مجموعه راه‌حل سازشی تفسیر شدند. در نتیجه، معرفی یک گزینه به عنوان راه‌حل قطعی فقط زمانی مجاز دانسته شد که شروط استاندارد ویکور نیز برقرار باشند؛ در غیر این صورت گزینه‌های نزدیک به‌عنوان مجموعه راه‌حل سازشی گزارش شدند.

۲-۶- توافق رتبه‌ها و تحلیل حساسیت

برای هر سرعت، شش رتبه‌بندی حاصل از دو روش و سه الگوی وزن‌دهی تولید شد. رتبه اجماعی به‌صورت مرتب‌سازی میانگین رتبه هر گزینه در این شش ترکیب تعریف شد. برای سنجش توافق هم‌زمان میان شش رتبه‌بندی از ضریب توافق کندال[2] استفاده شد؛ اگر Ri مجموع رتبه‌های گزینه $\bar{R}$، میانگین مجموع رتبه‌ها، n تعداد گزینه‌ها و m تعداد رتبه‌بندی‌ها باشد، $S=\Sigma(Ri-\bar{R})^2$ و $W=12S/[m^2(n^3-n)]$ است. برای مقایسه زوجی رتبه عمق‌محور با رتبه اجماعی از اسپیرمان و احتمال جایگشتی دقیق استفاده شد. تحلیل حذف معیار و شبیه‌سازی مونت کارلو با ۲۰ هزار بردار وزن از Dirichlet (۱/۱/۱) نیز اجرا شد. در روش مونت کارلو مقادیر معیارها ثابت و فقط وزن‌ها متغیر بودند؛ بنابراین احتمال رتبه نخست فقط پایداری تصمیم نسبت به وزن‌ها را نشان می‌دهد و بیانگر احتمال فیزیکی برتری مدل در تکرار آزمایش نیست. انتخاب ضریب توافق کندال به این دلیل بود که هدف، سنجش توافق هم‌زمان میان شش رتبه‌بندی بود؛ در مقابل، ضریب توافق کندال و اسپیرمان برای مقایسه زوجی مناسب‌ترند. ازاین‌رو ضریب اسپیرمان به‌طور جداگانه برای مقایسه رتبه عمق‌محور و رتبه اجماعی استفاده شد.

۲-۷- محدودیت آماری و دامنه عدم‌قطعیت

برای هر ترکیب مدل و سرعت فقط یک آزمایش مستقل موجود بود و تکرار آزمایشگاهی در دسترس نبود. نقاط متوالی پروفیل نیز به دلیل وابستگی مکانی نمی‌توانند تکرار مستقل تلقی شوند؛ ازاین‌رو برآورد واریانس درون‌گروهی، فاصله اطمینان و آزمون‌های مقایسه میانگین امکان‌پذیر نبود. در این مطالعه دو نوع عدم قطعیت از یکدیگر تفکیک شدند: عدم‌قطعیت آزمایشگاهی شامل تغییرپذیری ناشی از تکرار آزمایش، خطای اندازه‌گیری و تغییرات تصادفی پاسخ فیزیکی است که با داده‌های موجود قابل برآورد نیست؛ در مقابل، شبیه‌سازی مونت کارلو فقط عدم قطعیت تصمیم ناشی از تغییر وزن معیارها را بررسی می‌کند و مقادیر مشاهده‌شده معیارها در تمام تکرارهای شبیه‌سازی ثابت می‌مانند. بنابراین نتایج مونت کارلو نباید به‌عنوان احتمال فیزیکی برتری یک مدل یا جایگزین تکرار آزمایشگاهی تفسیر شوند. تحلیل حاضر نیز به سه شاخص مورفولوژیک قابل استخراج از پروفیل‌های طولی محدود است و معیارهایی مانند حجم سه‌بعدی حفره، سطح پلان، طول حفاظت بستر، هزینه و قابلیت اجرا در داده‌های موجود اندازه‌گیری نشده‌اند.

