

Research paper

Three-dimensional numerical modeling of flow and scour around double bridge piers with bridge deck presence

P. Jalaeekar¹, Y. Aghaee-Shalmani^{2*} and S. Basirat³

Extended Abstract

Introduction:

Bridge stability under hydraulic forces is a vital area of study, especially during extreme flow events such as floods. Among the various bridge components, piers play a critical role as they directly interact with river flows. This interaction often results in scouring, a process in which sediment around bridge piers is eroded by flowing water. Scouring poses a significant threat to the structural integrity of bridges, making it essential to understand its mechanisms under different hydraulic conditions. Under high river discharge, flows may become pressurized as they pass beneath the bridge deck, leading to unique scouring patterns that differ significantly from those observed under free-surface flow conditions. Factors such as flow velocity, turbulence, and the arrangement of piers relative to the flow direction strongly influence the extent and characteristics of scour. This research investigates contraction scour around double bridge piers during flood scenarios, focusing on the effects of the presence or absence of a bridge deck. Additionally, the study explores the impact of pier arrangements whether perpendicular or parallel to the flow direction on flow dynamics and scour behavior. Through comprehensive numerical modeling, this study aims to address existing knowledge gaps regarding scouring under complex hydraulic conditions and contribute to safer, more resilient bridge-design strategies.

Materials and Methods:

Advanced numerical modeling was used to simulate and analyze the complex interactions between flow and scour around bridge piers. FLOW-3D, a computational fluid dynamics (CFD) software, was utilized along with the RNG turbulence model, well-suited for capturing turbulent flow characteristics. The experimental flume had a channel length, width and water depth of 9 meters, 0.6 meters, and 0.19 meters, respectively. The piers were modeled as cylindrical structures with a diameter of 0.06 meters and were arranged either perpendicular or parallel to the flow direction. The bridge deck was positioned 0.133 meters above the bed. To simulate sediment behavior, uniform sediment particles with a mean diameter of 0.74 mm and a geometric standard deviation of 1.4 were used. The key parameters included scour depth, turbulent kinetic energy (TKE), and bed shear stress, provided a comprehensive understanding of scour dynamics. Simulations were ran for 600 seconds to capture the development and stabilization of scour

1- Master's Student in Civil Engineering and Water Resources Management, Faculty of Civil Engineering, Department of Mechanical and Civil Engineering, Khomeinishahr Branch, Islamic Azad University, Khomeinishahr, Iran.

2- Assistant Professor of Hydraulic Structure Engineering, Faculty of Civil Engineering, Department of Mechanical and Civil Engineering, Kho.C., Islamic Azad University, Khomeinishahr, Iran.

3- Assistant Professor, Faculty of Civil Engineering, Department of Civil Engineering, Na.C, Islamic Azad University, Najafabad, Iran.

* Corresponding Author: y.ghaee@iaukhsh.ac.ir

Received: 2025/02/06

Accepted: 2025/04/06

patterns under different configurations. The results were validated against experimental data, to confirm the credibility of the numerical approach. This methodology facilitated a detailed assessment of the effects of bridge deck presence, pier arrangement, and flow conditions on scour and associated hydraulic parameters.

Result and Discussion:

The numerical simulations revealed significant differences in flow and scour patterns between scenarios with and without a bridge deck. When a deck was present, flow accelerated beneath the structure, exhibiting jet-like behavior that intensified scour around the piers. For perpendicular pier arrangements, the maximum scour depth in the decked scenario was approximately 2.35 times greater than in the deckless case. For parallel configurations, scour depths around the upstream and downstream piers increased by 2.7 and 3.85 times, respectively, when a deck was present. The study also highlighted the role of turbulence in influencing scour dynamics. The presence of the bridge deck significantly amplified turbulent kinetic energy (TKE), particularly around the piers and beneath the deck. In perpendicular arrangements, TKE values were 2.1 times higher in the decked scenario. In parallel configurations, the highest TKE values occurred between the two piers, with values approximately 2.8 times greater than in the deckless case. Velocity distributions also varied notably between the two conditions. Horizontal flow velocity increased substantially in the presence of a bridge deck, with maximum velocities observed beneath the deck near the piers. For instance, in the perpendicular arrangement, the flow velocity between the two piers was 1.51 times higher in the decked condition than in the deckless one. These findings underscore the bridge deck's impact on increasing flow velocities and turbulent interactions, leading to more severe scour patterns around piers.

This study highlighted the significant influence of bridge decks on hydraulic conditions and scour patterns around double bridge piers. Numerical simulations demonstrated that the presence of a deck not only altered flow structures but also substantially increased scour depth, turbulence, and bed shear stress. These effects were particularly pronounced under pressurized flow conditions, where the interaction between the deck and underlying flow intensified hydraulic forces. For perpendicular pier arrangements, scour depths were approximately 2.35 times greater with a deck. In parallel arrangements, scour depths increased by 2.7 and 3.85 times for upstream and downstream piers, respectively. Turbulence parameters, such as Turbulent Kinetic Energy (TKE), also showed significant increases in the decked scenarios, further emphasizing the deck's role in modifying scour dynamics. The findings provided valuable insights into the mechanisms of scour under complex hydraulic conditions and stressed the importance of accounting for bridge deck effects in design and maintenance practices. These insights contribute to the development of more resilient and safer bridge structures, particularly in flood-prone regions.

Keywords: Bridge deck, Bridge piers, Contraction scour, Flood, Flow.

Citation: Jalaeeekar, P. Aghaee-Shalmani, Y. and Basirat, S. 2025. Investigation of the effect of compaction and non-uniformity of Non-adhesive sediments on scour downstream of the triangular labyrinth weir. *Iranian Water Research Journal*, 56, pp. 103-114. <https://dx.doi.org/10.22034/IWRJ.2025.15106.2666>



مدل سازی عددی سه بعدی جریان و آبشستگی اطراف پایه پل دوتایی با حضور عرشه پل

پریسا جلابی کار^۱، یاسین آقایی شلمانی^{۲*} و شمس بصیرت^۳

چکیده

پایداری پل ها در برابر عوامل هیدرولیکی مختلف از اهمیت بالایی برخوردار است. یکی از اجزای پل ها، پایه های آن ها هستند که در اندرکنش با جریان رودخانه، دچار آبشستگی می شوند. در حالتی که دبی رودخانه قابل توجه است و جریان به صورت تحت فشار از زیر عرشه پل عبور می کند، آبشستگی ناشی از آن می تواند متفاوت از جریان با سطح آزاد باشد. این مطالعه به آبشستگی انقباضی پایه پل دوتایی در زمان سیلاب با و بدون حضور عرشه پل می پردازد. همچنین در پژوهش حاضر تأثیر چیدمان پایه های دوتایی به صورت عمود بر جهت جریان و همچنین موازی با جریان بر مشخصات جریان و آبشستگی بررسی شده است. همچنین با استفاده از مدل سازی عددی سه بعدی جریان و آبشستگی اطراف این پایه ها پرداخته شد. برای این منظور از نرم افزار FLOW-3D و مدل آشفته گری RNG استفاده شده است. نتایج نشان داد که وجود عرشه پل اثر قابل توجهی بر وضعیت جریان اطراف پایه ها و مقدار آبشستگی در اطراف پایه ها دارد. افزایش عمق آبشستگی در حالت حضور عرشه پل ۲ برابر بیشتر از حالت جریان با سطح آزاد است. همچنین سرعت بیشینه جریان در حالت جریان تحت فشار با حضور عرشه پل ۲/۳۵ برابر حالت جریان با سطح آزاد است. علاوه بر این چیدمان پایه ها نیز در الگوی جریان، مقدار آبشستگی، الگوی آبشستگی، مشخصات جریان و آشفته گری آن مؤثر است.

واژه های کلیدی: آبشستگی انقباضی، پایه پل، جریان، سیلاب، عرشه پل.

ارجاع: جلابی کار، پریسا، آقایی شلمانی، یاسین، و بصیرت، شمس، ۱۴۰۴. مدل سازی عددی سه بعدی جریان و آبشستگی اطراف پایه پل دوتایی با حضور عرشه پل. مجله پژوهش آب ایران، ۵۶، صص. ۱۰۳-۱۱۴. <https://dx.doi.org/10.22034/IWRJ.2025.15092.2661>

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی و مدیریت منابع آب، گروه عمران، دانشکده مهندسی مکانیک و عمران، واحد خمینی شهر، دانشگاه آزاد اسلامی، خمینی شهر، ایران.

۲- استادیار سازه های هیدرولیکی، گروه عمران، دانشکده مهندسی مکانیک و عمران، واحد خمینی شهر، دانشگاه آزاد اسلامی، خمینی شهر، ایران.

