

Numerical Analysis of Turbulent Flow Mechanisms Encountering Complex Bridge Piers

Seyed Hossein Mohajeri^{1*}, Masoumeh Rostamabadi², Hamidreza Sama³

1- * Associate Professor, Department of Civil Engineering, Faculty of Technology and Engineering, Kharazmi University, Tehran, Iran.

2. Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Buin Zahra Branch, Islamic Azad University, Buin Zahra, Iran.

3- PhD graduate, Department of Water Engineering, Science and Research Unit, Islamic Azad University, Tehran, Iran.

* hossein.mohajeri@khu.ac.ir

Received: 19 May 2024

Accepted: 2 September 2024

Discussion: 23 September 2025



J. Hydraul.

Iranian Hydraulic Association

Homepage: www.jhyd.iha.ir

Abstract

Introduction: Complex bridge piers comprising multiple piers, a cap, and columns introduce complex flow dynamics due to their structural intricacies. Previous research has predominantly focused on scouring, often neglecting the turbulent flow patterns which are critical for comprehensive hydraulic engineering analyses. This study addresses this research gap by characterizing the turbulent flow around composite bridge piers, aiming to inform improved structural design strategies that enhance durability and safety.

Methodology: The numerical simulations employed in this research utilized the advanced computational fluid dynamics software, Flow3D, known for its precision in modeling complex flow scenarios. The numerical model was validated against the experimental results provided by Beheshti and Ataie-Ashtiani (2010), ensuring reliability and accuracy. Complex pier geometries were meticulously crafted in AutoCAD and converted as *.stl file for integration into Flow3D. The RNG turbulence model was applied to solve the flow equations effectively, capturing the detailed characteristics of turbulence around the structures. The simulation settings were rigorously managed, with a total simulation duration of 500 seconds, achieving flow stability at around 220 seconds. The computational phase was completed in approximately 12 hours, emphasizing the detailed and extensive nature of the analysis required to capture the complex flow patterns.

Results and discussion: The simulations revealed significant insights into the flow dynamics around complex bridge piers. The interaction of flow with the piers, cap, and columns results in lateral flow deflection, leading to distinct zones of varying velocity. Low velocity regions were identified between consecutive piers, while high velocity zones manifested along their lateral sides. The formation of vortices downstream of each pier was a key finding, with these vortices growing in intensity and size with increased distance from the bed, observable up to a downstream distance of approximately seven cap lengths. The highest flow velocities were noted at the upstream corners of the cap's lateral face, indicating a significant alteration and acceleration of flow due to structural blockages.

Shear stress was predominantly higher at the pier edges, with the maximum stress observed around the first pier encountering the flow, suggesting a higher susceptibility to scouring at this location. The turbulence intensity was notably elevated at points where the flow impacted the piers, columns, and cap. These results provide a critical foundation for the design of composite bridge structures, highlighting the necessity to account for complex flow interactions to mitigate potential hydraulic issues.

Conclusions: The comprehensive numerical analysis conducted in this study not only enhances the understanding of flow behavior around composite bridge piers but also serves as a vital reference for engineers designing safer and more resilient bridge structures in challenging hydraulic environments.

Keywords: Complex Bridge Piers, Turbulent Flow, Scouring, Flow Mechanisms, Numerical Modeling.

تجزیه و تحلیل عددی سازوکار جریان آشفته پیرامون پایه‌های پل مرکب

سید حسین مهاجری^{۱*}، معصومه رستم آبادی^۲، حمیدرضا سماع^۳

۱- دانشیار، گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه خوارزمی، تهران، ایران.
 ۲- استادیار، گروه مهندسی عمران، واحد بوئین زهرا، دانشگاه آزاد اسلامی، بوئین زهرا، ایران.
 ۳- دانش آموخته دکتری، گروه مهندسی آب، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران.

* hossein.mohajeri@khu.ac.ir

دریافت: ۱۴۰۳/۰۲/۳۰، پذیرش: ۱۴۰۳/۰۶/۱۲، نقد و بررسی: ۱۴۰۴/۰۷/۰۱، وب‌گاه نشریه هیدرولیک: www.jhyd.iha.ir

چکیده: پایه‌های پل مرکب که ترکیبی از چند شمع، سرشمع و یک یا چند ستون در بالای سرشمع می‌باشند، به علت برهمکنش جریان و قسمت‌های مختلف پایه، سازوکار پیچیده‌تری نسبت به تک پایه‌ها دارند. بیشتر بررسی‌های مربوط به پایه‌های پل مرکب بر آبشستگی پیرامون پایه‌ها متمرکز بوده و به الگوی جریان آشفته کمتر توجه شده است. در این پژوهش الگوی جریان پیرامون پایه‌های پل مرکب، به منظور توصیف بهتر سازوکار جریان مدل‌سازی عددی شده است. به این منظور نرم‌افزار فلوتری دی استفاده شد و پس از صحت‌سنجی مدل عددی، الگوی جریان، آشفستگی و تنش برشی پیرامون پایه‌های بررسی شد. نتایج مدل‌سازی‌ها نشان از وجود پدیده‌هایی چون ناحیه کم‌سرعت جریان در محدوده پایه‌های متوالی و وجود جریان گردابی پیرامون محور قائم پس از هر پایه دارد. افزایش عمق جریان در بالادست پایه‌ها و کاهش عمق جریان در محل برخورد جریان با ستون نیز در نتایج عددی مشاهده شد. جریان گردابی پیرامون محور طولی آبراهه در پایین دست و جریان گردابی در محل اتصال سرشمع به ستون نیز از دیگر ویژگی‌های جریان پیرامون پایه‌های مرکب بود که مدل عددی آن را شبیه‌سازی کرد. نتایج مدل‌سازی عددی نشان داد بیشینه تنش برشی پیرامون نخستین پایه در معرض جریان رخ داده و بیشینه شدت آشفستگی در محل برخورد جریان به اجزای پایه مرکب بوده است. همچنین پدیده حفاظتی ردیف‌های بالادست پایه‌ها روی ردیف‌های پایین دست منجر به کاهش تنش برشی ردیف‌های دوم، سوم و چهارم پایه‌ها نسبت به ردیف پیش از خود به ترتیب برابر ۴۲، ۳۶ و ۳۱ درصد و کاهش سرعت برآیند به ترتیب ۱۷، ۱۰ و ۷/۵ درصد شده است.

کلیدواژگان: پایه پل مرکب، جریان آشفته، آبشستگی، سازوکار جریان، مدل‌سازی عددی

۱- مقدمه

از دهه ۹۰ میلادی بررسی پایه‌های مرکب مورد توجه قرار گرفت. پژوهش‌هایی در زمینه بررسی و پیش‌بینی عمق آب‌شستگی پیرامون گروه پایه‌های پل صورت گرفت. Nazariha (1996) آزمایش‌هایی را روی تک پایه با قطرهای مختلف و پس از آن گروه پایه‌های ۲، ۳، ۴ و ۶ تایی انجام و نشان داد برای پایه‌های در راستای جریان، پایه‌های آخری توسط پایه‌های بالادست حمایت می‌شوند که منجر به کاهش عمق آب‌شستگی پیرامون پایه‌های پایین دست می‌شود. نتایج آزمایش‌های Taghizadeh & Mousavi Jahromi (2006) نشان داد استفاده از شمار

پایه پل مرکب، نوع رایجی از پایه‌های پل است که از یک ستون، یک سرشمع و گروهی شمع همانند آنچه در شکل ۱ نمایش داده شده است در کنار یکدیگر قرار گرفته‌اند (Yang et al., 2024). در پایه‌های پل مرکب، همه قسمت‌ها در معرض جریان هستند و به علت اثرگذاری متقابل قسمت‌های یادشده، جریان، پیچیدگی مضاعفی نسبت به تک پایه‌ها دارد و چالش‌هایی برای بررسی الگوی جریان و پیش‌بینی عمق آب‌شستگی پیرامون این سازه‌ها بوجود می‌آید.

آبشستگی را بررسی کردند. در بررسی‌های آزمایشگاهی Mohammadpour et al. (2021) عمق بهینه فرارگیری پی با بررسی تغییرپذیری‌های زمانی آبشستگی در پیرامون پایه‌های مرکب مستطیلی و همچنین تاثیر ابعاد پایه و پی بر عمق آبشستگی بررسی شد. Yang et al. (2018) آزمایش‌هایی را برای بررسی آبشستگی در پیرامون پایه‌های پل مرکب انجام دادند.

Sheppard et al. (2023) با اذعان به این مسئله که تلاش‌ها برای توسعه روش‌های برآورد دقیق میزان آبشستگی و زمان رسیدن به تعادل پیرامون پایه‌های پل تا حدودی موفق بوده است، به توسعه یک رابطه ریاضی برای برآورد عمق آبشستگی به عنوان تابعی از زمان پرداختند که قادر است میزان آبشستگی و زمان مورد نیاز تا رسیدن به ۸۰ تا ۹۰ درصد عمق متعادل را پیش‌بینی کند. Yang et al. (2024) به شبیه‌سازی عددی جریان و آشفته‌گی پیرامون پایه‌های پل مرکب با استفاده از مدل Flow3D با لحاظ کردن اثر نیروی باد و امواج پرداختند.