[1] Analytical Hierarchy Process (AHP)

[2] Kendall's W

۳- نتایج و بحث

۳-۱- رفتار پروفیل‌های طولی

در همه مدل‌ها ناحیه فرسایش در مجاورت دماغه و پشته رسوبی در پایین‌دست شکل گرفت. با افزایش سرعت نسبی، عمق و مساحت بی‌بعد حفره عموما افزایش یافت، اما تغییر طول حفره برای مدل‌ها یکنواخت نبود. در سرعت ۰/۷۵، P5 کمترین عمق، مساحت بی‌بعد و طول بی‌بعد را داشت. در سرعت ۰/۸۵، P_5 از نظر عمق و مساحت بی‌بعد بهتر بود، ولی طول حفره P_4 کمتر شد. در سرعت ۰/۹۵، تفاوت P_4 و P_5 آشکارتر بود: P_5 کمترین عمق را ایجاد کرد، اما P_4 حفره‌ای کوتاه‌تر و با مساحت بی‌بعد کمتر داشت. این تغییرات در پروفیل‌های شکل ۳ دیده می‌شود و نشان می‌دهد تغییر دماغه علاوه بر شدت موضعی فرسایش، محل بازگشت پروفیل به تراز اولیه و گستره انتقال رسوب را نیز تغییر می‌دهد.

۳-۲- مقایسه شاخص‌های هندسی

در سرعت ۰/۷۵ ، مساحت بی‌بعد مقطع طولی مدل‌های P_2، P_3، P_4 و P_5 به‌ترتیب ۲/۲۸۸، ۴/۴۵۹، ۱/۴۰۰ و ۰/۸۲۴ و طول بی‌بعد ناحیه آبشستگی آنها به‌ترتیب ۹۰۰۰، ۱۳/۳۷۵ ، ۷۰۰۰ و ۶/۳۲۴ بود. در سرعت ۰/۸۵، مساحت بی‌بعد P_5 برابر ۲/۷۰۰ و کمترین مقدار بود، درحالی‌که P_4 با طول ۸۰۰۰ کوتاه‌ترین حفره را ایجاد کرد. در سرعت ۰/۹۵، مساحت بی‌بعد و طول بی‌بعد حفره P_4 به‌ترتیب ۴/۸۲۷ و ۷/۹۳۸ و برای P_5 به‌ترتیب ۶/۴۸۲ و ۱۱/۶۴۰ بود؛ بنابراین مساحت و طول بی‌بعد حفره P_4 نسبت به P_5 به‌ترتیب ۲۵/۵ و ۳۱/۸ درصد کمتر شد. روند معیارها در شکل ۴ مقایسه شده است. مدل P_3 نیز نشان داد کاهش عمق لزوما به محدودشدن گستره حفره منجر نمی‌شود؛ زیرا در سرعت ۰/۹۵ طول بی‌بعد حفره آن به ۱۶/۰۷۱ رسید.

۳-۳- وابستگی معیارها و تحلیل حذف معیار

تحلیل همبستگی نشان داد سه معیار کاملا مستقل نیستند. ضرایب پیرسون[1] برای زوج‌های عمق–مساحت، عمق–طول و مساحت–طول به‌ترتیب ۰/۶۵۷، ۰/۴۰۸ و ۰/۸۲۵ و ضریب اسپیرمان[2] به‌ترتیب ۰/۷۵۳، ۰/۵۱۱ و ۰/۸۱۸ بودند؛ بنابراین بیشترین همپوشانی اطلاعاتی میان مساحت و طول مشاهده شد. بااین‌حال، این وابستگی به معنی یکسان‌بودن اطلاعات مهندسی معیارها نیست. تحلیل حذف یک معیار نشان داد در U/Uc=۰/۷۵، P_5 و در U/Uc=۰/۹۵، P_4 پس از حذف هر یک از سه معیار همچنان رتبه نخست را حفظ کردند. حساسیت اصلی در U/Uc=۰/۸۵ مشاهده شد و در برخی ترکیب‌های دو معیاره P_4 و P_5 جابه‌جا شدند. بنابراین وجود همبستگی میان معیارها به‌عنوان یک محدودیت پذیرفته می‌شود، اما نتیجه اصلی در سرعت‌های پایین و بالا صرفا ناشی از همپوشانی اطلاعاتی[3] نیست.