۳- استادیار گروه مهندسی عمران، دانشکده مهندسی عمران، واحد نجف آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف آباد، ایران.

* نویسنده مسئول: y.aghace@iaukhsh.ac.ir

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۱/۱۷

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۱۱/۱۸

مقدمه

فرآیند آبشستگی به آبشستگی عمومی طولانی مدت، انقباضی و موضعی تقسیم می شود. آبشستگی اطراف پایه پل از نوع آبشستگی موضعی است. قرارگیری سازه پل ها در مسیر جریان های رودخانه ای، همواره مستلزم تعبیه پایه هایی در این مناطق است که عملاً این پایه ها در معرض انواع جریان های رودخانه ای و به دنبال آن آبشستگی قرار خواهند داشت. این موضوع احتمال تهدید پایداری پایه های پل را بیشتر کرده و گاهی موجب شکست پل ها می شود. اجسام واقع در میدان جریان، موجب تغییر در الگوی جریان پیرامون آن ها می شود. جدایش جریان از مرز پایه ها، موجب ایجاد گردابه هایی در پشت پایه می گردد که این گردابه ها به تناوب از وجهی به وجه دیگر پایه حرکت می کنند. این گردابه ها پس از آنکه به اندازه کافی رشد کردند به سمت پایین دست پایه حرکت کرده و در فاصله ای معین از پایه مستهلک می شوند (Aghaee-Shalmani and Hakimzadeh, 2015). در اغلب پژوهش ها، با استفاده از تکنیک تحلیل ابعادی برای مجموعه ای از داده های تجربی، رابطه ای برای محاسبه بیشینه عمق آبشستگی ارائه شده است. برخلاف داده های صحرایی، داده های آزمایشگاهی در محیطی با جریان کنترل شده به دست می آیند، بنابراین مطالعه رشد حفره آبشستگی تنها با استفاده از آزمایش های تجربی قابل اعتماد است. بررسی الگوی جریان اطراف پایه استوانه ای، با روش های آزمایشگاهی، تحلیلی و یا مدل سازی عددی انجام شده است. مطالعات آزمایشگاهی متعددی درخصوص جریان اطراف پایه ها وجود دارد. به عنوان مثال Baker (1979) و Dargahi (1989) به مطالعه رفتار گردابه های نعل اسبی و Graf and Altinakar (1998) و Istiarto (2001) به برداشت سرعت جریان در اطراف پایه ها پرداختند. رفتار گردابه های نعل اسبی، تعداد و دینامیک آن ها به علت تأثیر ویژه روی آبشستگی، از اهمیت بسیاری برخوردار است. Launay et al. (2017) در مدل سازی آزمایشگاهی به بررسی دقیق این گردابه ها با توجه به ابعاد پایه، عمق آب و اعداد رینولدز پایه و جریان پرداختند. Aghaee-shalmani and Hakimzadeh (2022) نیز به صورت عددی به بررسی الگوی جریان و همچنین گردابه های نعل اسبی در اطراف پایه های با مقطع متغیر در عمق پرداختند.

اکثر مطالعات آزمایشگاهی آبشستگی موضعی روی یک پایه پل تکی یا گروهی انجام شده است. شکل ها و چیدمان متفاوت پایه ها نیز در مطالعات پژوهشگران متعددی دیده می شود. Hannah (1978) مطالعات خود را روی آبشستگی موضعی در گروه پایه های استوانه ای، در شرایط آب زلال و جریان ماندگار انجام داد. وی به تفاوت هایی در مکانیزم آبشستگی آب-شستگی اطراف گروه پایه اشاره کرد که در تک پایه ها دیده نمی شود. Nough (1986) آزمایش هایی را برای تعیین عمق آبشستگی در گروه پایه با تغییر فاصله عرضی بین پایه ها در شرایط آب زلال انجام داد. در پژوهشی برای بررسی تأثیر آبپایه بر روی آبشستگی موضعی در پایه پل آزمایش هایی انجام شد (Grimaldi et al., 2009). Ranjkesh (2010) ضمن بررسی توسعه ی زمان عمق آبشستگی، تأثیر ساختار جریان در آبشستگی گروه پایه های استوانه ای را بررسی کرد. نتایج آزمایش های وی نشان داد که عامل حفاظ بودن پایه های بالادست باعث کاهش عمق آبشستگی در پایه های پایین دست شده؛ ولی با افزایش فاصله ی بین پایه ها این عامل کاهش یافته است (Ranjesh, 2010). Wang et al. (2016)، پس از بررسی آبشستگی محلی اطراف پایه های پل دوقلو در جریان های کانال باز به این نتیجه رسیدند که در شرایطی که پایه ها در یک ردیف و پشت سر هم قرار می گیرند، عامل گردابه های نعل اسبی به هم فشرده وجود نخواهد داشت. برای حالتی که پایه ها تحت زاویه نسبت به راستای جریان و در یک ردیف قرار گیرند، هر چهار مکانیزم آبشستگی را دارا خواهند بود (Wang et al., 2016). Malekouti and Dehnadi (2018) کارایی مدل عددی سه بعدی SSIIM را در مدل کردن الگوی زمانی آبشستگی اطراف گروه پایه های دوتایی پل، مورد سنجش قرار دادند.

آبشستگی انقباضی می تواند باعث آبشستگی های بیشتری در اطراف پایه گردد. علاوه بر این، آبشستگی انقباضی می تواند به دلیل تنگ شدگی مقطع ناشی از خود پایه و یا ناشی از ارتفاع پایین عرشه پل و یا موانع باشد. Nisi et al. (2021) آزمایش های جریان و آبشستگی اطراف دو پایه پل را در قلمی آزمایشگاهی انجام دادند. در این پژوهش آزمایش های پیرامون دو پایه پل استوانه ای در جهت جریان بررسی شد. سپس تأثیر انباشت چوب های شناور در عمق های متفاوت بر عمق آبشستگی در شرایط

(Koushki et al., 2023). در مطالعه آزمایشگاهی دیگری دو مدل برای تخمین عمق آبشستگی فشار-جریان در زیر عرشه پل نیمه غوطه‌ور در حالت آبشستگی متعادل بر اساس تئوری جریان جت ارائه کردند، که در یک مدل تخمین فاصله غوطه‌ور شدن جریان جت در زیر عرشه پل و در مدل دوم از نظریه پدیدارشناسی تلاطم استفاده شد که در آن مؤلفه مماسی سرعت جت به سرعت گردابی تشکیل شده در زیر عرشه پل مقیاس شد. نتایج نشان داد که هر دو مدل به خوبی حداکثر عمق آبشستگی فشار جریان را پیش‌بینی می‌کنند (Koushki et al., 2024). با توجه به اهمیت پایداری و ایمنی پل‌ها در زمان سیلاب، بررسی جریان و آبشستگی موضعی-انقباضی اطراف پایه پل اهمیت ویژه‌ای دارد. با توجه به اینکه در بسیاری از موارد، پایه‌ها به‌صورت جفتی (عمود بر جهت جریان یا موازی با جهت جریان) قرار دارند، این مقاله به بررسی عددی جریان اطراف پایه‌های جفتی با حضور عرشه پل در زمان سیلاب پرداخته و علاوه بر این برای تشخیص میزان تأثیر حضور عرشه پل در آبشستگی، مدل متناظر با آن اما بدون حضور عرشه نیز بررسی شده است.