یکی از نخستین بررسی‌ها در رابطه با ساختار جریان در پیرامون پایه‌های پل مرکب توسط Beheshti & Ataie (2010) انجام شد و نتایج نشان داد مفهوم تنش برشی بحرانی برای پیش‌بینی آغاز و حرکت رسوب‌های پیرامون پایه‌های پل مرکب کافی نیست، بلکه باید مدل‌های کلی دیگری که هم ویژگی پیچیده جریان پیرامون پایه‌ها و هم ساختار آشفته‌گی در مجاورت پایه‌ها را در نظر بگیرد توسعه داده شود. Asadi et al. (2016) با استفاده از مدل Flow3D به بررسی نحوه شکل‌گیری سرعت در پیرامون پایه پل‌ها با هندسه مرکب پرداختند و نشان دادند جریان بسیار آشفته و گرداب‌های مختلفی ایجاد می‌شود که در پیرامون پایه‌های ساده مشاهده نشده است.

همانگونه که مرور بررسی‌های گذشته نشان می‌دهد، پژوهش‌های زیادی در زمینه پایه‌های پل مرکب صورت گرفته است که تمرکز آنها بر تحلیل آبشستگی پیرامون پایه‌ها و اثرگذاری فراسنجه‌های هندسی و هیدرولیکی بر روند آبشستگی بوده است و توجه کمی بر الگوی جریان

پایه‌های بیشتر با پهنای کمتر باعث کاهش عمق آبشستگی موضعی نسبت به شمار پایه‌های کمتر با پهنای بیشتر می‌شود. (Ataie-Ashtiani & Beheshti (2006) با آزمایش گروه پایه‌ها با قطرهای مختلف نتیجه گرفتند مهم‌ترین عامل موثر در تعیین عمق آبشستگی شمار پایه‌های در معرض جریان است. در بررسی‌های آزمایشگاهی Heydarpour et al. (2007) به بررسی تاثیر استفاده از شکاف مستطیلی در مهار آبشستگی موضعی در گروه پایه‌های دو و سه‌تایی استوانه‌ای پرداخته شد.

برخی بررسی‌های اثرگذار بگذار فراسنجه‌های مختلف هندسی و هیدرولیکی مانند شمار، قطر و آرایش پایه‌ها بر آبشستگی پیرامون گروه پایه‌ها را مدنظر قرار دادند. Moreno et al. (2016) در یک پژوهش آزمایشگاهی ۶۷ آزمایش مختلف برای بررسی مشارکت هر کدام از مؤلفه‌های پایه‌های پل مکعب بر روی عمق آبشستگی انجام دادند. Pourghasemzadeh & Ghomeshi (2022) شبیه‌سازی فیزیکی آبشستگی، به بررسی اثرگذاری زاویه گروه پایه‌های استوانه‌ای پل بر بیشینه عمق آبشستگی گروه پایه‌ها پرداختند. بیشتر بررسی‌های مربوط به پایه‌های پل مرکب بر پیش‌بینی عمق آبشستگی و اثرگذاری فراسنجه‌های هندسی گروه پایه‌ها مانند شمار و فاصله بین آنها و فراسنجه‌های سرشمع مانند شکل و ابعاد آن و فاصله سرشمع از بستر، بر عمق آبشستگی متمرکز بوده است. Amini et al. (2012) عمق آبشستگی برای ۱۰ آرایش مختلف گروه پایه‌ها را بررسی کردند و نتیجه گرفتند عمق آبشستگی با افزایش فاصله بین پایه‌ها که عمود بر جهت جریان است کاهش می‌یابد و در همه آرایش‌ها، بیشینه عمق آبشستگی در برابر نخستین ردیف پایه‌ها رخ داده است. Ghodsi et al. (2021) آزمایش‌هایی برای بررسی فراسنجه‌های فاصله سرشمع تا ستون، شمار پایه‌های در مسیر جریان و ضخامت سرشمع انجام دادند. نتایج نشان داد هندسه گروه پایه‌ها عمق آبشستگی را تحت تاثیر قرار می‌دهد و هنگامی که شمار پایه‌ها در مسیر جریان افزایش یابد بیشینه عمق آبشستگی کاهش می‌یابد. Khaledi et al. (2020) با استفاده از مدل فیزیکی، تاثیرگذاری شکل سرشمع بر ابعاد حفره‌ی

میانگین گیری شده زمانی و موقعیت می‌باشند. t بیانگر زمان و p فشار را نشان می‌دهد. ρ چگالی سیال، σ_T ضریب کشش سطحی، و τ_{ij} تنش رینولدز بر مبنای فرضیه بوسینسک و ν_T لزوجت گردابه‌ای می‌باشد.

۲-۲- معرفی مدل عددی

Flow3D ابزار مدل‌سازی توانمندی است که دید مهندسی بالارزشی دربارهٔ بسیاری از فرآیندهای فیزیکی جریان در اختیار قرار می‌دهد. در این مدل از روش حجم محدود در شبکه‌بندی منظم مستطیلی بهره گرفته شده است و مدل‌های آشفتگی مختلفی برای حل جمله‌های آشفتگی در معادله‌های حاکم بر جریان استفاده می‌شود.

۲-۳- صحت‌سنجی مدل عددی

در این پژوهش از مدل آزمایشگاهی-Beheshti and Ataie-Ashtiani (2010) برای صحت‌سنجی مدل عددی استفاده شده است. برابر شکل ۲ مدل آزمایشگاهی در آبراهه مستقیمی به طول ۱۵ متر، عرض ۱/۲۵۴ متر و عمق ۰/۹ متر انجام شد. دو ردیف چهارتایی پایه پل با یک سرشمع مستطیلی و یک ستون مستطیلی روی سرشمع به فاصله ۱۰ متری از بالادست آبراهه، هندسه مدل پایه‌های مرکب را تشکیل می‌دهد. در شکل ۲ جزئیات بیشتری از هندسه پایه‌های پل، سرشمع و ستون نشان داده شده است. ویژگی‌های هندسی پایه‌ها در جدول ۱ آمده است.

به منظور شبیه‌سازی جریان پیرامون پایه‌ها، هندسه پایه‌های مرکب یادشده در اتوکد ساخته شد و به صورت فایل با پسوند stl به Flow3d فراخوانی شد. شکل ۳ هندسه آبراهه و پایه‌ها را نشان می‌دهد. با توجه به تقارن هندسی میدان جریان نسبت به محور Y ، و نیز صرفه‌جویی $cpu\ time$ نصف هندسه آبراهه در جهت عرضی با شرط مرزی تقارن شبیه‌سازی شد. در آغاز به منظور اطمینان از توسعه‌یافتگی جریان پیش از رسیدن به گروه پایه‌ها، یک آبراهه ساده بدون در نظر گرفتن پایه‌های پل به طول ۲۰ متر برای شبیه‌سازی در نظر گرفته شد و نیمرخ‌های بدون بعد سرعت جریان در فاصله‌های طولی مختلف از ابتدای آبراهه با هم مقایسه شد. نتایج نشان داد

معطوف شده است. بررسی دقیق الگوی جریان و اثر متقابل قسمت‌های مختلف پایه‌های پل مرکب و نیز بررسی آشفتگی و فراسنجه‌های آن به درک بهتر رفتار این سازه‌ها در برابر جریان منجر می‌شود. لذا در این پژوهش به مدل‌سازی عددی الگوی جریان پیرامون پایه‌های پل مرکب پرداخته شده است و پس از صحت‌سنجی مدل عددی، تغییرپذیری سرعت و فراسنجه‌های آشفتگی و تنش برشی بررسی شده است.



Fig. 1 Several types of complex bridge piers including pile groups, pile cap, and a column (a), some columns (b). (Yang et al., 2024)

شکل ۱ نمونه‌های مختلف پایه پل مرکب شامل گروه پایه‌ها، سرشمع و a: یک ستون، b: چند ستون (Yang et al., 2024)

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- معادله‌های حاکم بر جریان آشفته

معادله‌های اصلی برای شبیه‌سازی جریان سه‌بعدی شامل معادله‌های پیوستگی و اندازه حرکت در جهات x ، y و z هستند. با توجه به اینکه در این پژوهش تنها الگوی جریان در بستر صلب شبیه‌سازی شده است، معادله‌های انتقال رسوب ارائه نشده است.

معادله پیوستگی با فرض تراکم ناپذیری جریان:

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

معادله اندازه حرکت با فرض ثابت بودن ویژگی‌های سیال:

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + u_i \frac{\partial u_i}{\partial x_i} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\nu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) + \frac{\tau_{ij}}{\rho} \right] + \frac{\sigma_T K_\gamma}{\rho} \frac{\partial \gamma}{\partial x_i} \quad (2)$$

$$\tau_{ij} = -\overline{u_i u_j} = 2\nu_T S_{ij} - \frac{2}{3} k \delta_{ij} \quad (3)$$

در معادله‌های بالا u_i و x_i به ترتیب بردارهای سرعت

دارای پایه‌های پل طول آبراهه پیش از پایه‌ها کمی بیش از ۱۴ متر، یعنی ۱۵ متر در نظر گرفته شد.