۳-۴- وزن معیارها

وزن‌های تجمیعی آنتروپی برای عمق، مساحت و طول به‌ترتیب ۰/۴۶۱، ۰/۴۵۷ و ۰/۰۸۲ و وزن‌های تجمیعی کریتیک به‌ترتیب ۰/۴۲۳، ۰/۲۲۴ و ۰/۳۵۳ بود. محاسبه مستقل وزن‌ها برای هر سرعت نشان داد مقادیر تا حدی به سرعت وابسته‌اند؛ با این‌حال، استفاده از وزن‌های سرعت ویژه گزینه رتبه نخست را در هیچ یک از ترکیب‌های متناظر تاپسیس/ ویکور نسبت به حالت تجمیعی تغییر نداد. وزن مساوی فقط حالت مرجع فاقد ترجیح بود و به معنی برابری اهمیت فیزیکی معیارها نیست. در جدول ۳ وزن‌های تجمیعی و سرعت‌ویژه ارائه شده است. اجرای مجدد تاپسیس و ویکور با وزن‌های مستقل هر سرعت نشان داد در U/Uc=۰/۷۵ مدل P_5 در همه حالات نخست باقی ماند، در U/Uc=۰/۹۵ مدل P_4 رتبه نخست را حفظ کرد و در U/Uc=۰/۸۵ همان حساسیت میان P_4 و P_5 مشاهده شد؛ بنابراین نتیجه اصلی ناشی از تجمیع داده‌های سه سرعت برای محاسبه وزن‌ها نیست.

۳-۵- نتایج تاپسیس و ویکور

در سرعت نسبی $\frac{U}{U_C} = 0.75$ ، نتایج دو روش تاپسیس و ویکور در هر سه حالت وزن‌دهی مساوی،آنتروپی وکریتیک