مدل‌سازی عددی و میدان محاسباتی

در مطالعه حاضر از مدل عددی تجاری Flow-3D 11.0.2 استفاده شده است. ابعاد میدان محاسباتی در مدل عددی مطابق با مدل‌های آزمایشگاهی موجود (Nasiri-Dehsorkhi et al., 2021) است. مدل آزمایشگاهی شامل یک کانال به طول ۹ متر، عرض $W=0.6$ m و عمق آب $h=0.19$ m متر است. قطر پایه برابر $D=0.06$ m و طول عرشه $L=0.25$ m است. ارتفاع پایه تا زیر عرشه 0.133 متر و مرکز پایه به فاصله ۵ متر از ورودی کانال است. برداشت سرعت در مدل آزمایشگاهی با استفاده از سرعت-سنج صوتی^۱ انجام شده است. ابعاد میدان محاسباتی در قسمت صحت‌سنجی نتایج جریان مطابق با ابعاد مذکور بوده و در مدل‌سازی پایه‌های جفتی موازی با جریان، طول عرشه 0.5 متر است. میدان محاسباتی بصورت شکل ۱ است. قسمت سمت چپ شکل (الف) نشان‌دهنده موقعیت قرارگیری عمود پایه‌ها نسبت به جهت جریان و سمت راست شکل (ب)، قرارگیری موازی پایه‌ها نسبت به جهت جریان است. مبدأ مختصات در مرکز کانال قرار دارد. در

آب زلال مورد بررسی قرار گرفت (Nisi et al., 2021). عرشه پل در زمان عبور جریان‌های با دبی زیاد به‌خصوص در زمان سیلاب می‌تواند باعث جریان تندشونده و ایجاد جریان‌های تحت فشار در زیر عرشه گردد. (Nasiri-Dehsorkhi et al., 2021) در یک مدل آزمایشگاهی به بررسی جریان اطراف پایه پل در زیر یک عرشه پل با فرورفتگی نسبی در آب پرداختند. مقادیر زیادی از شدت آشفتگی، انرژی جنبشی آشفته و تنش برشی رینولدز در لبه بالادست عرشه پل در لایه برشی و پایین دست پایه زیر عرشه به دلیل تولید گرداب‌های برخاستی^۱ مشاهده شد. انقباض و شتاب جریان در اطراف دو طرف پایه منجر به افزایش موضعی تنش برشی بستر شد (Nasiri-Dehsorkhi et al., 2021). (Majid et al., 2023) به بررسی آزمایشگاهی جریان تحت فشار زیر عرشه پل با استفاده از برداشت سرعت به روش PIV^۲ پرداختند. Baduna et al. (2021) به بررسی پارامترهای مؤثر بر آبشستگی انقباضی ناشی از عرشه پل پرداخته و نشان دادند که جریان نیمه غوطه‌ور در مقایسه با جریان کاملاً غوطه‌ور، حداکثر عمق سوراخ آبشستگی را افزایش داده و بر شکل سوراخ آبشستگی تأثیر بیشتری می‌گذارد (Baduna et al., 2021). همچنین Abdelhaleem et al. (2023) به بررسی جریان و آبشستگی انقباضی ناشی از حضور عرشه پل پرداختند. نتایج نشان داد که برای شرایط جریان تحت فشار، حداکثر عمق آبشستگی با ضریب بین $2/15$ تا $9/81$ برابر حداکثر عمق آبشستگی در شرایط جریان سطح آزاد افزایش یافته است. در پژوهشی تأثیر جریان تحت فشار ناشی از عرشه پل بر آبشستگی پایه پل تکی در مقاطع مرکب با پوشش گیاهی بررسی شد (Dankoo et al., 2022). (Koushki et al., 2023) مطالعه‌ای را برای پیش‌بینی عمق آبشستگی فشار-جریان با استفاده از معادله اندازه حرکت با در نظر گرفتن جریان جت منحرف شده توسط عرشه پل ارائه کردند. نتایج نشان داد که شدت جریان، نسبت غوطه‌وری و ضخامت ناحیه جداسازی نسبی پارامترهای اصلی مؤثر بر عمق آبشستگی فشار-جریان هستند. معادله ارائه شده دقت رضایت بخشی را برای پیش‌بینی عمق آبشستگی فشار-جریان تعادل برای ارتفاع باز نسبی عرشه پل بیش از 0.25 نشان داد

1- Wake vortices

2- Particle Image Velocimetry

3- Acoustic Doppler Velcimeter

اعمال قانون دیوار اطمینان حاصل شود (Aghaee and Hakimzadeh, 2010).

صحت سنجی مدل عددی

در این پژوهش برای اطمینان از درستی نتایج حاصل از مدل عددی، نتایج مربوط به مدل سازی یک پایه پل تکی همراه با عرشه پل با نتایج آزمایشگاهی آن (Nasiri-Dehsorkhi et al. 2021) مقایسه شد. لازم به ذکر است همه مدل سازی های تحقیق حاضر با دو پایه انجام شده است، اما صحت سنجی تنها با یک پایه و حضور عرشه پل انجام شده است. مدل آزمایشگاهی مورد استفاده شبیه ترین مدل آزمایشگاهی موجود به مدل عددی پژوهش حاضر است. نتایج مدل عددی با توجه به تغییرات زمانی سرعت ناشی از لحظه ای و غیردائمی بودن جریان در مدت زمان اجرای مدل عددی، متوسط گیری زمانی شده است. در شکل ۲ خطوط جریان و خطوط هم سرعت بدون بعد (u/U) در مدل عددی و آزمایشگاهی با یکدیگر مقایسه شده اند که u سرعت در میدان محاسباتی و U سرعت جریان ورودی است. این نتایج در صفحه xz و در محور تقارن پایه استخراج شده است. شکل ۲-الف، خطوط جریان در بالادست پایه در مدل آزمایشگاهی را نشان می دهد. همچنین نقطه A در این شکل نشان دهنده مرکز گرداب در زیر عرشه است. در شکل ۲-ب، پارامتر $\bar{u}$ نشان دهنده سرعت متوسط زمانی جریان در جهت x است. طول گردابه در زیر عرشه پل در مدل عددی (شکل ۲-ج) مشابهت قابل قبولی با نتایج آزمایشگاهی دارد. در مدل عددی طول گردابه در زیر عرشه $1.3D$ نسبت به لبه پایه است که این مقدار برای مدل آزمایشگاهی بطور تقریبی $1.2D$ است. تفاوت بین مدل عددی و آزمایشگاهی تقریباً ۵ درصد است. همچنین کانتورهای سرعت u در مدل عددی (شکل ۲-ج) نیز از نظر مقدار و موقعیت رخداد تطابق بسیار خوبی با نتایج آزمایشگاهی (شکل ۲-ب) دارد. شکل ۲-د کانتورهای سرعت جریان ($\bar{w}$) در جهت z را در مدل آزمایشگاهی نشان می دهد. در جلوی پایه در مدل سازی عددی (شکل ۲-د)، جریان رو به پایین در مجاورت بستر مشاهده می شود که در نتایج آزمایشگاهی موجود نیست. علاوه بر این، بالآمدگی سطح آب در جلوی عرشه پل در نتایج عددی مشاهده می شود که این مورد نیز در نتایج آزمایشگاهی قابل بررسی (به دلیل در

مطالعه حاضر نرم افزار مدل سازی عددی Flow3D که از روش حجم محدود استفاده می کند، به کار گرفته شده است. از شبکه های محاسباتی شش وجهی متعامد در مدل سازی استفاده شده است. معادلات حاکم بر جریان، معادلات سه بعدی ناویر-استوکس بوده که نرم افزار با استفاده از روش های ضمنی و به کمک حل معادله پواسون فشار مدل سازی را تکمیل می کند. مدل آشفتگی RNG به عنوان مدل آشفتگی جریان در مدل سازی ها استفاده شده است. در ورودی، شرایط مرزی از سرعت برابر با $u=0.27$ m/s و در خروجی شرایط مرزی خروجی (outflow) با عمق ثابت، در مرزهای جامد شرط مرزی بدون لغزش و در سطح آزاد شرط مرزی تقارن استفاده شده است. سطح آزاد جریان نیز با روش حجم سیال^۱ مدل سازی شده است. مشخصات مدل سازی ها بصورت خلاصه در جدول ۱ آمده است. تعداد مختلفی از شبکه های محاسباتی در مدل سازی عددی در میدان محاسباتی به کار گرفته شد که بهینه ترین آن از لحاظ دقت مدل سازی و زمان محاسباتی در تمام مدل سازی ها استفاده شد. تعداد شبکه محاسباتی با توجه به روش مدل سازی آشفتگی^۲ RNG که از مدل های متوسط گیری زمانی^۳ URANS استفاده می کند، در مقایسه با روش شبیه سازی گرداب بزرگ کاهش چشمگیری دارد (Aghaee and Hakimzadeh, 2010). علاوه بر این، مدل RNG در مدل سازی های جریان های برشی پیچیده، جدایش لایه مرزی و همچنین جریان اطراف پایه ها نتایج قابل قبولی ارائه می دهد (Omara and Tawfik, 2018). تعداد شبکه مورد استفاده در مدل سازی های جریان در تحقیق حاضر از ۱۷۰۰۰۰ تا ۲۵۰۰۰۰ است. تعداد شبکه های انتخابی بر اساس ضخامت لایه مرزی و همچنین با توجه به قرارگیری اولین شبکه در خارج از لایه اندازه سلول های مجاور مرزهای جامد برای برآوردن محدودیت های فاصله واحد دیوار $z_+ = 11 <$ $30 < uz/v$ بر اساس قانون دیوار انتخاب شده است که در آن u سرعت در اولین شبکه محاسباتی نزدیک دیواره، z فاصله مرکز اولین شبکه تا مرز جامد و v لزجت سینماتیکی آب است. برای جلوگیری از محاسبه در زیر لایه آرام به دلیل اینکه ویسکوزیته، آشفتگی نزدیک دیوار را میرا می کند، مقدار z_+ باید کوچکتر از ۳۰ باشد تا از