نیمرخ بی‌بعد سرعت در فاصله‌های ۱۲ و ۱۴ متری از ابتدای آبراهه برهم منطبق شد. لذا در شبیه‌سازی آبراهه

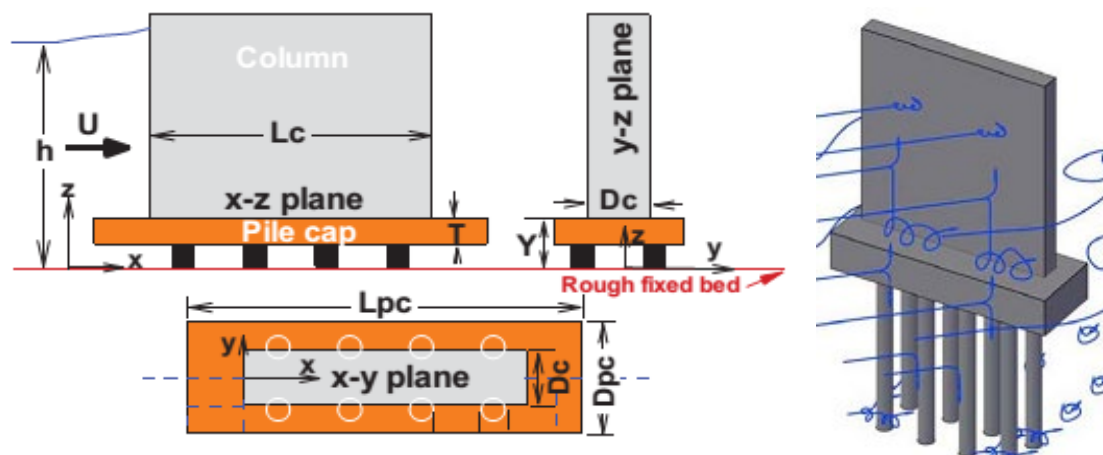


Fig. 2 General plane view and complex bridge piers geometry of experimental model (Beheshti and Ataie-Ashtiani, 2010)

شکل ۲ نمای کلی و هندسه پایه‌های پل مرکب در مدل آزمایشگاهی (Beheshti and Ataie-Ashtiani, 2010)

جدول ۱ ویژگی‌های هندسی و هیدرولیکی مدل آزمایشگاهی (Beheshti and Ataie-Ashtiani, 2010)

Table 1 Hydraulic and geometric properties of experimental model (Beheshti and Ataie-Ashtiani, 2010)

Bp (cm)	Y(cm)	T (cm)	Lpc (cm)	Dpc (cm)	Lc (cm)	Dc (cm)	U (m/s)	H (cm)
2.54	6.15	3.36	42	14	30.3	6.8	0.37	28.53

گرفته شده در مدل نیز در شکل ۳ نشان داده شده است. در بالادست آبراهه از شرط مرزی دبی، در خروجی آبراهه شرط مرزی فشار معادل با عمق پایاب، دیوار جانبی شرط مرزی دیواره، برای مرز متقارن شرط مرزی تقارن، برای کف از شرط مرزی دیواره با زبری مشخص معادل با مقدار آزمایشگاهی و در نهایت برای مرز مشترک آب و هوا شرط مرزی تقارن برای در نظر گرفتن فشار هوا سپهر روی سطح آزاد استفاده شد. برای بلوک ۲ که در محدوده پیرامون پایه‌ها است از شرط مرزی تقارن استفاده شد. برای حل جمله‌های آشفته‌گی در معادله‌های حاکم بر جریان از مدل آشفته‌گی RNG که در جریان‌های دارای جدایی از مرزها و جریان‌های چرخشی بهتر از مدل k-ε عمل کرده است استفاده شد (Omara & Tawfik, 2018; Sicilian et al., 1987; Asadi et al., 2016; RostamAbadi & Kazemi, 2022). بیشینه زمان مدل‌سازی ۵۰۰ ثانیه در نظر گرفته شد. مدل عددی پس از حدود ۲۲۰ ثانیه به پایداری رسید و حل معادله‌های جریان متوقف شد. زمان اجرای مدل حدود ۱۲ ساعت طول کشیده است.

برای شبکه‌بندی مدل عددی دو بلوک شبکه در نظر گرفته شد. بلوک ۱ با سلول‌های درشت‌تر، برای کل هندسه مدل و بلوک ۲ با سلول‌های ریزتر، بمنظور تقویت شبکه‌بندی پیرامون هندسه پایه پل با هدف بهبود وضوح هندسه پایه‌ها و پرهیز از افزایش قابل توجه شمار سلول‌های شبکه‌بندی به‌کار گرفته شد (شکل ۳). لازم است با انتخاب گام زمانی کوچک، استفاده از ضرایب زیرتخفیف مناسب و شرط مرزی مناسب بین دو بلوک، مانع از ناپایداری مدل عددی در مراحل اولیه شبیه‌سازی شد. نکته مهم دیگر در استفاده از شبکه‌های تودرتو رعایت نسبت اندازه سلول‌های دو شبکه روی هم است که این نسبت نباید بیشتر از ۲ باشد، یعنی اندازه سلول‌های شبکه درشت‌تر بیشتر از دو برابر اندازه سلول‌های شبکه ریزتر نباید باشند، در غیر این صورت منجر به ناپایداری مدل عددی خواهد شد. در جدول ۲ به تفکیک بلوک‌ها، اندازه سلول‌های شبکه و نیز زمان محاسبه‌شدنی لازم برای پایداری مدل عددی ارائه شده است. شرایط مرزی به‌کار

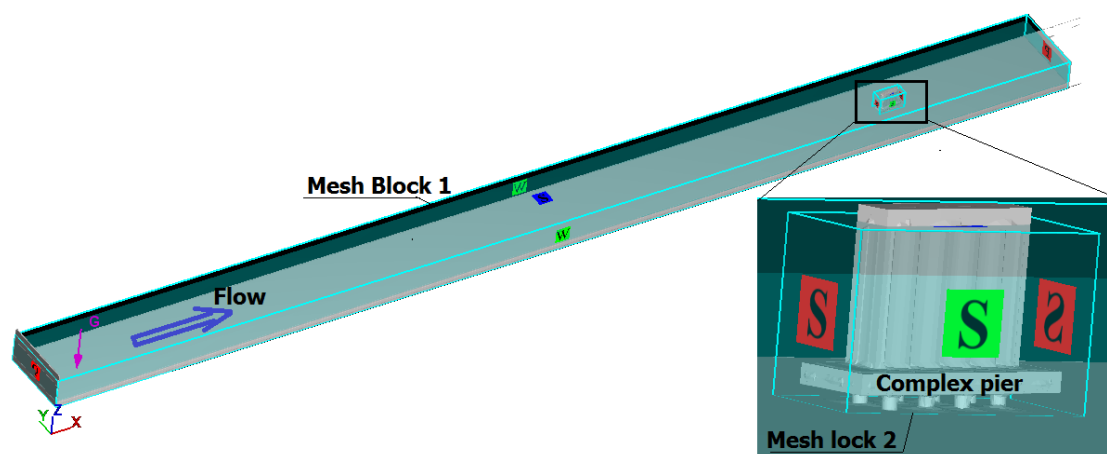


Fig. 3 Geometry and boundary conditions of complex bridge piers in the numerical model

شکل ۳ هندسه پایه های مرکب و شرایط مرزی در مدل عددی

و جریان یکنواخت است نیمرخ سرعت مستقل از اندازه سلول های شبکه شده است. در مقطع پایین دست پایه ها ($x/D_c = 14.7$)، تفاوت زیادی بین نتایج شبکه بندی ۱ با دو شبکه دیگر وجود دارد، اما با تغییر شبکه بندی از ۲ به ۳، تغییر قابل توجهی در نتایج خروجی از شبیه سازی رخ نداده است و نتایج نزدیک به یکدیگر می باشند. مقدار کمی خطای مدل عددی نسبت به مدل آزمایشگاهی محاسبه و میانگین آن در جدول ۲ ارائه شده است. میزان کاهش خطای شبکه های محاسبه شدنی بین شبکه ۱ با ۲ بیشتر از شبکه ۲ با ۳ است، و با تغییر شبکه از ۲ به ۳ حدود ۳ درصد خطاها بهبود داشته است. بنابراین می توان نتیجه گرفت که نتایج مدل عددی تحت تاثیر اندازه سلول شبکه بندی ۲ و ۳ قرار نمی گیرد. از سوی دیگر زمان اجرای مدل سازی در شبکه ۳ حدود ۸۷ درصد نسبت به زمان مدل سازی شبکه ۲ بیشتر شده است. لذا در این پژوهش برای شبیه سازی های بعدی شبکه بندی ۲ در نظر گرفته شد.

به منظور صحت سنجی نتایج مدل عددی، نیمرخ های سرعت طولی مدل عددی برای مقطع های بالادست و پایین دست پایه های مرکب در خط مرکزی آبراهه با نتایج مدل آزمایشگاهی مقایسه شده و در شکل ۵ نشان داده شده است. در این شکل موقعیت پایه ها، سرشمع و ستون نیز نشان داده شده است. نیمرخ ها در x/D_c های متفاوت ترسیم شده است. D_c عرض ستون و معادل $6/8$ سانتی متر است. لذا $x/D_c = 14/7$ یعنی مقطعی که به

در هر مدل سازی عددی لازم است نتایج مدل سازی مستقل از شبکه محاسبه شدنی بدست آید. بدین منظور سه شبکه بندی متفاوت به شرح جدول ۲ استفاده شد. در جدول ۲، ابعاد هر سلول شبکه برای هر یک از بلوک ها (در جدول با نام B1 و B2 برای بلوک های ۱ و ۲ نوشته شده است)، شمار کل سلول ها و زمان محاسبه شدنی ارائه شده است.