[1] Pearson
[2] Spearman
[3] double counting

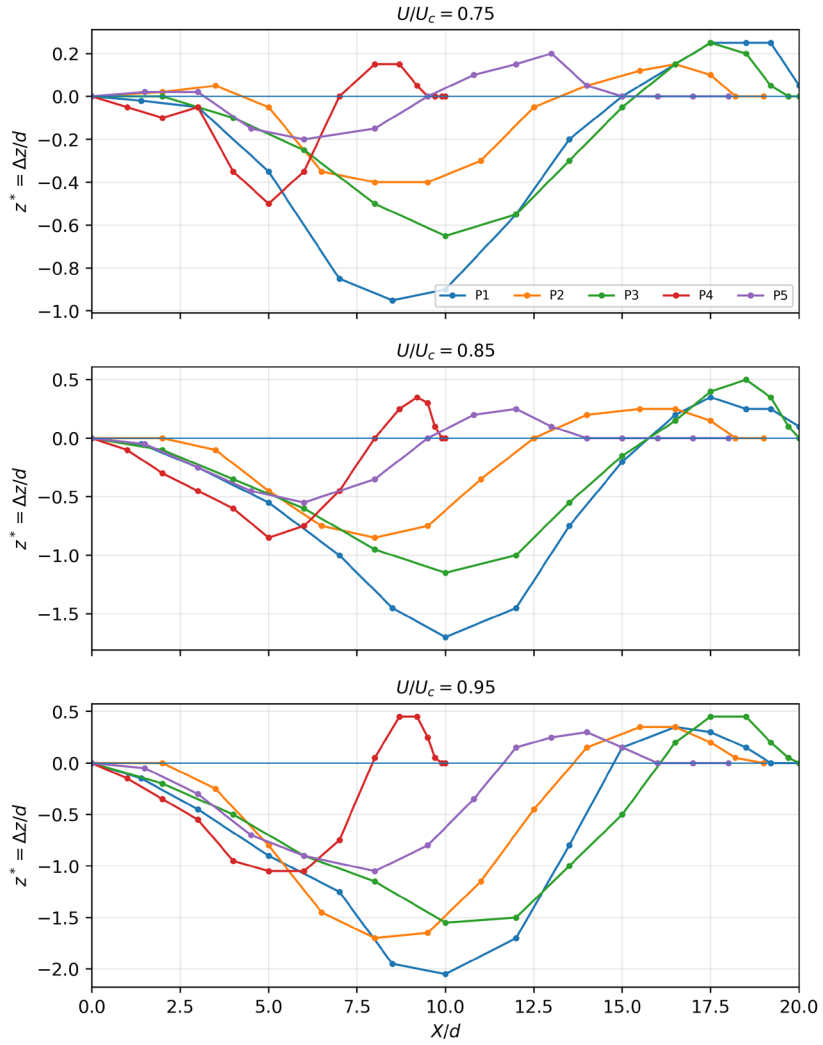


Fig. 3 Comparison of dimensionless longitudinal bed profiles of P1-P5 at U/Uc = 0.75, U/Uc = 0.85, and U/Uc = 0.95.

شکل ۳ مقایسه پروفیل‌های طولی بی‌بعد بستر مدل‌های P_1 تا P_5 در سه سرعت نسبی ۰/۷۵، ۰/۸۵ و ۰/۹۵

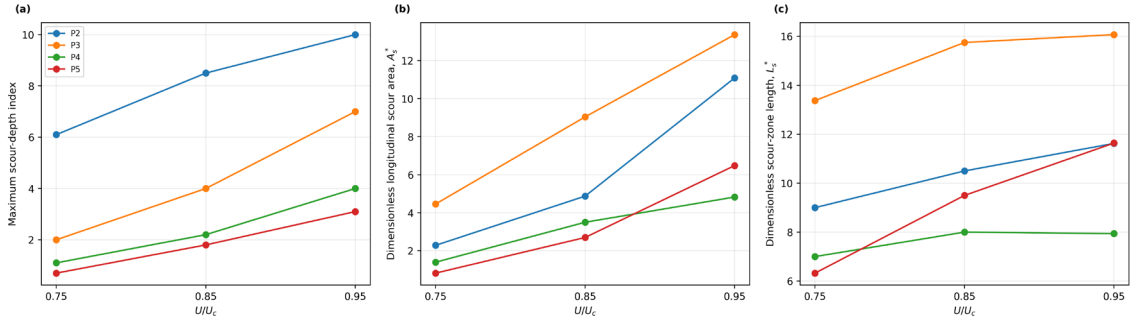


Fig. 4 Variation of ranking criteria with relative velocity: (a) maximum scour depth, (b) dimensionless longitudinal scour-hole area (A_s^*), and (c) dimensionless scour-zone length (L_s^*).

شکل ۴ تغییرات معیارها با سرعت نسبی: آ (a) شاخص عمق بیشینه، ب (b) مساحت بی‌بعد مقطع طولی حفره (A_s^*) و ج (c) طول بی‌بعد ناحیه آبشستگی (L_s^*).وزن‌های تجمیعی و سرعت‌ویژه معیارها.

جدول ۳ وزن‌های تجمیعی و سرعت‌ویژه معیارها

Table 3 Pooled and velocity-specific criterion weights.

Scope / method	Maximum depth	Dimensionless area	Dimensionless length
Equal (reference)	0.333	0.333	0.333
Pooled Entropy	0.461	0.457	0.082
Pooled CRITIC	0.423	0.224	0.353
U/Uc=0.75: Entropy / CRITIC	0.596 / 0.507	0.324 / 0.242	0.080 / 0.251
U/Uc=0.85: Entropy / CRITIC	0.571 / 0.496	0.328 / 0.245	0.101 / 0.260
U/Uc=0.95: Entropy / CRITIC	0.488 / 0.454	0.367 / 0.193	0.1450.353

یکسان بود و مدل P_5 در همه حالات رتبه نخست را به دست آورد. این نتیجه با رفتار سه معیار نیز سازگار است، زیرا در این سرعت P_5 از نظر حداکثر عمق، مساحت بی‌بعد حفره و طول بی‌بعد ناحیه آبشستگی عملکرد بهتری داشت. بنابراین، در سرعت پایین انتخاب مدل برتر به روش رتبه‌بندی یا نحوه وزن‌دهی حساس نبود.

