

Experimental Evaluation of Performance of the New Design of Bed Protection Models (F-jacks) in Altering the Flow Pattern around Bridge Piers

Zahra Heravi¹, Mehdi Azhdary Moghaddam^{2*}, Kazem Esmaili³, Mohammad Givehchi⁴,
Abdolhamid Bahr Peyma⁵

1- Ph.D. Student, Water Engineering and Hydraulic Structures, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, University of Sistan and Baluchestan.

2- Professor, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, University of Sistan and Baluchestan.

3- Associate Professor, Department of Water Science and Engineering, Ferdowsi University of Mashhad

4- Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, University of Sistan and Baluchestan.

5- Associate Professor, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, University of Sistan and Baluchestan.

* mazhdary@eng.usb.ac.ir

Received: 30 April 2023
Accepted: 4 August 2023
Discussion: 21 June 2024



J. Hydraul.
Iranian Hydraulic Association
Homepage: www.jhyd.iha.ir

Abstract

Introduction: Numerous approaches have been thoroughly investigated by various researchers to mitigate scouring around bridge piers. These include the use of riprap, gabions, concrete blocks (CAU), collars, sacrificial piers, the creation of slots and roughness on the pier, and the installation of flow guide vanes. Key contributions in this field have been made by researchers such as Melville and Hadfield (1999), Chiew and Lim (2000), Chiew (2004), Tang et al. (2009), Shariati et al. (2010), Khodabakhshi and Farhadi (2016), Zolghadr et al. (2016), Karimaei Tabarestani and Zarrati (2019), and Valela et al. (2022). Their findings primarily focus on determining the size, location, and scope of installation and other geometric characteristics of the devices. Many countermeasures to prevent or reduce local scour around bridge piers, did not have the desired effective, and the concrete armor units (CAUs), which are made to protect shores from erosion caused by waves, have received very little attention in terms of bed armoring around the bridge piers.

The aim of the present research is to experimentally investigate the hydrodynamics of flow around a new element designed to protect the bed around bridge piers from local scour. The F-jacks, a type of concrete armor unit (CAU), are introduced in this study, marking the first time their impact on flow characteristics has been assessed. This concrete element is a new design of the A-jacks concrete model, with one leg and five branches on top, and the angle between the branches surrounding the leg and the central branch is 30 degrees to ensure minimum contact between the legs of the element and the sediment surface. The choice of a 30-degree angle the F-jacks' branches is due to its similarity to the diameter of the bridge pier, to provide complete coverage around the pier.

Methodology: The experiments of this research were performed in a 7-meter long, 50-centimeter wide, and 0.0001 slope flume with a rigid bed. A wooden cylinder with a diameter of $D = 45\text{mm}$ and the same height as the flume was used as a model for a bridge pier and installed at a distance of 4.5 m from the beginning of the flume (to develop the flow). The water depth (h) in the experiments was constant and equal to 15 cm, the flow rate (Q) was $0.021\text{ m}^3/\text{s}$, and the flow regime was fully turbulent and subcritical.

To understand the physics of flow in relation to three-dimensional velocity variations, a Nortek Acoustic Doppler velocimetry (ADV) with a frequency of 25 Hz and a sampling duration of 120 seconds was used. In order to evaluate the hydrodynamics of the flow around the protected pier with F-jacks units, three different placement patterns around the pier were considered: 1) a non-dense arrangement (P_1), in which 24 F-jacks elements were placed next to each other around the pier, 2) a dense arrangement (P_2), in which 22 F-jacks elements are interlocked around the pier, and 3) an SP arrangement.

To ensure the development of the flow in the test area, normalized mean velocity component profiles were shown to follow a similar trend for two 4 and 4.3 meter-long sections from the beginning of the flume, and the velocity data conforms to the logarithmic law of velocity distribution that confirms the validity of velocity data for developed flow conditions. Also, to verify the accuracy and sufficiency of measurements in the developed flow region under investigation, the power spectral density (PSD) of time series for all three velocity components shows that the slope of the power spectrum agrees well with the Kolmogorov - $5/3$ law in the inertial sub range.