جدول ۲ ویژگی های شبکه های محاسبه شدنی برای بررسی

نتایج مستقل از شبکه

Table 2 The computational mesh for investigating mesh independent results

Mesh	Mesh cell size (m)	Total cells	Computational time	% Error
1	B1: 0.025	3881	2h: 21 min	13.6
	B2: 0.0125	00		
2	B1: 0.021	6884	4h	6.9
	B2: 0.0105	82		
3	B1: 0.0185	9279	7h :33 min	3.6
	B2: 0.00925	76		

برای مقایسه شبکه بندی های یاد شده، مؤلفه افقی سرعت در راستای قائم در دو مقطع بالادست و پایین دست پایه ها در شکل ۴ ترسیم شده است. در این شکل D_c عرض ستون و x فاصله طولی از آغاز ستون (همان طوری که در شکل ۲ مشاهده می شود) است. در مقطع بالادست پایه ها ($x/D_c = -14.7$) نیمرخ های سرعت در شبکه بندی ۱، ۲ و ۳ به طور کامل بر یکدیگر منطبق است. در واقع در بالادست پایه ها که الگوی جریان تحت تاثیر پایه ها نیست

نیمرخ سرعت طولی را پیش‌بینی کرده است. تنها مقطعی که نیمرخ‌های سرعت عددی و آزمایشگاهی کمی اختلاف دارند در لبه پایین دست ستون و در نزدیکی سرشمع است که می‌تواند به خاطر وجود جریان‌های گردابی در دنباله ستون و استفاده از مدل‌های آشفتگی دومعادله‌ای در مدل‌سازی عددی باشد. با توجه به دقت قابل قبول مدل عددی در پیش‌بینی سرعت طولی، به بررسی نتایج مدل عددی در پیش‌بینی سازوکار جریان پیرامون پایه‌های پل پرداخته شده است.

۳- نتایج

به منظور بررسی سازوکار جریان پیرامون پایه‌های پل مرکب، بردارها و منحنی‌های هم‌مقدار سرعت در مقطع‌های مختلف عرضی و عمقی، جریان‌های گردابی، تغییرپذیری‌های عمق جریان، شدت آشفتگی و تنش برشی روی کف ارزیابی شده است.

۳-۱- منحنی‌های هم‌مقدار سرعت برآیند در

صفحه‌های x-y

منحنی‌های هم‌مقدار برآیند سرعت جریان در فاصله‌های مختلف از کف در شکل ۶ نشان داده است. در این شکل z: فاصله از کف آبراهه، h: عمق جریان، x: فاصله طولی از ابتدای آبراهه و Y: عرض آبراهه است. برابر شکل ۶-a با برخورد جریان به نخستین پایه و انحراف جریان به سمت عرضی، سرعت برآیند در دو طرف پایه افزایش می‌یابد، سرعت جریان پس از پایه کم می‌شود، اما سرعت منفی یا همان جریان برگشتی مشاهده نشده است. جریان کم‌سرعت پشت نخستین پایه، با برخورد به پایه دوم باردیگر به پیرامون پایه منحرف می‌شود. این روند تا برخورد به آخرین پایه ادامه دارد و ناحیه کم سرعت جریان در محدوده پایه‌های متوالی بوجود می‌آید. به علت پیوستگی جریان در جهت عرضی، کمی دورتر از این ناحیه کم‌سرعت، ناحیه پرسرعت جریان در وجه کناری پایه‌ها بوجود می‌آید.

فاصله یک متری بالادست لبه سرشمع قرار گرفته است. به طور کلی روند نتایج مدل عددی مانند نتایج آزمایشگاهی است. در فاصله‌های نیم‌متری و یک‌متری بالادست سرشمع، نیمرخ‌های سرعت طولی در مدل عددی و آزمایشگاهی همخوانی بسیار خوبی دارند.

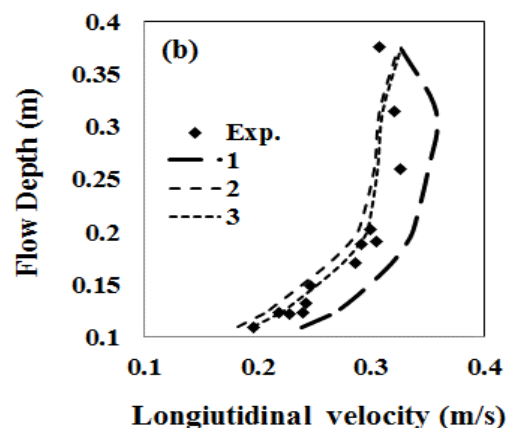
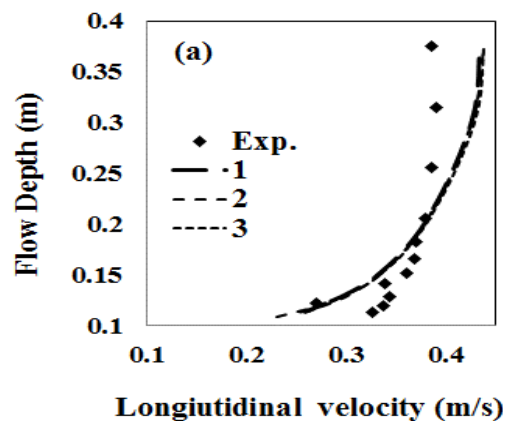


Fig. 4 Comparison of the results of different mesh, (a): $x/D_c=14.7$ $x/D_c=14.7$, (b):

شکل ۴ مقایسه نتایج شبکه‌بندی‌های مختلف: (a)

$x/D_c=14.7$ (b) $x/D_c=14.7$

در مقطع $x/D_c=0.1/86$ یعنی به فاصله ۵ سانتی‌متری از بالادست سرشمع نیز همخوانی بسیار خوبی بین نتایج عددی و آزمایشگاهی مشاهده می‌شود. در این مقطع در مدل آزمایشگاهی تنها در ترازهای بالاتر از سرشمع مؤلفه‌ی سرعت برداشت شده بود. لذا امکان مقایسه نیمرخ سرعت از تراز سرشمع تا نزدیکی بستر وجود نداشت و تنها نتایج مدل عددی نشان داده شده است. در پایین دست پایه‌ها نیز مدل عددی با دقت بسیار خوبی

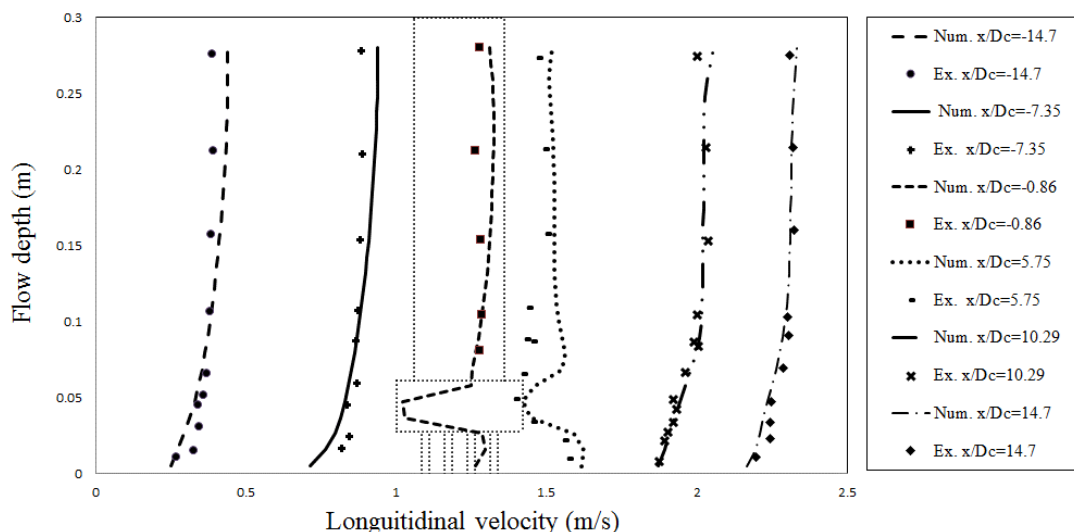


Fig. 5 Comparison of the of Numerical and experimental longitudinal velocity profile at different cross sections

شکل ۴ مقایسه نیمرخ سرعت طولی در مدل عددی و آزمایشگاهی در مقطع‌های مختلف

تدریج رو به کم شدن می‌نهد. در نزدیکی سطح آزاد نیز برابر شکل f-۶ حفراهی در گوشه بالادست ستون مشاهده می‌شود که نشان دهنده پایین افتادگی سطح آزاد جریان است.

۲-۳- بردارهای سرعت برآیند در صفحه x-y

در شکل ۷ بردارهای سرعت در چهار تراز نزدیک کف، زیر سرشمع، وسط سرشمع و سطح آب نشان داده شده است. برابر شکل a-۷ و b-۷ در تراز زیر سرشمع، جریان با برخورد به پایه اول به سمت دوطرف پایه منحرف می‌شود و این جریان انحرافی از کنار پایه‌های دیگر عبور می‌کند. در حد فاصل پایه‌های متوالی ناحیه کم‌سرعت جریان بوجود آمده است، اما همین جریان کم‌سرعت نیز با برخورد به پایه‌های دیگر، به دوطرف منحرف می‌شود و پس از هر پایه ناحیه گردابی بوجود آمده است. با توجه به شکل c-۷ در تراز وسط سرشمع جریان از گوشه بالادست سرشمع منحرف می‌شود. در تراز بالای سرشمع جریان از لبه‌های ستون منحرف می‌شود.