در سرعت نسبی $\frac{U}{U_C} = 0.85$ اختلاف میان روش‌ها آشکارتر شد. روش تاپسیس در هر سه حالت وزن‌دهی، مدل P_5 را در رتبه نخست قرار داد. در مقابل، در روش ویکور، با وزن مساوی و وزن‌های کیریتیک مدل P_4 رتبه نخست را کسب کرد، در حالی که با وزن‌های آنتروپی مدلP_5 در رتبه نخست قرار گرفت. این تفاوت نشان می‌دهد که سرعت میانی حساس‌ترین شرایط از نظر نحوه تلفیق معیارها و وزن‌دهی آنهاست و رقابت اصلی در این سرعت میان P_4 و P_5رخ می‌دهد.

در سرعت نسبی $\frac{U}{U_C} = 0.95$، هر دو روش تاپسیس ویکور و تمامی طرح‌های وزن‌دهی، مدل P_4 را در رتبه نخست قرار دادند. اگرچه P_5 کمترین حداکثر عمق آبشستگی را ایجاد کرد، برتری P_4 از نظر مساحت و طول بی‌بعد حفره باعث شد ارزیابی چندمعیاره، P_4 را به‌عنوان گزینه متعادل‌تر معرفی کند.

برای تفسیر نتایج ویکور ، علاوه بر مقدار(Q) ، دو شرط استاندارد «پایداری قابل قبول» و «برتری قابل قبول» نیز بررسی شد. در $V = 0.5$، شرط پایداری قابل قبول در همه ۹ ترکیب سرعت و وزن‌دهی برقرار بود؛ بااین‌حال، اختلاف مقدار (Q) بین گزینه اول و دوم در هیچ‌یک از این حالات به مقدار آستانه $DQ = 0.333$نرسید. ازاین‌رو، نتایج ویکور ,نباید به‌صورت معرفی یک برنده قطعی تفسیر شوند و در مواردی که فاصله دو گزینه نخست اندک است، P_4 وP_5 به‌عنوان گزینه‌های سازشی نزدیک در نظر گرفته شدند.

۳-۶- توافق رتبه‌ها و تحلیل حساسیت

ضریب توافق کندال در سرعت‌های ۰/۷۵، ۰/۸۵و ۰/۹۵ به‌ترتیب ۰/۹۴۴، ۰/۸۲۲ و ۰/۹۴۴ بود و نشان داد بیشترین اختلاف میان روش‌ها در سرعت میانی رخ می‌دهد. رتبه اجماعی در دو سرعت نخست با رتبه عمق‌محور یکسان و در سرعت ۰/۹۵ با جابه‌جایی P_4 و P_5 همراه شد. ضریب اسپیرمان در سرعت ۰/۹۵ برابر ۰/۸ و احتمال جایگشتی دقیق ۰/۳۳۳ بود؛ با توجه به وجود فقط چهار گزینه، این شاخص صرفا توصیفی تفسیر شد. در P_5 ، مونت کارلو در ۰/۷۵ در ۱۰۰ درصد بردارهای وزن رتبه نخست شد؛ در ۰/۸۵ سهم رتبه نخست P_5 و P_4 به‌ترتیب ۶۵/۹ و ۳۴/۱ درصد و در ۰/۹۵ سهم P_4 و P_5 به‌ترتیب ۸۰/۹ و ۱۹/۱درصد بود. این درصدها فقط پایداری تصمیم نسبت به وزن معیارها را نشان می‌دهند و نباید احتمال فیزیکی برتری مدل‌ها تلقی شوند. رتبه‌های اجماعی و مقادیر ضریب توافق در جدول ۴ ارائه شده‌اند. نتایج احتمال رتبه نخست در جدول ۵ و مقایسه P_4 و P_5 در شکل ۵ نمایش داده شده است.