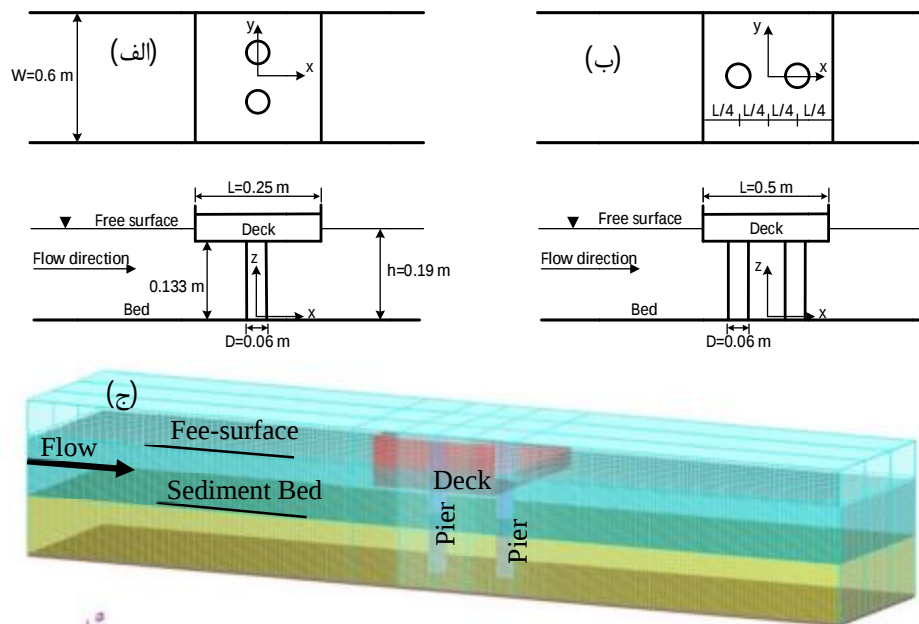
1- Volume of Fluid

2- Renormalization Group Modeling of Turbulence

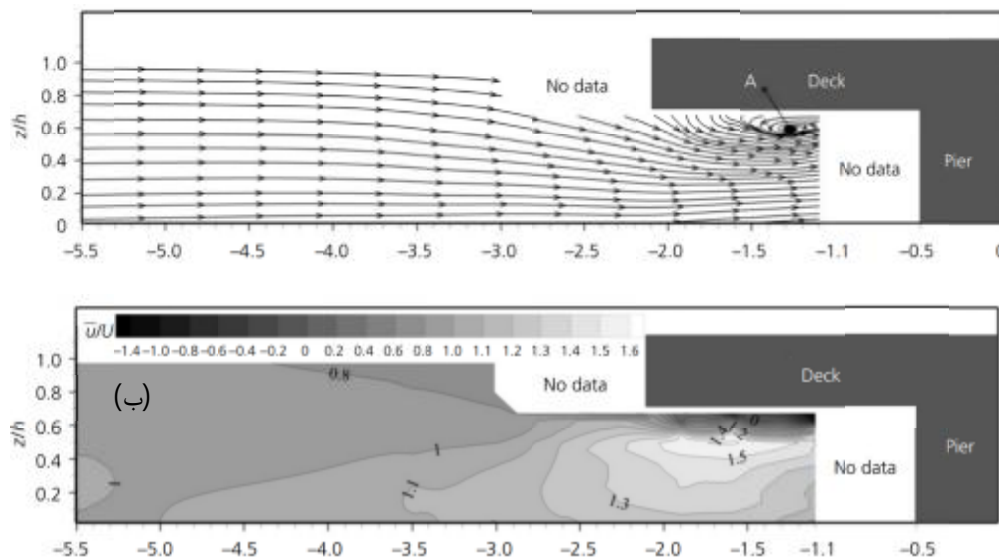
3- Unsteady Reynolds Averaged Navier-Stokes

مدل عددی و آزمایشگاهی (Nasiri-Dehsorkhi, 2021) از شکل ۲ می‌توان نتیجه گرفت که مدل عددی از دقت و توانایی قابل قبولی برای مدل‌سازی جریان اطراف پایه پل با حضور عرشه برخوردار است.

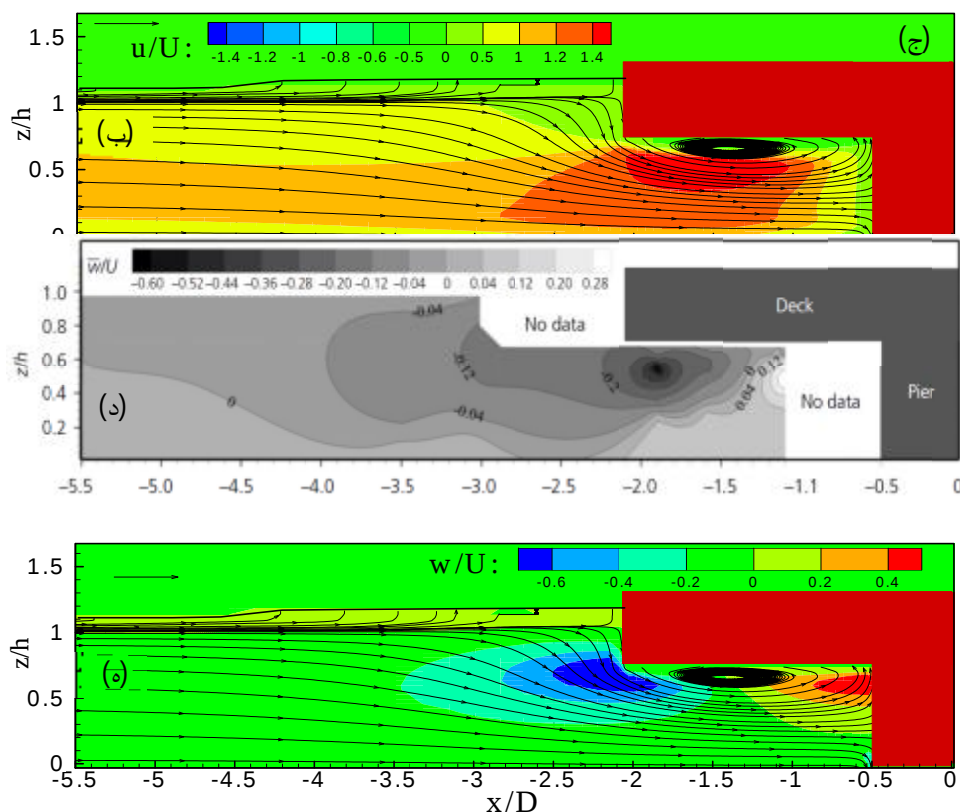
دسترس نبودن اطلاعات) نیست. در شکل ۲-ه کانتورهای سرعت (w) در راستای قائم z در بالادست پایه در مدل‌سازی عددی ارائه و با نتایج مدل‌سازی آزمایشگاهی (شکل ۲-د) مقایسه شده است. با توجه به مقایسه نتایج



شکل ۱- موقعیت قرارگیری پایه‌ها نسبت به جریان (الف) وضعیت پایه عمود بر جهت جریان، (ب) وضعیت پایه موازی با جهت جریان و (ج) شبکه‌بندی میدان محاسباتی



شکل ۲- مقایسه نتایج حاصل از مدل‌سازی جریان اطراف پایه پل در حضور عرشه پل با نتایج آزمایشگاهی Nasiri-Dehsorkhi et al. (2021). نتایج مربوط به خطوط جریان و خطوط هم سرعت جریان در بالادست پایه است. (الف) خطوط جریان در مدل آزمایشگاهی. نقطه A در شکل نشان‌دهنده مرکز گردابه در زیر عرشه پل است، (ب) کانتور سرعت u/U در مدل آزمایشگاهی، (ج) خطوط جریان و کانتور سرعت u/U به‌دست آمده از مدل‌سازی عددی، (د) کانتور سرعت w/U در مدل آزمایشگاهی و (ه) خطوط جریان و کانتور سرعت w/U به‌دست آمده از مدل‌سازی عددی



ادامہ شکل ۲- (ج) خطوط جریان و کانتور سرعت u/U به دست آمده از مدل سازی عددی، (د) کانتور سرعت w/U در مدل آزمایشگاهی و (ه) خطوط جریان و کانتور سرعت w/U به دست آمده از مدل سازی عددی

مدل سازی جریان و آب شستگی اطراف پایه های جفتی

در این بخش به بررسی جریان و آب شستگی اطراف پایه های جفتی با حضور و بدون حضور عرشہ پل مطابق مشخصات جدول ۱ پرداخته می شود.