مقایسه شکل‌های c-۷ و d-۷ نشان می‌دهد با فاصله گرفتن از کف که سرعت جریان زیاد می‌شود، انحراف خطوط جریان بیشتر می‌شود، لذا انحراف جریان از لبه ستون بیشتر از لبه سرشمع است. پس از پایه‌ها جریان گردابی پیرامون محور قائم در پایین دست تشکیل می‌شود و

برابر شکل b-۶ تا تراز زیر سرشمع این الگو مشاهده شده است. به پدیده حمایت^۱ پایه‌های پایین دست توسط پایه‌های بالادست و کم شدن سرعت جریان برخوردی به پایه‌های پایین دست توسط محققان دیگر مانند Nazariha (1996) و Yang et al. (2024) اشاره شده است. برابر شکل c-۶ و d-۶، در تراز سرشمع نیز جریان به صورت عرضی منحرف می‌شود. بیشترین سرعت جریان در گوشه بالادست وجه کناری سرشمع مشاهده می‌شود که نشان دهنده مسدود شدن مسیر جریان توسط سرشمع و زیاد بودن سرعت جریان در فضای عرضی بین سرشمع و دیواره آبراهه است. ناحیه کم‌سرعت جریان در پایین دست سرشمع رخ داده است، اما سرعت برآیند منفی مشاهده نشده است. برابر شکل e-۶ برخورد جریان به ستون نیز منجر به انحراف جانبی جریان، بوجود آمدن سرعت بیشینه در گوشه بالادست ستون و ناحیه کم سرعت جریان پس از ستون می‌شود. با نزدیک شدن به سمت سطح آزاد جریان، به علت زیاد شدن سرعت، انحراف جانبی جریان بیشتر و ناحیه کم سرعت پس از ستون نیز گسترده تر خواهد شد. این روند تا تراز حدود ۸۰ درصد عمق جریان ادامه می‌یابد (شکل‌های d-۶ و e-۶). مقایسه شکل e-۶ و f-۶ نشان می‌دهد بیشینه سرعت جریان در تراز ۸۰ درصد عمق جریان رخ داده است و پس از آن به

1 Sheltering phenomenon

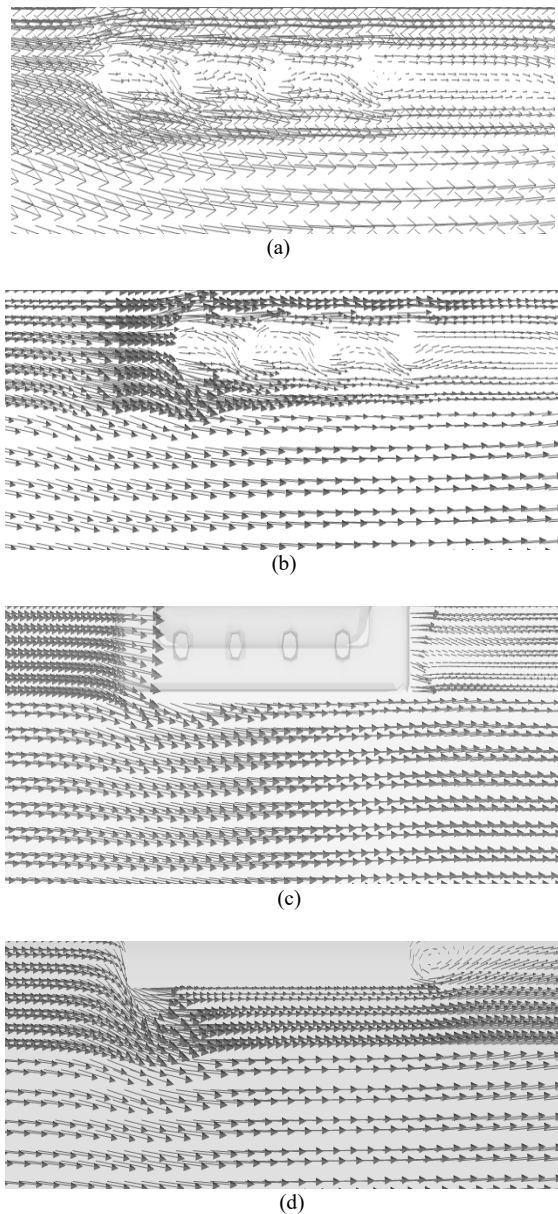


Fig. 7 Velocity magnitude vectors at x-y plane at different levels. (a) $z/h=0.7\%$, near the bed, (b) $z/h=8\%$, under the pile cap, (c) $z/h=11\%$, pile cap level, (d) $z/h=1$, water surface

شکل ۷ بردارهای سرعت برآیند در صفحه x-y در ترازهای مختلف. s: $z/h=0.7\%$ نزدیک کف، b: $z/h=8\%$ زیر سرشمع، c: $z/h=11\%$ تراز سرشمع، d: $z/h=1$ سطح آب

متحرک توسط مدل عددی انجام شد، نتایج به دست آمده گویای وجود گردابه نعل اسبی درون چاله آبشستگی بود. افزون بر آن، Yang et al. (2024) به بررسی آبشستگی و میدان جریان پیرامون پایه‌های پل مرکب با بستر متحرک در مقیاس واقعی پرداختند. نتایج نشان داد گردابه نعل اسبی در جلوی پایه‌ها تشکیل نمی‌شود که می‌توان آن را ناشی از شکل‌گیری ناچیز چاله آبشستگی

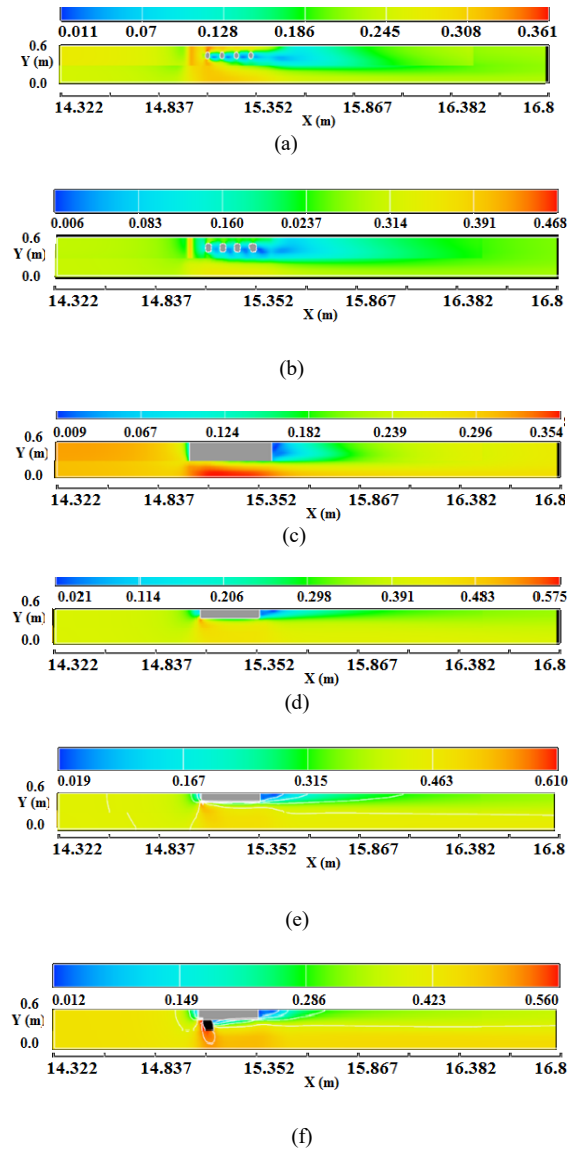


Fig. 6 Velocity magnitude contours at x-y planes at different levels. (a) $z/h=0.04$, (b) $z/h=0.1$, (c) $z/h=0.14$, (d) $z/h=0.45$, (e) $z/h=0.8$, (f) $z/h=0.98$

شکل ۶ منحنی‌های هم مقدار سرعت برآیند در صفحه‌های x-y در ترازهای مختلف: (a) $z/h=0.04$ (b) $z/h=0.1$ (c) $z/h=0.14$ (d) $z/h=0.45$ (e) $z/h=0.8$ (f) $z/h=0.98$

با نزدیک شدن به سطح، این ناحیه گردابی بزرگتر می‌شود. علت گسترده شدن این ناحیه گردابی، بیشتر بودن سرعت جریان در ترازهای بالاتر و انحراف بیشتر آن با برخورد به ستون است. Breuers et al. (1977) بیان کردند با توسعه چاله آبشستگی، اندازه و قدرت گردابه نعل اسبی افزایش می‌یابد.

در پژوهشی که توسط Alemi et al. (2019) با استفاده از داده‌های آزمایشگاهی Beheshti & Ataie-Ashtiani (2010) همانند این تحقیق ولی با در نظر گرفتن بستر

با فاصله گرفتن از خط مرکزی آبراهه (شکل ۸-د)، مؤلفه عمقی سرعت جریان که در لبه سرشمع به سمت سطح منحرف می‌شود بزرگتر می‌شود و در سطح جریان مؤلفه عمقی سرعت دارای مقادیرهای مثبت و منفی است که نشان دهنده بالازدگی جریان پیش از ستون و پس از آن برخورد جریان بالازده به ستون و انحراف به سمت کف است. با دور شدن از ستون این بالازدگی بیشتر شده و پایین‌افتادگی جریان نیز بوجود آمده است. مقایسه شکل‌های ۸-ا و ۸-د نشان می‌دهد بیشترین بالازدگی و پایین‌افتادگی در جهت عرضی در حد فاصل ستون و سرشمع رخ داده است.