۳-۷- ارزش افزوده مهندسی و محدودیت‌ها

نتایج نشان داد کاربرد چارچوب چندمعیاره در همه شرایط لزوما به رتبه‌بندی متفاوتی نسبت به حداکثر عمق منجر نمی‌شود. در $\frac{U}{U_C} = 0.75$ که هر سه معیار P_5 را ترجیح می‌دهند، MCDM عمدتا نقش تاییدکننده تصمیم عمق‌محور را دارد. در $\frac{U}{U_C} = 0.85$ تعارض محدود میان طول حفره و دو معیار دیگر حساسیت انتخاب P_4/P_5 را افزایش می‌دهد. در $\frac{U}{U_C} = 0.95$، P_5 کمترین عمق بیشینه را دارد، اما مساحت و طول بی‌بعد P_4 به ترتیب ۲۵/۵ و ۳۱/۸ درصد کمتر است. بنابراین ارزش افزوده اصلی چارچوب زمانی آشکار می‌شود که شاخص‌های شدت و گستره فرسایش به گزینه‌های متفاوتی اشاره کنند؛ در چنین شرایطی MCDM امکان بررسی مصالحه میان اهداف و پایداری انتخاب در برابر تغییر وزن‌ها و ترکیب معیارها را فراهم می‌کند. ازاین‌رو این چارچوب باید مکمل تحلیل فیزیکی و ارزیابی حداکثر عمق تلقی شود، نه جایگزین آن نتایج با مطالعاتی هم راستاست که بر اثر هندسه رو به جریان بر ساختار گرداب نعل‌اسبی و کاهش آبشستگی تاکید کرده‌اند (Sharp and McAlpin, 2022; Ghodsi et al., 2021). با این‌حال، یافته جدید این پژوهش آن است که روند عمق بیشینه الزاما به شاخص‌های گستره حفره تعمیم‌پذیر نیست؛ و این نتیجه با تاکید بر ضرورت پایش کل هندسه حفره سازگار است (Bento et al., 2022; Rogers et al., 2020). از دید طراحی، P_5 هنگامی مناسب‌تر است که تراز پی و نفوذ عمقی کنترل‌کننده باشد؛ اما P_4 در سرعت‌های بالا می‌تواند طول حفاظت بستر و گستره ناحیه در معرض فرسایش را کاهش دهد. بنابراین انتخاب هندسه باید بر اساس اولویت پروژه انجام شود و معرفی یک گزینه مطلقا برتر بدون تعریف معیار طراحی، قابل دفاع نیست.

۴- نتیجه‌گیری

در این پژوهش، داده‌های آزمایشگاهی موجود با سه معیار حداکثر عمق آبشستگی، مساحت بی‌بعد مقطع طولی حفره و طول بی‌بعد ناحیه آبشستگی بازتحلیل شدند. هدف، معرفی روش MCDM جدید نبود، بلکه بررسی این موضوع بود که آیا انتخاب هندسه بر پایه عمق بیشینه با واردکردن گستره حفره پایدار می‌ماند. تحلیل همبستگی نشان داد معیارها کاملا مستقل نیستند و بیشترین همپوشانی میان مساحت و طول وجود دارد؛ با این‌حال، تحلیل حذف معیار نشان داد نتیجه اصلی در سرعت‌های ۰/۷۵ و ۰/۹۵ به حضور یک معیار خاص وابسته نیست.

جدول ۴ رتبه اجماعی و ضریب توافق مدل‌ها.

Table 4 Consensus ranking of the models and Kendall's coefficient of concordance.

U/Uc	Rank 1	Rank 2	Rank 3	Rank 4	Kendall's W
0.75	P5	P4	P3	P2	0.944
0.85	P5	P4	P3	P2	0.822
0.95	P4	P5	P3	P2	0.944

جدول ۵ احتمال کسب رتبه نخست در تحلیل مونت‌کارلو.

Table 5 Probability of achieving the first rank in the Monte Carlo analysis.