در همه این مدل سازی ها ابعاد میدان محاسباتی در مدل آزمایشگاهی یکسان است. تنها با این تفاوت که در case 1 و case 2 که موقعیت قرارگیری پایه ها بصورت موازی با جهت جریان است، طول عرشہ برابر ۰/۵ متر در نظر گرفته شده است.

جدول ۱- مشخصات مدل سازی های عددی

شماره مدل سازی	تعداد پایه	موقعیت پایه و جریان	وجود عرشہ پل	سرعت جریان (m/s)	h(m)	نوع مدل سازی
Case 0	۱	---	با عرشہ	۰/۲۷	۰/۱۹	جریان (صحت سنجی)
Case 1	۲	متعامد	با عرشہ	۰/۲۷	۰/۱۹	جریان و آب شستگی
Case 2	۲	متعامد	بدون عرشہ	۰/۲۷	۰/۱۹	جریان و آب شستگی
Case 3	۲	موازی	با عرشہ	۰/۲۷	۰/۱۹	جریان و آب شستگی
Case 4	۲	موازی	بدون عرشہ	۰/۲۷	۰/۱۹	جریان و آب شستگی

زاویه اصطکاک داخلی ذرات رسوب ۳۲ درجه است. لایه رسوبات به اندازه ارتفاع پایه در زیر بستر اولیه ($z=0$) در نظر گرفته شده است. نرم افزار با استفاده از محاسبه تنش برشی بستر، پارامتر بحرانی شیلدز را با استفاده از روابط ون رایان محاسبه کرده و مقدار انتقال رسوب، عمق

مدل سازی آب شستگی با استفاده از روابط ون رایان (Van Rijn, 1984) انجام شده است. ذرات رسوب به صورت کاملاً یکنواخت در تمام بستر قرار داشته و قطر ذرات رسوب در تمام مدل سازی های عددی برابر ۰/۷۴ میلی متر و انحراف استاندارد ذرات (σ_g) برابر ۱/۴ است. همچنین

که در شکل مشاهده می‌شود، مقدار آب‌شستگی در اطراف پایه‌ها در حالت وجود عرشه بیشتر از حالت بدون عرشه است که دلیل آن افزایش سرعت جریان تحت فشار در زیر عرشه پل است. این جریان مانند یک جت عبوری می‌تواند نرخ آب‌شستگی را افزایش دهد. مقدار بیشینه آب‌شستگی در کناره‌های پایه رخ داده و آب‌شستگی برای پایه اول بیشتر از پایه دوم است. در اینجا پایه اول نقش محافظت‌کننده برای پایه دوم را ایفا می‌کند و در واقع قدرت جریان نزدیک‌شونده به پایه دوم را تضعیف می‌کند. بیشترین مقدار عمق آب‌شستگی برای شکل ۴-الف در کناره‌های پایه سمت چپ و برابر ۰/۰۵۲ متر و برای پایه سمت راست ۰/۰۲۷ متر است. در حالت بدون عرشه (شکل ۴-ب) همچنان حداکثر عمق آب‌شستگی برای کناره‌های پایه سمت چپ و برابر با ۰/۰۱۹ متر و برای پایه سمت راست تقریباً برابر ۰/۰۰۷ متر است.

شکل ۵، کانتورهای سرعت جریان (u) در صفحه قائم در بالادست و پایین دست پایه را در دو حالت وجود عرشه و عدم وجود عرشه نشان می‌دهد. در شکل ۵-الف، بیشینه سرعت در زیر عرشه و در مجاورت لبه جلویی عرشه مشاهده می‌شود. جریان پس از عبور از زیر عرشه به پایه برخورد کرده و از سرعت آن کاسته می‌شود. جریان پس از برخورد به پایه باعث ایجاد جریان رو به پایین در نزدیک بستر و جریان رو به بالا در مجاورت عرشه می‌شود. در پشت پایه به دلیل ایجاد ناحیه کم فشار، یک ناحیه با سرعت کم ایجاد می‌شود. جریان پس از عبور از اطراف پایه در مجاورت حفره آب‌شستگی، دوباره سرعت گرفته و در رسیدن به پایین‌دست به تدریج به سرعت ابتدای کانال می‌رسد.

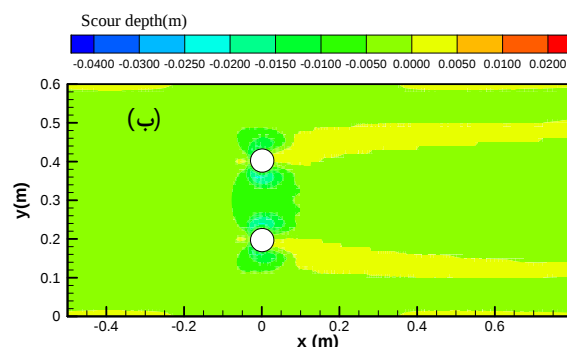
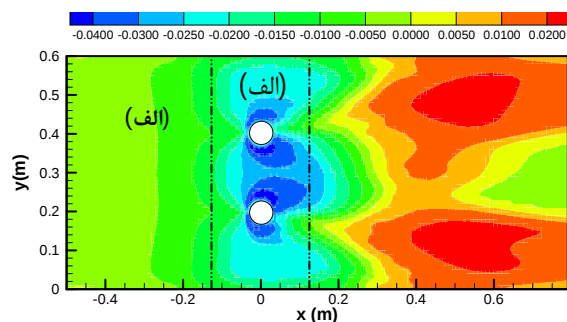
در شکل ۵-ب، کانتورهای مؤلفه سرعت u در صفحه قائم برای حالت بدون عرشه پل نمایش داده شده است. در این حالت، سرعت جریان در جلوی پایه کاهش یافته و در پشت پایه نیز جریان کم سرعت مشاهده می‌شود. علاوه‌براین یک جریان با سرعت زیادتر نیز در مجا u بستر آب‌شسته دیده می‌شود که از سرعت آن به تدریج در پایین‌دست کانال کاسته می‌شود. همچنین کانتورهای سرعت u در صفحه تقارن جریان (بین دو پایه)، در حالت حضور عرشه، در شکل ۵-ج نشان داده شده است. همان‌طور که انتظار می‌رود حداکثر سرعت در زیر عرشه پل در نیمه عمق جریان مشاهده می‌شود. علاوه‌بر این یک

آب‌شستگی و یا انباشتگی رسوبات را محاسبه می‌کند. شبکه محاسباتی برای محاسبه آب‌شستگی تا پایین‌ترین تراز رسوبات در نظر گرفته شده است. سایر پارامترهای جریان از قبیل سرعت ورودی جریان و عمق جریان بدون تغییر است. در تمامی مدل‌سازی‌های عددی، مدت زمان آب‌شستگی برابر ۱۰ دقیقه (۶۰۰ ثانیه) است. اگرچه این مقدار زمان مدل‌سازی آب‌شستگی با مدت زمان لازم برای رسیدن به عمق آب‌شستگی متعادل^۱ اختلاف قابل توجهی دارد، اما در این مقاله هدف از مدل‌سازی، بررسی اثر حضور عرشه بر آب‌شستگی و مقایسه آن با حالت بدون عرشه است. اگرچه روند آب‌شستگی زمان‌بر و طولانی است، اما می‌توان تفاوت تأثیر این دو حالت را در بازه‌های زمانی کوتاه‌تر نیز مشاهده کرد. لازم به ذکر است زمان مدل‌سازی آب‌شستگی برای زمان ۱۰ دقیقه نمی‌تواند نتیجه‌گیری نهایی باشد و بعد از گذشت زمان، شرایط جریان و آب‌شستگی حتماً تغییر می‌کند. مدت زمان آب‌شستگی در مدل‌سازی‌های عددی در بسیاری از پژوهش‌ها به دلیل هزینه محاسباتی به زمان آب‌شستگی متعادل نرسیده و از آن فاصله دارد (Wu et al., 2024; Zhou, 2017; Ahmad et al., 2020).