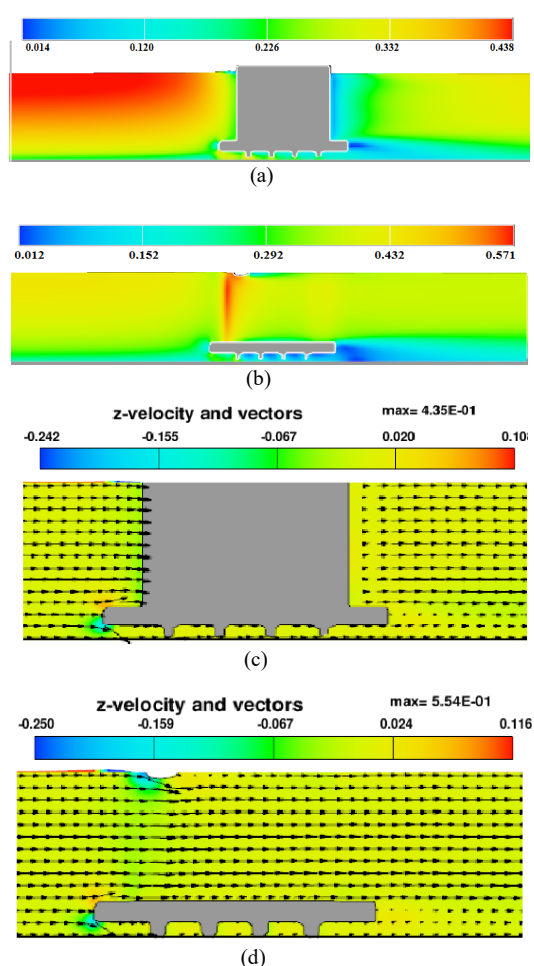


Fig. 8 Velocity magnitude contour at cross sections, a: $Y/D_{pc}=28.5\%$; b: $Y/D_{pc}=57\%$; Vertical velocity component contour and velocity vector in cross sections, c: $Y/D_{pc}=37\%$, d: $Y/D_{pc}=93\%$
 شکل ۸ منحنی‌های هم‌مقدار سرعت برآیند در مقطع‌های عرضی،
 a: $Y/D_{pc}=28.5\%$ ، b: $Y/D_{pc}=57\%$ ؛ منحنی هم‌مقدار مؤلفه عمقی و بردار سرعت در مقطع‌های عرضی، c: $Y/D_{pc}=37\%$ ، d: $Y/D_{pc}=93\%$

عنوان کرد. لذا به نظر می‌رسد تشکیل گردابه یادشده و دیده شدن آن در پایه‌های مرکب در شرایط حضور چاله آب‌شستگی مشهود باشد و از آنجائی‌که در این پژوهش بستر سفت و سخت است این گردابه مشاهده نشده است.

۳-۳- منحنی‌های هم‌مقدار سرعت در صفحه‌های x-z در فاصله‌های مختلف از خط مرکزی آبراهه

در شکل ۸-ا و b منحنی‌های هم‌مقدار سرعت برآیند در مقطع‌های مختلف عرضی نشان داده شده است. در این شکل Y: فاصله از خط مرکزی آبراهه و D_{pc} : نصف عرض سرشمع است. بررسی شکل ۸ نشان می‌دهد جریان پیش از پایه‌ها دارای سرعت زیاد است، در زیر سرشمع سرعت جریان کمتر از جریان سطحی است. پس از پایه‌ها و ستون ناحیه کم سرعتی از کف تا سطح مشاهده می‌شود که کمترین سرعت از تراز سرشمع به بالا تا نزدیک سطح آزاد رخ داده است (شکل ۸-ا). برابر شکل ۸-ب که ستون وجود ندارد بیشینه سرعت از جریان پیش از پایه‌ها به نزدیکی ستون منتقل شده است. این پدیده نشان دهنده انحراف عرضی سرعت با برخورد به ستون است و با نزدیک شدن به سطح آزاد این انحراف بیشتر شده است. بالازدگی جریان پیش از برخورد به ستون و پایین‌افتادگی جریان در گوشه بالادست ستون در شکل ۸-ب مشخص است. شکل ۸-ا و c- مؤلفه عمقی سرعت (z-velocity) و بردارهای سرعت نشان داده شده است. جریان پس از برخورد به لبه سرشمع به دو قسمت تقسیم می‌شود؛ بخشی به سمت کف و بخش دیگر به سمت سطح منحرف می‌شود. بیشترین سرعت عمقی در گوشه بالادست سرشمع رخ داده است. از سوی دیگر جریان برخورد کننده به ستون نیز به سمت کف منحرف می‌شود. لذا ناحیه گردابی کوچکی در محل اتصال سرشمع به ستون بوجود می‌آید. این ناحیه عامل استهلاک انرژی جریان پایین رونده‌ای است که در ادامه به پایه‌ها برخورد می‌کند. جریان با انرژی و سرعت کم به پایه‌ها برخورد می‌کند. بنابراین در مقایسه با پایه‌های بدون سرشمع و ستون انتظار می‌رود آب‌شستگی کمتری در پای پایه‌ها بوجود آید.

فاصله از ابتدای سرشمع، Z عمق آبراهه، Y عرض آبراهه و L_{pc} طول سرشمع است. جریان با برخورد به سرشمع در جهت عرضی منحرف می‌شود و در جهت عمقی نیز بخشی به سمت سطح آزاد و بخشی به سمت کف منحرف می‌شود. پس از پایه‌ها و در دنباله، جریان‌های عرضی در برخورد با جریان طولی، جریان گردابی پیرامون محور X بوجود می‌آورند. علت این جریان گردابی ناحیه کم‌فشار پس از پایه‌هاست که منجر به ایجاد گرادیان فشار و جریان ثانویه شده است. این جریان ثانویه به تدریج با پیشروی به سمت پایین دست گسترده‌تر شده و تبدیل به جریان ثانویه در کل مقطع شده است. این جریان گردابی در فاصله حدود 7 برابر طول سرشمع در پایین دست نیز مشاهده می‌شود.

۳-۵- بررسی تنش برشی روی کف

منحنی‌های هم‌مقدار تنش برشی بستر در شکل ۱۰ نشان داده شده است. برابر شکل ۱۰ بیشینه تنش برشی در کناره‌های پایه‌ها رخ داده است. وجود سرشمع عامل کاهش سرعت جریان برخوردکننده به پایه‌ها و لذا کاهش تنش‌های برشی نزدیک پایه‌هاست. از سوی دیگر جریان منحرف شده به سمت کناره‌ها منجر به افزایش تنش برشی در این ناحیه شده است که در حالت بستر متحرک می‌تواند نقش مهمی در آغاز و توسعه عمق آب‌سستگی در کناره‌ها داشته باشد. بررسی دقیق‌تر تنش برشی نشان می‌دهد تنش برشی پیرامون نخستین پایه بیشتر از دیگر پایه‌ها است، لذا انتظار می‌رود عمق آب‌سستگی پیرامون پایه اول بیشتر از دیگر پایه‌ها باشد. به همین ترتیب تنش برشی برای پایه دوم بیشتر از پایه سوم و برای پایه سوم بیشتر از پایه نهایی است. همان‌طوری که در بخش بررسی بردارهای سرعت اشاره شد، سرعت جریان برخوردی به پایه اول بیشتر از دیگر پایه‌هاست و به همین ترتیب جریان با سرعت کمتری به پایه‌های بعدی برخورد می‌کند. از سوی دیگر تنش برشی در حد فاصل پایه‌ها کمتر از تنش برشی در پیرامون هر پایه است. بیشترین تنش برشی پیرامون پایه اول در کناره‌های پایه رخ داده است و در پشت پایه کمترین تنش برشی وجود دارد. بنابراین

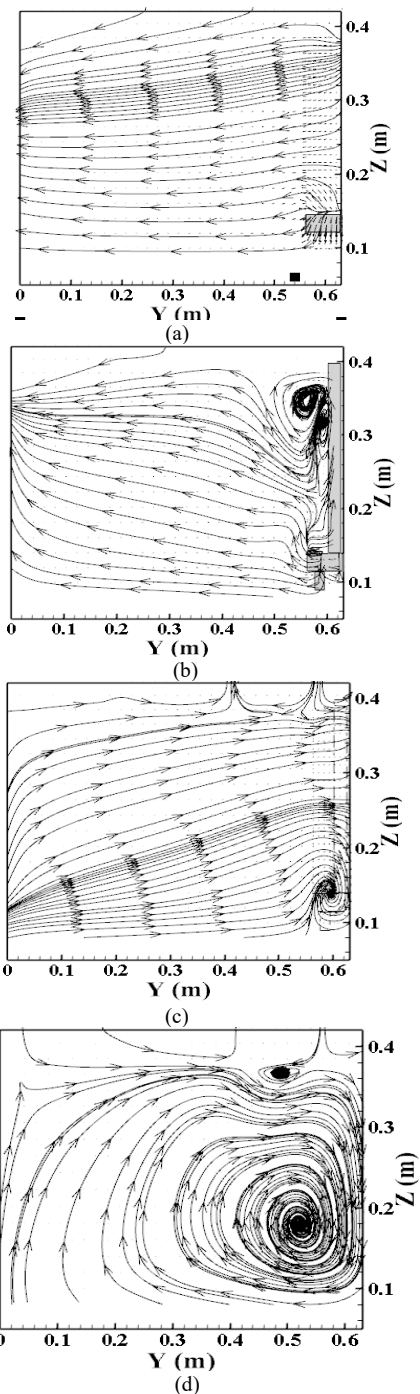


Fig. 9 Velocity vectors at y - z plane at different distance from the beginning of the pile cap, a: $X/L_{pc}=0$, b: $X/L_{pc}=0.6$, c: $X/L_{pc}=1.4$, d: $X/L_{pc}=7$

شکل ۹ بردارهای سرعت در صفحه y - z در فاصله‌های مختلف از ابتدای سرشمع، a: $X/L_{pc}=0$ (ابتدای سرشمع)، b: $X/L_{pc}=0.6$ (ردیف سوم پایه‌ها)، c: $X/L_{pc}=1.4$ (پس از سرشمع)، d: $X/L_{pc}=7$ (پایین دست سرشمع)

۳-۴- جریان ثانویه

در شکل ۹ بردارهای سرعت در مقطع‌های عرضی قبل و پس از پایه‌ها نشان داده شده است. در این شکل‌ها x

باشد، شدت آشفتگی کمتر و هرچه نوسان‌های سرعت بیشتر، شدت آشفتگی افزایش می‌یابد. در شکل ۱۲ منحنی‌های هم‌مقدار شدت آشفتگی در مقطع‌های مختلف عرضی و در فاصله‌های مختلف از ابتدای سرشمع نشان داده شده است. در این شکل x : فاصله طولی از ابتدای سرشمع، L_{pc} : طول سرشمع، Y : عرض آبراهه و z : ارتفاع آبراهه است. برابر شکل ۱۲- a شدت آشفتگی در نزدیکی کف و نیز در بالای سرشمع بیشتر از زیر سرشمع است. با برخورد جریان به ستون، شدت آشفتگی در کناره‌های ستون زیاد شده است.