U/Uc	P2	P3	P4	P5
0.75	0.0%	0.0%	0.0%	100.0%
0.85	0.0%	0.0%	34.1%	65.9%
0.95	0.0%	0.0%	80.9%	19.1%

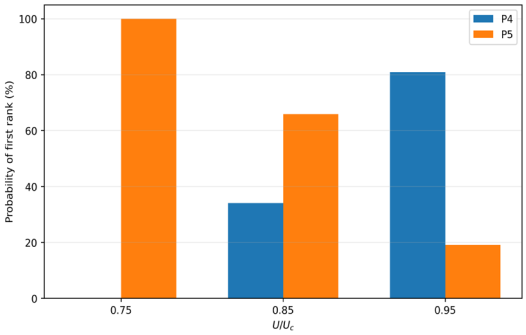


Fig. 5 Probability of first rank for P4 and P5 under 20,000 random weight vectors.

شکل ۵ احتمال کسب رتبه نخست P_4 و P_5 در تحلیل ۲۰ هزار وزن تصادفی.

در سرعت ۰/۷۵، P_5 در همه سناریوها بسیار پایدار بود و تحلیل چندمعیاره عمدتا نتیجه عمق‌محور را تایید کرد. در سرعت ۰/۸۵ بیشترین حساسیت به ترکیب معیارها و نوع وزن‌دهی مشاهده شد. در سرعت ۰/۹۵ ، اگرچه P_5 کمترین عمق بیشینه را ایجاد کرد، P_4 به دلیل مساحت و طول کمتر حفره پاسخ متعادل‌تری داشت و در سناریوهای ثابت و بیشتر بردارهای وزن رتبه نخست را کسب کرد. در ، ویکور شرط برتری قابل قبول در $V = 0.5$ برقرار نشد؛ ازاین‌رو P_4 و P_5 در بسیاری از حالات باید گزینه‌های سازشی نزدیک تلقی شوند و از معرفی یک برنده مطلق بدون تعریف اولویت طراحی پرهیز شود.

چارچوب حاضر مکمل ارزیابی متداول مبتنی بر حداکثر عمق است و بیشترین ارزش آن زمانی آشکار می‌شود که معیارهای شدت و گستره فرسایش به گزینه‌های متفاوتی منجر شوند. نبود تکرار مستقل مهم‌ترین محدودیت مطالعه است و مونت کارلو فقط عدم‌قطعیت وزن‌ها را بررسی می‌کند، نه عدم‌قطعیت آزمایشگاهی. همچنین تعداد معیارها محدود است و در مطالعات آینده باید آزمایش‌های تکراری، برداشت سه‌بعدی بستر، حجم حفره، طول حفاظت، قابلیت اجرا، هزینه و وزن‌های پروژه محور مبتنی بر نظر خبرگان بررسی شوند.

5- List of Symbols

A_s (L^2)	Longitudinal scour-hole area
A_s* (-)	Dimensionless longitudinal scour-hole area
CC_i (-)	TOPSIS closeness coefficient
D (L)	Characteristic model dimension
L_s (L)	Scour-zone length
L_s* (-)	Dimensionless scour-zone length
Q_i (-)	VIKOR compromise index
R_i (-)	VIKOR individual regret index
S_i (-)	VIKOR group utility index
U ($m\ s^{-1}$)	Mean flow velocity
U^c ($m\ s^{-1}$)	Critical velocity for incipient sediment motion
U/U^c (-)	Relative flow velocity
W (-)	Kendall's coefficient of concordance
w_j (-)	Weight of criterion j
X (L)	Longitudinal coordinate
x*(-)	Dimensionless longitudinal coordinate
z* (-)	Dimensionless bed-level change
Δz (L)	Bed-level change
Ω_s (-)	Dimensionless scour domain

Acknowledgments

The authors would like to express their sincere gratitude to Khorramshahr University of Marine Science and Technology and the Khuzestan Water and Power Authority for providing the facilities and support necessary to conduct this research.