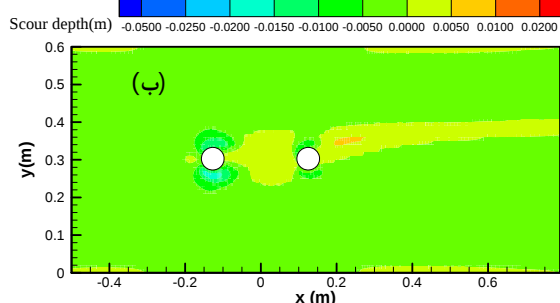
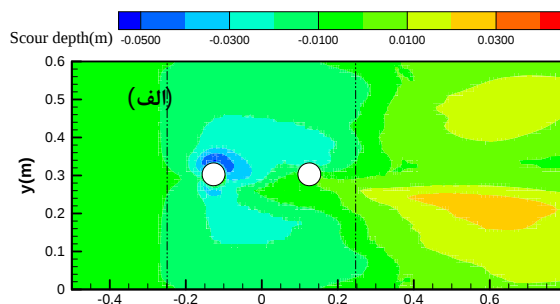
شکل ۳، خطوط هم عمق آب‌شستگی را برای پایه‌های دوتایی با موقعیت عمود بر جریان برای دو حالت با عرشه و بدون عرشه (شکل ۳-الف و ۳-ب) نشان می‌دهد. بیشینه عمق آب‌شستگی در کناره‌های پایه‌های پل رخ داده و این مقدار در کناره‌های واقع بین دو پایه بیشتر از کناره‌های بیرونی است. حداکثر مقدار آب‌شستگی برای حالت با عرشه برابر ۰/۰۴۷ متر است (شکل ۳-الف). انباشتگی رسوبات در پایین دست جریان نیز در شکل مشاهده می‌شود. بیشینه عمق آب‌شستگی برای حالت بدون عرشه (شکل ۳-ب) برابر ۰/۰۲ متر است. مقایسه بیشترین عمق آب‌شستگی پس از ۱۰ دقیقه از آب‌شستگی نشان‌دهنده افزایش ۲/۳۵ برابری عمق آب‌شستگی برای حالت با عرشه نسبت به حالت بدون عرشه پل است.

شکل ۴، عمق آب‌شستگی برای حالت‌های مختلف پایه‌های دوتایی و حضور یا عدم حضور عرشه در حالت قرارگیری موازی پایه‌ها نسبت به جریان (case 3 و case 4) بعد از ۶۰۰ ثانیه از مدل‌سازی را نشان می‌دهد. در این شکل جهت جریان از سمت چپ به راست است. همان‌گونه

1- Equilibrium scour depth



شکل ۳- کانتورهای آبشستگی اطراف پایه‌های جفتی عمود بر جهت جریان. الف) با حضور عرشه (case 1)، خط چین نشان‌دهنده لبه‌های عرشه پل است و ب) حالت بدون عرشه (case 2)



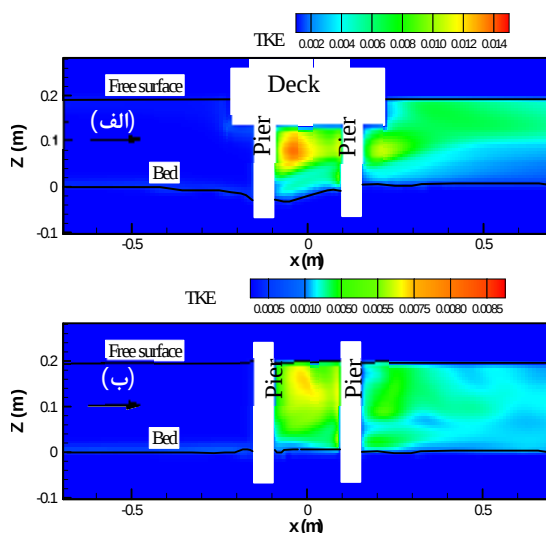
شکل ۴- کانتورهای آبشستگی اطراف پایه‌های جفتی موازی با جهت جریان الف) با حضور عرشه (case 3) و ب) بدون عرشه (case 4)

میدان سرعت منفی نیز در پشت عرشه در مجاورت سطح آزاد دیده می‌شود. از مقایسه شکل‌های ۵-الف، ب و ج می‌توان دریافت که حداکثر سرعت u در بین دو پایه جریان در زیر عرشه رخ می‌دهد و مقدار آن تقریباً ۲ برابر سرعت ورودی جریان در ابتدای کانال است. این مسأله یکی از مهمترین دلایل افزایش عمق آبشستگی در این ناحیه است.

یکی از پارامترهای مهم و تأثیرگذار در جریان، بررسی مقدار انرژی سینتیک جریان آشفته (TKE)^۱ است. این پارامتر با تنش‌های آشفتگی جریان (تنش‌های رینولدز) ارتباط مستقیم دارد و در دینامیک سیالات، می‌توان آن را به عنوان میانگین انرژی جنبشی در واحد جرم برای یک جریان آشفته تعریف کرد. با توجه به نتایج پژوهشگران بیشینه مقدار تنش‌های رینولدز در لایه‌های برشی جداشده، دیده می‌شود (Lin et al., 2012)، که این مورد در پژوهش حاضر در زیر عرشه پل مشاهده شد. در جلوی پایه نیز تنش‌های آشفتگی مقدار کمی دارند. علاوه بر این مقدار تنش‌های آشفتگی در پشت پایه به دلیل ایجاد گردابه‌های برخاستی افزایش می‌یابد. شکل ۶، کانتورهای انرژی سینتیک جریان آشفته را در صفحه قائم پس از گذشت ۶۰۰ ثانیه از آبشستگی نشان می‌دهد. در شکل ۶-الف، کانتورها در صفحه قائم برای قرارگیری متعام پایه‌ها (case 1) نسبت به جریان با وجود عرشه رسم شده است. این مقطع دقیقاً بالادست و پایین دست یکی از دو پایه را نشان می‌دهد (در مختصات $y=0.2$ m). مقدار بیشینه انرژی سینتیک جریان آشفته در پشت پایه مشاهده می‌گردد و با دور شدن جریان از پایه مقدار آن به تدریج کاهش می‌یابد. مقدار حداکثر TKE در حالت حضور عرشه پل برابر با $0.157 \text{ m}^2/\text{s}^2$ است. این مقدار درست در پشت پایه و در زیر عرشه پل قرار دارد. همین پارامتر برای حالت بدون عرشه (شکل ۶-ب) یعنی حالت case 2 مقدار $0.075 \text{ m}^2/\text{s}^2$ را نشان می‌دهد. مقدار TKE در حالت بدون عرشه نیز به تدریج با فاصله گرفتن از پایه کاهش می‌یابد. مقدار TKE در حالت با عرشه تقریباً افزایش دو برابری این پارامتر را در مقایسه با حالت بدون عرشه نشان می‌دهد.

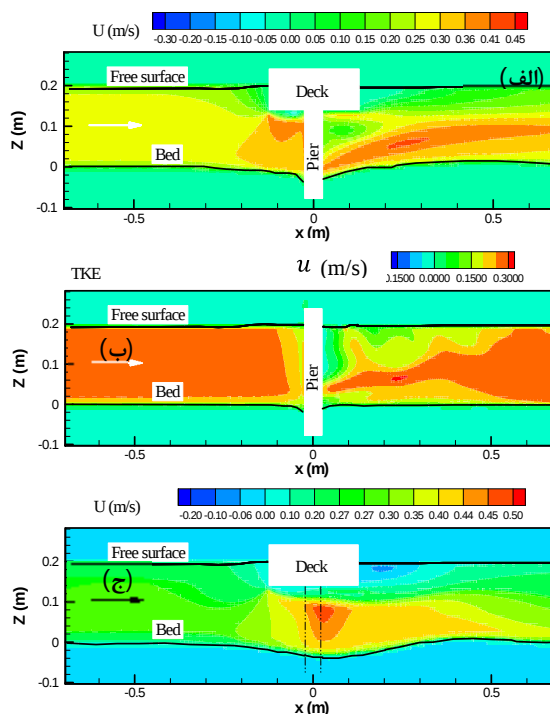
1- Turbulent Kinetic Energy

عرشه نشان داده شده است. در شکل ۷-الف مقدار بیشینه TKE در پشت پایه‌ها و در مجاورت عرشه دیده می‌شود. این مقدار برای پایه سمت چپ تقریباً $0.14 \text{ m}^2/\text{s}^2$ و برای پایه سمت راست برابر $0.1 \text{ m}^2/\text{s}^2$ است. در شکل ۷-ب نیز مقدار TKE برای حالت بدون عرشه نمایش داده شده است. مقدار بیشینه در پشت پایه‌ها و در نزدیکی سطح آزاد رخ داده است. مقدار بیشینه TKE برای پایه اول تقریباً برابر $0.07 \text{ m}^2/\text{s}^2$ و برای پایه دوم برابر $0.05 \text{ m}^2/\text{s}^2$ است. همچنان در هر دو حالت با عرشه و بدون عرشه مقدار TKE در پایین‌دست پایه با دور شدن از پایه کاهش می‌یابد.