مقایسه شکل‌های ۱۲- a و ۱۲- b نشان می‌دهد در شکل ۱۲- b برخورد جریان به پایه‌ها نیز منجر به آشفتگی زیادی در کناره‌های پایه‌ها و بیشتر شدن شدت آشفتگی در کناره‌های پایه‌ها نسبت به شکل الف شده است. در نزدیکی سطح آزاد بیشترین شدت آشفتگی در گوشه بالادست ستون رخ داده است و با پیشروی جریان به سمت پایین دست ستون، بیشینه شدت آشفتگی سطحی کاهش یافته است.

در گوشه پایین دست ستون که جریان باردیگر تغییر مسیر می‌دهد، شدت آشفتگی جریان زیاد شده است. به طور کلی هر جا که تغییر مسیری برای جریان رخ داده است، شدت آشفتگی نیز بیشتر شده است. تغییر مسیر جریان در راستای عرضی به معنی تغییر مؤلفه عرضی سرعت و لذا تغییر نوسان‌های عرضی سرعت است که منجر به افزایش شدت آشفتگی در راستای عرضی می‌شود. در جریان پیرامون پایه‌های پل، تغییر مسیر عرضی جریان در محل برخورد جریان به پایه‌ها، ستون و نیز سرشمع رخ داده است. همچنین تغییر مسیر جریان در راستای عمقی به معنی تغییر مؤلفه عمقی سرعت است که منجر به افزایش شدت آشفتگی می‌شود. بیشترین تغییر مسیر عمقی جریان در محل برخورد جریان به ستون و در انتهای ستون که جریان ستون را ترک می‌کند رخ داده است، لذا بیشترین شدت آشفتگی در آغاز و پایان ستون رخ داده است.

با توجه به اینکه به‌طور معمول در حالت بستر آبرفتی، بیشترین آشفتگی درون چاله آب‌شستگی پیرامون پایه‌ها

انتظار می‌رود آب‌شستگی پیرامون پایه اول از کناره‌های پایه آغاز شود.

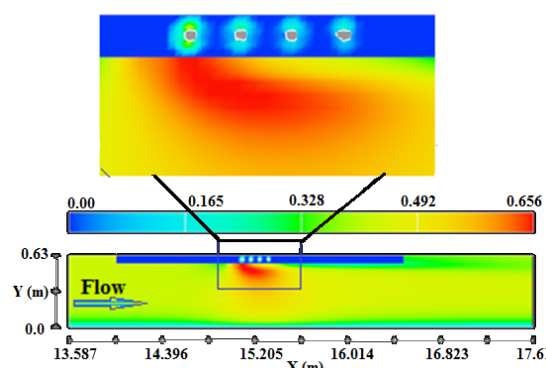


Fig. 10 Bed shear stress

شکل ۱۰ تنش برشی بستر

در شکل ۱۱ تغییرپذیری‌های تنش برشی و سرعت برآیند از ردیف اول تا ردیف چهارم پایه‌ها نشان داده شده است. برابر شکل ۱۱ هم تنش برشی و هم سرعت برآیند در ردیف نخست پایه‌ها بیشترین مقدار و در ردیف‌های بعدی به تدریج کمتر شده است. میزان کاهش تنش برشی ردیف‌های دوم، سوم و چهارم پایه‌ها نسبت به ردیف پیش از خود به ترتیب برابر ۴۲، ۳۶ و ۳۱ درصد و میزان کاهش سرعت برآیند به ترتیب ۱۷، ۱۰ و ۷/۵ درصد است. لذا پدیده حفاظتی ردیف‌های بالادست روی ردیف‌های پایین دست به‌طور کامل مشهود است.

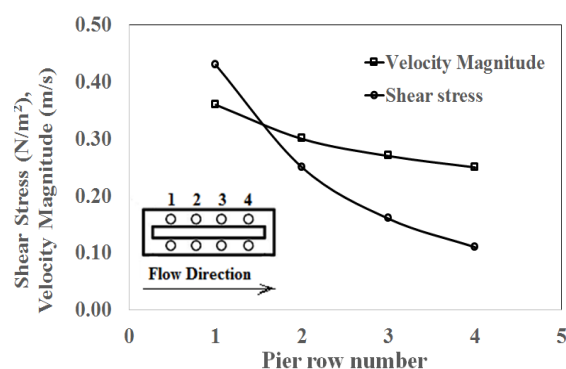


Fig. 11 Bed shear stress and the velocity changes from first to the end of the bridge pier rows

شکل ۱۱ تغییرپذیری‌های تنش برشی و سرعت برآیند از ردیف اول تا ردیف چهارم پایه‌ها

۳-۶- بررسی شدت آشفتگی

شدت آشفتگی، جذر مربع نوسان‌های سرعت تقسیم بر سرعت میانگین است. بنابراین هرچه مقدار سرعت بیشتر

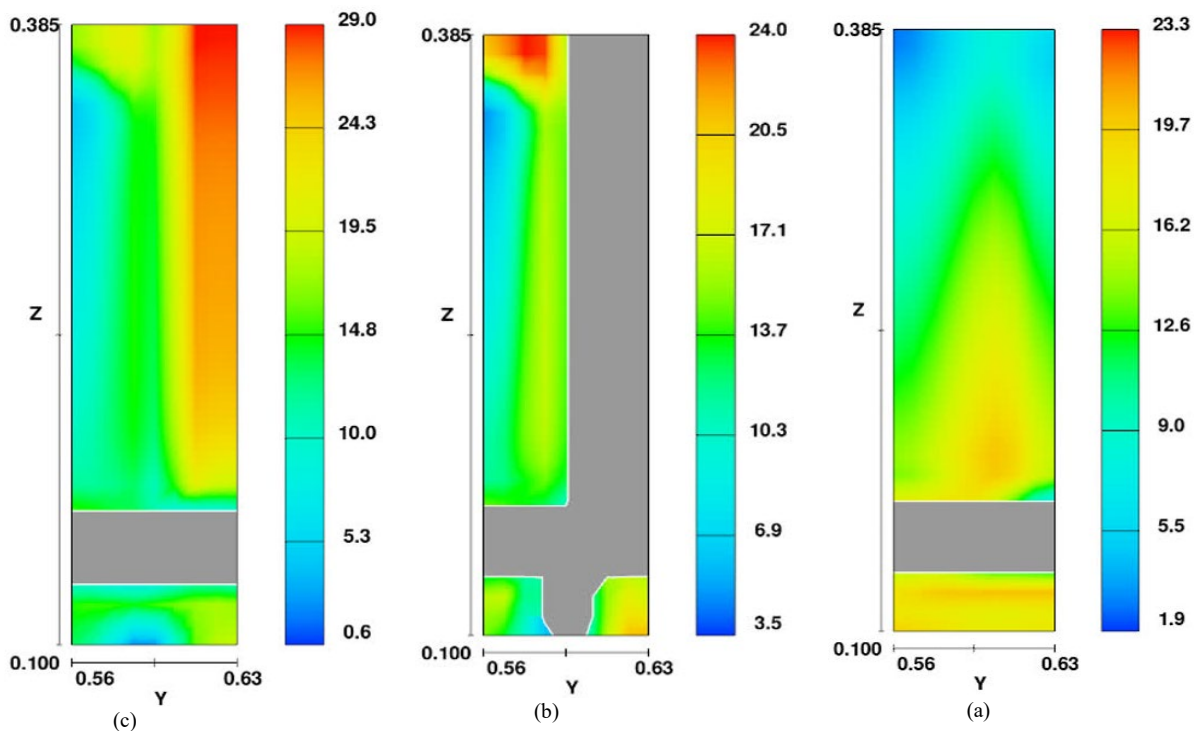


Fig. 12 Turbulence intensity contours at different cross sections. a: $X/L_{pc}=0$, b: $X/L_{pc}=0.78$, c: $X/L_{pc}=0.9$

شکل ۱۲ منحنی‌های هم‌مقدار شدت آشفتگی در مقطع‌های مختلف عرضی، a: $X/L_{pc}=0$ ، b: $X/L_{pc}=0.78$ ، c: $X/L_{pc}=0.9$

فاصله گرفتن از کف و افزایش سرعت جریان، این ناحیه گردابی بیشتر می‌شود. ناحیه کم‌سرعت پس از ستون نیز بوجود آمده است که در فاصله ۸۰ درصدی از کف بیشترین گستردگی را دارد.