Credit Authorship Contribution Statement

Conceptualization, M.B., M.S.B. and A.S.; Methodology, M.B., M.S.B. and A.S.; Formal Analysis, M.B.,.M.S.B. and A.S.; Investigation, M.B., M.S.B. and A.S.; Resources, M.B., M.S.B. and A.S.; Data Curation, A.S; Writing- Original Draft Preparation, M.B. and M.S.B.; Writing-Review & Editing, M.B. and M.S.B.; Supervision, M.B.; Project Administration, M.B.

All authors have read and agreed to the published version of the manuscript.

Funding

The research received no external funding.

Data Availability Statement

The data supporting the findings of this study are available from the corresponding author upon reasonable request. This manuscript presents a secondary analysis of an experimental dataset partially reported previously by Bakhtiari et al. (2024); no new experiments were conducted for the present analysis.

Conflicts of Interest

The authors declare no conflict of interest.

References

Bakhtiari, M., Solimani Babarsad, M. and Safaei, A. (2024). Scour control in front of a pier using a curved flow-deflecting nose. Hydrophysics, 10(1), 113-125. DOR: 20.1001.1.24767131.1403.10.1.9.1. (In Persian).

Bento, A.M., Couto, L., Viseu, T. and Pêgo, J.P. (2022). Image-based techniques for the advanced characterization of scour around bridge piers in laboratory. Journal of Hydraulic Engineering, 148(6), 06022004. https://doi.org/10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.0001981.

Chiew, Y.M. and Melville, B.W. (1987). Local scour around bridge piers. Journal of Hydraulic Research, 25(1), 15-26. https://doi.org/10.1080/00221688709499285.

Diakoulaki, D., Mavrotas, G. and Papayannakis, L. (1995). Determining objective weights in multiple criteria problems: The CRITIC method. Computers & Operations Research, 22(7), 763-770. https://doi.org/10.1016/03050548(94)00059-H.

Ettema, R., Constantinescu, G. and Melville, B.W. (2017). Flow-field complexity and design estimation of pier-scour depth: Sixty years since Laursen and Toch. Journal of Hydraulic Engineering, 143(9), 03117006. https://doi.org/10.1061/(ASCE)HY.19437900.0 001330.

Ghodsi, H., Najafzadeh, M., Khanjani, M.J. and Beheshti, A. (2021). Effects of different geometric parameters of complex bridge piers on maximum scour depth: Experimental study. Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering, 147(5), 04021024. https://doi.org/10.1061/(ASCE)WW.19435460.0000645.

Guan, D., Chiew, Y.M., Wei, M. and Hsieh, S.C. (2019). Characterization of horseshoe vortex in a developing scour hole at a cylindrical bridge pier. International Journal of Sediment Research, 34(2), 118-124. https://doi.org/10.1016/j.ijsrc.2018.07.001.

Hwang, C.L. and Yoon, K. (1981). Multiple Attribute Decision Making: Methods and Applications. Springer-Verlag, Berlin. https://doi.org/10.1007/978-3-642-48318-9.

Melville, B.W. and Chiew, Y.M. (1999). Time scale for local scour at bridge piers. Journal of Hydraulic Engineering, 125(1), 59-65. https://doi.org/10.1061/(ASCE)07339429(1999)125:1(59).

Opricovic, S. and Tzeng, G.H. (2004). Compromise solution by MCDM methods: A comparative analysis of VIKOR and TOPSIS. European Journal of Operational Research, 156(2), 445-455. https://doi.org/10.1016/S03772217(03)00020-1.

Rogers, A., Manes, C. and Tsuzaki, T. (2020). Measuring the geometry of a developing scour hole in clear-water conditions using underwater sonar scanning. International Journal of Sediment Research, 35(1), 105-114. https://doi.org/10.1016/j.ijsrc.2019.07.005.

Shannon, C.E. (1948). A mathematical theory of communication. Bell System Technical Journal, 27, 379-423 and 623-656. https://doi.org/10.1002/j.15387305.1948.tb00917.x.

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(1), 05021010. https://doi.org/10.1061/(ASCE)HY.19437900.0001948.