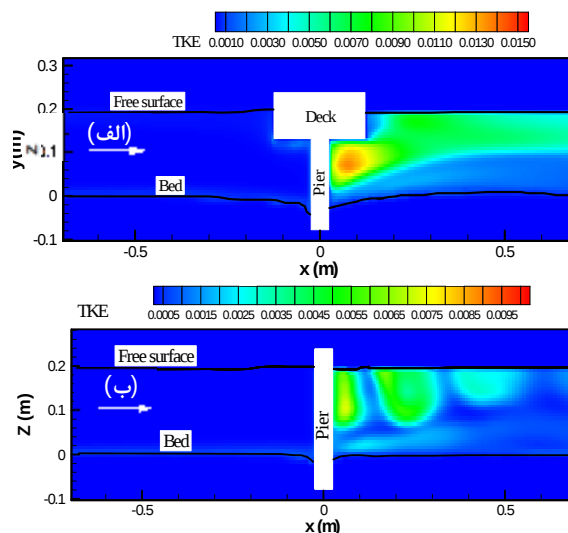


شکل ۷- کانتور انرژی سینتیک آشفتگی جریان برای پایه‌ها با موقعیت قرارگیری موازی نسبت به جهت جریان در صفحه تقارن (جریان الف) با حضور عرشه و (ب) بدون حضور عرشه

تنش برشی بستر (τ) که در کنار پارامترهای آشفتگی جریان مهمترین عامل آب‌شستگی است، بطور مستقیم به سرعت برشی بستر (u_*) بستگی دارد. بنابراین آب‌شستگی و ادامه روند آن در زمان به مقادیر سرعت برشی بستر وابسته است (Bombardel et al., 2018). شکل ۸ کانتورهای سرعت برشی بستر را در مجاورت بستر آب‌شسته پس از گذشت ۶۰۰ ثانیه از روند آب‌شستگی در صفحه افقی xy نشان می‌دهد. نتایج مربوط به case 1 در شکل ۸-الف و نتایج مربوط به case 2 در شکل ۸-ب نمایش داده شده است. الگوی سرعت برشی بستر در بین دو پایه بیشترین مقدار خود را دارد و می‌تواند ناشی از اثر انقباضی جریان در عبور از پایه‌ها باشد. همانگونه که انتظار می‌رود بیشترین مقدار آب‌شستگی نیز در این ناحیه مشاهده شده

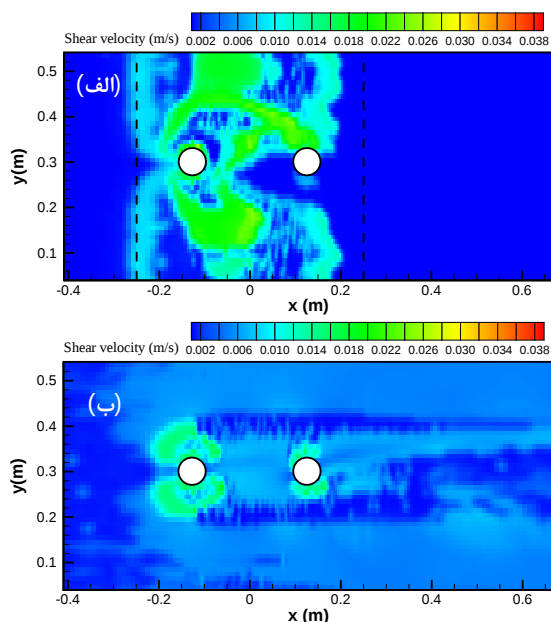


شکل ۵- کانتورهای سرعت افقی جریان در صفحه قائم الف) پایه‌ها در حالت عمود بر جهت جریان و وجود عرشه، ب) پایه‌ها در حالت عمود بر جهت جریان بدون عرشه و ج) پایه‌ها در حالت عمود بر جهت جریان در صفحه تقارن میدان محاسباتی و با وجود عرشه



شکل ۶- کانتور انرژی سینتیک آشفتگی جریان برای پایه‌ها با موقعیت قرارگیری متعامد نسبت به جهت جریان در صفحه تقارن (جریان الف) با حضور عرشه و (ب) بدون عرشه

در شکل ۷ کانتورهای TKE برای حالت قرارگیری موازی پایه‌ها نسبت به جهت جریان برای وضعیت با عرشه و بدون



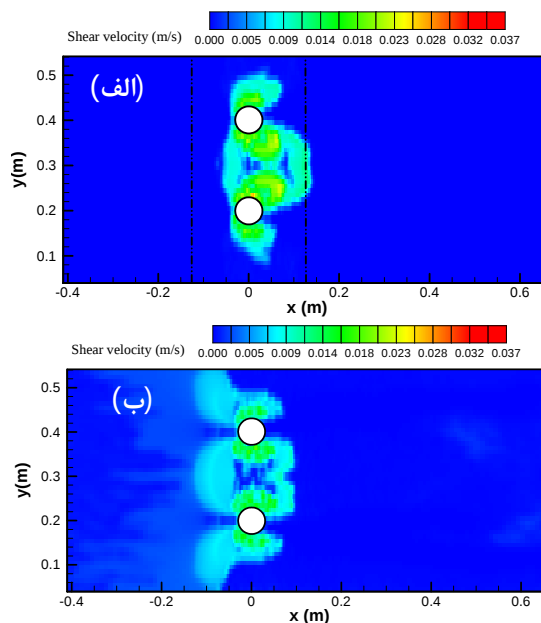
شکل ۹- کانتورهای مربوط به سرعت برشی بستر در مجاورت بستر آب‌شسته در صفحه افقی xy (الف) پایه‌ها موازی با جهت جریان و حضور عرشه و (ب) پایه‌ها موازی با جریان و بدون حضور عرشه

نتیجه‌گیری

در این مطالعه، جریان و آب‌شستگی پیرامون پایه‌های دوتایی پل، در شرایط وجود یا عدم وجود عرشه پل، بررسی شد. هدف اصلی، تحلیل تأثیر عرشه پل بر الگوهای جریان و آب‌شستگی اطراف پایه‌ها بود. مدل‌سازی با استفاده از نرم‌افزار FLOW-3D و مدل آشفتگی RNG انجام و نتایج پس از ۶۰۰ ثانیه از آغاز فرآیند آب‌شستگی ارائه شد. یافته‌ها نشان دادند که حضور عرشه پل تأثیر قابل توجهی بر عمق و الگوهای آب‌شستگی دارد. در حالت پایه‌های عمود بر جریان، عمق آب‌شستگی با عرشه پل برابر ۲/۳۵ برای حالت بدون عرشه بود. برای حالت پایه‌های موازی با جریان، عمق آب‌شستگی پایه اول و دوم به ترتیب ۲/۷ و ۳/۸۵ برابر افزایش یافت. همچنین، الگو و سرعت افقی جریان در حالت با عرشه به شکل چشمگیری متفاوت بود و سرعت میان دو پایه در حالت عمود بر جریان با حضور عرشه، ۱/۵۱ برابر حالت بدون عرشه اندازه‌گیری شد.

علاوه بر این، پارامترهای آشفتگی جریان نیز تغییرات قابل ملاحظه‌ای نشان دادند. در حالت پایه‌های عمود بر جریان، مقدار انرژی جنبشی آشفتگی (TKE) در حضور عرشه پل

است. در حالت حضور عرشه، مقادیر سرعت برشی بزرگتری در مقایسه با حالت بدون عرشه مشاهده می‌شود. برای حالت با عرشه مقدار حداکثر سرعت برشی بستر تقریباً 0.37 m/s و در حالت بدون عرشه این مقدار برابر 0.17 m/s است.



شکل ۸- کانتورهای مربوط به سرعت برشی بستر در مجاورت بستر آب‌شسته در صفحه افقی xy (الف) پایه‌ها عمود بر جهت جریان و حضور عرشه و (ب) پایه‌ها عمود بر جهت جریان و بدون حضور عرشه

در شکل ۹ نیز مقادیر سرعت برشی بستر برای حالت چیدمان افقی پایه‌ها نسبت به جهت جریان، رسم شده است. شکل ۹-الف مربوط به حالت با عرشه (case 3) و شکل ۹-ب برای حالت بدون عرشه (case 4) است. در شکل ۹-الف الگوی کانتورهای سرعت برشی نشان می‌دهد که تقریباً بیشترین مقدار آن در کنار پایه‌ها و همچنین کمی بعد از پایه سمت چپ رخ داده است. مقدار حداکثر سرعت برشی در این شکل 0.33 m/s برای پایه سمت چپ و برای پایه سمت راست 0.25 m/s است. برای شکل ۹-ب نیز مقدار بیشینه سرعت برشی بستر در کناره‌های پایه مشاهده می‌شود ولی مقدار آن در مقایسه با حالت با عرشه (case 3) یعنی شکل ۹-الف کمتر بوده و ناحیه کوچکتری را نیز به خود اختصاص داده است. مقدار بیشینه آن برای پایه اول برابر 0.18 m/s و برای پایه دوم 0.14 m/s است.