- بیشترین سرعت جریان در گوشه بالادست وجه کناری سرشمع مشاهده شد که نشان دهنده مسدود شدن مسیر جریان توسط سرشمع و زیاد بودن سرعت جریان در فضای عرضی بین سرشمع و دیواره آبراهه است.
- پس از پایه‌ها و در دنباله، جریان‌های عرضی و جریان گردابی پیرامون محور طولی آبراهه بوجود آمده است که تا فاصله حدود ۷ برابر طول سرشمع در پایین دست نیز مشاهده می‌شود. جریان گردابی کوچکی در محل اتصال سرشمع به ستون بوجود می‌آید.
- بیشینه تنش برشی در کناره‌های پایه‌ها رخ داده است. تنش برشی پیرامون نخستین پایه بیشتر از دیگر پایه‌ها است تنش برشی در حد فاصل پایه‌ها کمتر از تنش برشی در پیرامون هر پایه است. لذا انتظار می‌رود عمق آب‌شستگی پیرامون پایه اول بیشتر از دیگر پایه‌ها باشد.

رخ می‌دهد، لذا انتظار می‌رود در آنجا نیز بیشترین شدت آشفتگی وجود داشته باشد، در حالی که در نتایج این پژوهش این پدیده مشاهده نشده است، تنها به مقدار کمی آشفتگی و شدت آن در جریان بین پایه‌ها دیده شده است. بنابراین در نتیجه نبود شبیه‌سازی در بستر آبرفتی، اثرگذاری متقابل جریان و آب‌شستگی دیده نشده است.

۴- نتیجه گیری

در این پژوهش به بررسی الگوی جریان پیرامون پایه‌های پل مرکب با استفاده از مدل عددی Flow3D پرداخته شده است. پس از صحت‌سنجی نتایج مدل عددی با نتایج آزمایشگاهی، سازوکار جریان پیرامون پایه‌های پل مرکب که شامل ۸ پایه پل و یک سرشمع و ستون است بررسی شد. نتایج مدل‌سازی نشان داد:

- برخورد جریان به پایه‌ها، سرشمع و ستون منجر به انحراف جریان به سمت عرضی می‌شود. ناحیه کم‌سرعت جریان در محدوده پایه‌های متوالی و ناحیه پرسرعت جریان در وجه کناری پایه‌ها بوجود می‌آید. پس از هر پایه ناحیه گردابی بوجود آمده است که با

۷- منابع

Alemi, M., Pêgo, J.P. & Maria, R. (2019). Numerical simulation of the turbulent flow around a complex bridge pier on the scoured bed. *European Journal of Mechanics / B Fluids*, 76, 316-331.

Amini, A., Mohd, T., Ghazali, H., Huat, B. & Aziz A. (2010). A local scour prediction method for pile cap in complex piers. *ICE-Water Management*, 164, 73-80.

Amini, A., Melville, B.W., Ali, T.M. & Ghazli, A. H. (2012). Clear-water local scour around pile groups in shallow-water flow. *Journal of Hydraulic Engineering*, 138(2), 177-185.

Amini-Baghdadorani, D., Ataie-Ashtiani, B., Beheshti, A., Hadjzaman, M. & Jamali, M. (2018). Prediction of current-induced local scour around complex piers: Review, revisit, and integration. *Coastal Engineering*, 133, 43-58.

Asadi, A., Amini, A., Eghbalzadeh, A. & Javan, M. (2016). Numerical Modeling of Flow Field around Bridge Pier with Compound Geometry. *Water and Soil Science*, 26(2-2), 1-12. (In Persian)

Ataie-Ashtiani, B. & Beheshti, A.A. (2006). Experimental investigation of clear-water local scour at pile groups. *Journal of Hydraulic Engineering*, 132(10), 1100-1104.

Beheshti, A.A. & Ataie-Ashtiani, B. (2010). Experimental Study of Three-Dimensional Flow Field around a Complex Bridge Pier. *Journal of engineering mechanics*, 136(2), 143-154.

Breusers, H.N.C., Nicollet, G. & Shen, H.W. (1977). Local Scour Around Cylindrical Piers. *Journal of Hydraulic Research*, 15, 211-252.

Ferraro, D., Tafarjnoruz, A., Gaudio, R. & Cardoso, A.H. (2013). Effects of pile cap thickness on maximum scour depth at a complex pier. *Journal of Hydraulic Engineering*, 139(5), 482-491.

Flow Science Inc. (2016). FLOW-3D V11.2, User's Manual. Santa Fe, New Mexico.

Ghods, H., Najafzadeh, M., Mohammad Javad Khanjani, M.J. & 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), [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)WW.1943-5460.0000645](https://doi.org/10.1061/(ASCE)WW.1943-5460.0000645).

Heydarpour, M., Afzali Mehr, H. & Khoda Rahmi,

- میزان کاهش تنش برشی ردیف‌های دوم، سوم و چهارم پایه‌ها نسبت به ردیف پیش از خود به ترتیب برابر ۴۲، ۳۶ و ۳۱ درصد و میزان کاهش سرعت برآیند به ترتیب ۱۷، ۱۰ و ۷/۵ درصد است.
- شبیه‌سازی با بستر سفت و سخت در این پژوهش منجر به تشکیل نشدن چاله آب‌شستگی و در نتیجه دیده نشدن گردابه نعل اسبی شده است. لذا به منظور تشکیل گردابه یادشده و دیده شدن آن در پایه‌های مرکب و پس از آن مقایسه با گروه پایه‌های بدون سرشمع، پیشنهاد می‌شود شبیه‌سازی با بستر متحرک انجام شود.
- بیشینه شدت آشفستگی در محل برخورد جریان به پایه‌ها، ستون و سرشمع و نیز در پایان ستون رخ داده است.

۵- فهرست نشانه‌ها

Bp	عرض پایه (cm)
Dc	عرض ستون (cm)
Dpc	عرض سرشمع (cm)
H	عمق کلی جریان (cm)
Lc	طول ستون (cm)
Lpc	طول سرشمع (cm)
p	فشار ($\text{kgm}^{-1}\text{s}^{-2}$)
T	ضخامت سرشمع (cm)
U	سرعت جریان ورودی (m/s)
Y	تراز سرشمع (cm)
ρ	چگالی (kgm^{-3})
μ	لزوجت پویایی ($\text{kgm}^{-1}\text{s}^{-1}$)
τ_{ij}	تنش رینولدز ($\text{kgm}^{-1}\text{s}^{-2}$)
U_T	لزجت گردابه ای (m^2s^{-1})
σ_T	ضریب کشش سطحی

۶- سپاسگزاری

مقاله حاضر بخشی از طرح پژوهشی است که با حمایت مالی دانشگاه خوارزمی انجام شده است. بدین وسیله نویسندگان مراتب سپاسگزاری خود را از معاونت پژوهشی دانشگاه خوارزمی اعلام می‌دارند.

- RostamAbadi, M. & Kazemi, S., (2022), Numerical study of the weir angle on the flow pattern and scour around the submerged weirs. *International Journal of Modern Physics C*, 33(8), 2250110, <https://doi.org/10.1142/S0129183122501108>.
- Sheppard, D.M., Yang, Y. & Melville, B. (2023). Method for Estimating Clear-Water Local Scour Rate at Complex Piers. *Journal of Hydraulic Engineering*, 149(10), <https://doi.org/10.1061/JHEND8.HYENG-13656>.
- Sicilian, J.M., Hirt, C.W. & Harper, R.P. (1987). FLOW-3D: Computational modeling power for scientists and engineers. Report FSI-87-00-1, Flow Science. Los Alamos. NM, US.
- Yang, Y., Li, J., Zou, W. & Chen, B. (2024). Numerical Investigation of Flow and Scour around Complex Bridge Piers in Wind-Wave-Current Conditions. *Journal of Marine Science and Engineering*, 12(1), 23, <https://doi.org/10.3390/jmse12010023>.
- Zhao, G. & Sheppard, D.M. (1998). The effect of flow skew angle on sediment scour near pile groups. Stream Stability and Scour at Highway Bridges, Compendium of papers ASCE Water Resource Engineering Conferences 1991-1998, Reston, Virginia: ASCE, 377-391.
- Z. (2007). Local scour protection of circular bridge pier groups using slot. *Journal of Agricultural Sciences and Natural Resources*, 14(3), 174-185. (In Persian)
- Khaledi, V., Amini, A. & Bahrami, J. (2020). Effect of pile cap's shape at scour hole dimensions at bridges with composite geometry. *Iranian Water Researches Journal*, 14(2), 101-109. (In Persian)
- Mohammadpour, R., Taghi Shahbazi, A., Sabzvari, T. & Karami Moghadam, M. (2021). Temporal variation of local scour at complex rectangular pier. *Irrigation and Drainage Structures Engineering Research*, 21(81), 25-46. (In Persian)
- Moreno, M., Maia, R., Couto, L. & António H. Cardoso. (2016). Subtraction Approach to Experimentally Assess the Contribution of the Complex Pier Components to the Local Scour Depth, *Journal of Hydraulic Engineering*, 143(4), [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)HY.1943-7900.0001270](https://doi.org/10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.0001270).
- Mousavi Jahromi, H. & Taghizadeh, K. (2006). The influence of the shape and number of bridge piers on erosion. Seventh International Seminar on River Engineering, Ahvaz, Shahid Chamran University. (In Persian)
- Nazariha, M. (1996). Design relationships for maximum local scour depth for bridge pier groups. PhD Dissertation, University of Ottawa.
- Omara, H. & Tawfik, A. (2018). Numerical study of local scour around bridge piers. IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science, 151, 012013. doi:10.1088/1755-1315/151/1/0.
- Pourghasemzadeh, B. & Ghomeshi, M. (2022). Experimental investigation of the angle effect of the cylindrical bridge group piers relative to the flow direction on the maximum scour depth of the piers. *Irrigation Sciences and Engineering*, 45(3), 131-145. (In Persian)

© 2025 The Author(s). Published by Iranian Hydraulic Association, Tehran, Iran. This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0>), which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