3. Aghaee-Shalmani, Y. and Hakimzadeh, H., 2022. Large eddy simulation of flow around semi-conical piers vertically mounted on the bed. *Environmental Fluid Mechanics*, 22(5), pp. 1211-1232. <https://doi.org/10.1007/s10652-022-09886-x>
4. Aghaee-Shalmani, Y., and Hakimzadeh, H., 2015. Investigation of the local scouring pier of the bridge with variable cross-section. Ph.D. Thesis, *Sahand University of Technology, Tabriz*, 268 p [In Persian].
5. Ahmad, N., Kamath, A. and Bihs, H., 2020. 3D numerical modelling of scour around a jacket structure with dynamic free surface capturing. *Ocean Engineering*, 200, p. 107104. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2020.107104>
6. Baduna, M., Karakurt, O. and Akay, H., 2021. Effect of various flow, sediment and geometrical parameters on partially or fully submerged deck scour. *SN Applied Sciences*, 3, pp. 1-17. <https://doi.org/10.1007/s42452-021-04326-9>
7. Baker, C.J., 1979. The laminar horseshoe vortex. *Journal of fluid mechanics*, 95(2), pp. 347-367. <https://doi.org/10.1017/S0022112079001506>
8. Bombardelli, F.A., Palermo, M. and Pagliara, S., 2018. Temporal evolution of jet induced scour depth in cohesionless granular beds and the phenomenological theory of turbulence. *Physics of Fluids*, 30(8). <https://doi.org/10.1063/1.5041800>
9. Dankoo, A., Yonesi, H., Torabipoudeh, H. and Saneie, M., 2022. The effect of pressure flow conditions on bridge pier scour in compound open channels with vegetation. *Journal of Hydraulics*, 17(1), pp. 89-103. <https://doi.org/10.30482/jhyd.2021.304025.1550>
10. Dargahi, B., 1989. The turbulent flow field around a circular cylinder. *Experiments in fluids*, 8, pp. 1-12. <https://doi.org/10.1007/BF00203058>
11. Graf, W.H. and Altinakar, M.S., 1998. Flow and Transport Processes in Channel of Simple Geometry.
12. 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. 425-31. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)HY.1943-7900.0000035](https://doi.org/10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.0000035)
13. Hannah, C., Scour at Pile Groups. Research Rep. No. 28-3. 1978.
14. Istiarto, I., 2001. Flow around a cylinder in a scoured channel bed. *Lausanne*,

۱/۲ برابر افزایش یافت. در حالی که در پایه‌های موازی، حداکثر انرژی جنبشی بین دو پایه رخ داد و این مقدار برای حالت با عرشه، ۲/۸ برابر بیشتر از حالت بدون عرشه بود. این نتایج تأثیر قابل توجه پارامترهای آشفتگی و سرعت برشی بستر بر آب‌شستگی پیرامون پایه‌ها را در حالت با عرشه را نشان داد.

تضاد منافع نویسندگان

در این مقاله هیچ‌گونه تضاد منافی وجود ندارد و این مسئله مورد تأیید همه نویسندگان است.

دسترسی به داده‌ها

داده‌ها استفاده شده در این پژوهش از طریق مکاتبه با نویسنده مسئول در اختیار قرار خواهد گرفت.

مشارکت نویسندگان

نحوه و میزان مشارکت نویسندگان در انجام این پژوهش به صورت زیر است:

نویسنده اول: جمع‌آوری و تحلیل اولیه داده‌ها، انجام مراحل مدل‌سازی عددی، استخراج نتایج و تحلیل آنها
نویسنده دوم: تحلیل داده‌ها، راهنمایی، ویرایش و بازبینی مقاله و کنترل نتایج
نویسنده سوم: راهنمایی و بازبینی متن مقاله

اصول اخلاقی

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

منابع

1. Abdelhaleem, F.S., Mohamed, I.M., Shaaban, I.G., Ardakanian, A., Fahmy, W. and Ibrahim, A., 2023. Pressure-flow scour under a bridge deck in clear water conditions. *Water*, 15(3), p. 404. <https://doi.org/10.3390/w15030404>
2. Aghaee, Y. and Hakimzadeh, H., 2010, September. Three dimensional numerical modeling of flow around bridge piers using LES and RANS. In *River flow*, 2010, pp. 211-218. Bundesanstalt für Wasserbau. <https://hdl.handle.net/20.500.11970/99648>

- bridge piers. In *IOP conference series: earth and environmental science*, 151(1), p. 012013. IOP Publishing. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/151/1/012013>
25. Ranjkesh, M., 2010. The effect of flow structure on the scouring around cylindrical bridge piers. *M.Sc. thesis, Department of Irrigation and Drainage Engineering, Isfahan University of Technology* [In Persian].
 26. Van Rijn, L.C., 1984. Sediment transport, part I: bed load transport. *Journal of hydraulic engineering*, 110(10), pp.1431-1456. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9429\(1984\)110:10\(1431\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(1984)110:10(1431))
 27. Wang, H., Tang, H., Liu, Q. and Wang, Y., 2016. Local scouring around twin bridge piers in open-channel flows. *Journal of Hydraulic Engineering*, 142(9), p. 06016008. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)HY.1943-7900.0001154](https://doi.org/10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.0001154)
 28. Wu, T.R., Huang, Y.X., Chu, C.R., Wang, C.Y. and Le, T.L., 2024. Numerical study of local scour and hydrodynamic pressure of complex bridge piers. *Results in Engineering*, 24, p. 103533. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2024.103533>
 29. Zhou, L., 2017. *Numerical modelling of scour in steady flows* (Doctoral dissertation, Université de Lyon).
 - Switzerland: Ecole Polytechnique Federale de Lausanne, Master's Thesis, 263 p.
 15. Koushki, M., Chamani, M.R. and Moghim, M.N., 2023. Assessment of equilibrium pressure-flow scour depth using jet flow theory. *International Journal of Sediment Research*, 38(1), pp. 141-151. <https://doi.org/10.1016/j.ijsrc.2022.09.001>
 16. Koushki, M., Chamani, M.R. and Moghim, M.N., 2024. Theoretical approach for the equilibrium scour depth underneath a partially submerged bridge deck. *Physics of Fluids*, 36(2). <https://doi.org/10.1063/5.0192312>
 17. Launay, G., Mignot, E., Rivière, N. and Perkins, R., 2017. An experimental investigation of the laminar horseshoe vortex around an emerging obstacle. *Journal of Fluid Mechanics*, 830, pp. 257-299. <https://doi.org/10.1017/jfm.2017.582>
 18. Lin, C., Kao, M.J., Hsieh, S.C., Lo, L.F. and Raikar, R.V., 2012. On the flow structures under a partially inundated bridge deck. *Journal of Mechanics*, 28(1), pp. 191-207. <https://doi.org/10.1017/jmech.2012.20>
 19. Majid, S.A., Tripathi, S. and Das, D., 2023. Experimental study of pressure flow due to vertical contraction using particle image velocimetry. *Journal of Hydraulic Engineering*, 149(7), p. 04023016. <https://doi.org/10.1061/JHEND8.HYENG-13397>
 20. Malekouti, A. and Dehnadi, A., 2018. Numerical Simulation of Scour around Double Cylindrical Bridge Piers Group. *International Conference on Civil Engineering, Architecture and Urban Development of Contemporary Iran, Tehran* [In Persian].
 21. Nasiri-Dehsorkhi, E., Chamani, M.R. and Kabiri-Samani, A., 2021. August. Characteristics of flow around a cylindrical pier under a partially submerged bridge deck. In *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Water Management*, 174(4), pp. 159-172. Thomas Telford Ltd. <https://doi.org/10.1680/jwama.19.00021>
 22. Nisi, M., Jafari, A. and Qomshi, M., 2021. Investigating the Effect of Accumulated Wood around Cylindrical Bridge Piers on the Depth of Local Scour, Twelfth International Seminar on River Engineering [In Persian].
 23. Nouh, M., 1986. August. Local scour at pile groups in meandering channels. In *Proc., IAHR, Symp. on Scale Effects in Modelling Sediment Transport Phenomenon* (pp. 164-179).
 24. Omara, H. and Tawfik, A., 2018. May. Numerical study of local scour around