Results and Discussion: Contour and vector plots of the time-average streamwise velocity component (\bar{u}) indicated that when the F-jacks elements were placed according to the P_2 pattern around the pier, the flow pattern around the pier changes completely. Where, in the upstream of the pier, the average velocity significantly decreased from the water surface to the bottom, indicating the growth of the minimum and weakening of the downflow and horseshoe vortices. In the downstream of the pier, the high-velocity flow region at rear the pier disappeared, and the flow turbulence was significantly reduced, and the region of flow recirculation in the wake of the pier completely disappeared.

The streamwise and vertical components of flow turbulence intensity (u_{rms}, w_{rms}) significantly decreased with the placement of F-jacks units around the pier according to the P_2 pattern. Where, in the near-bed region around the pier, the turbulence intensity decreased by an average of about 93% compared to the SP pattern, indicating the high ability of F-jacks elements in controlling and reducing flow fluctuations and turbulence in this region and diverting flow fluctuations towards the water surface and away from the bed.

Comparison of Reynolds shear stress on XY plane at $Z/h=0.47$ for the three mentioned patterns revealed that $-\rho\overline{u'w'}$ in the SP pattern is approximately 95% higher than P_1 and P_2 patterns, at the vicinity of the bridge pier. Furthermore, the magnitude of $-\rho\overline{u'w'}$ has significantly decreased with the placement of F-jacks units as the P_2 pattern around the pier.

Keywords: Flow hydrodynamics, ADV, Turbulent intensity, Reynolds shear stress.



© 2024 Iranian Hydraulic Association, Tehran, 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/>)

ارزیابی آزمایشگاهی عملکرد طرح جدید مدل‌های محافظ بستر (F-jacks) در پیرامون پایه پل بر اصلاح الگوی جریان

زهرا هروی^۱، مهدی اژدری مقدم^{۲*}، کاظم اسماعیلی^۳، محمد گیوه‌چی^۴، عبدالحمید بحرپیما^۵

۱- دانشجوی دکتری مهندسی آب و سازه‌های هیدرولیکی، گروه مهندسی عمران، دانشگاه سیستان و بلوچستان، زاهدان.

۲- استاد گروه مهندسی عمران، دانشگاه سیستان و بلوچستان، زاهدان.

۳- دانشیار گروه علوم و مهندسی آب، دانشگاه فردوسی مشهد

۴- استادیار گروه مهندسی عمران، دانشگاه سیستان و بلوچستان، زاهدان.

۵- دانشیار گروه مهندسی عمران، دانشگاه سیستان و بلوچستان، زاهدان.

* mazhdary@eng.usb.ac.ir

دریافت: ۱۴۰۲/۰۲/۱۰، پذیرش: ۱۴۰۲/۰۵/۱۳، نقد و بررسی: ۱۴۰۳/۰۴/۰۱، وب‌گاه نشریه هیدرولیک: www.jhyd.iha.ir

چکیده: آبشستگی پیرامون پایه‌های پل از جمله مهم‌ترین علت‌های ناپایداری و تخریب این سازه‌های مهم و راهبردی می‌باشد. از این‌رو ارائه روش‌های مناسب برای کاهش و مهار آبشستگی ضروری است. در این پژوهش، کاربرد سازه نوآورانه F-jacks در کاهش و مهار آبشستگی پیرامون پایه پل به صورت آزمایشگاهی ارزیابی شد. به این منظور، ویژگی‌های هیدرودینامیکی جریان در سه حالت، پایه انفرادی به عنوان شاهد (الگوی SP) و پایه با حضور واحدهای F-jacks پیرامون آن برابر دو الگوی P₁ و P₂، با استفاده از سرعت‌های لحظه‌ای سه‌بعدی اندازه‌گیری شده توسط ADV، بر بستر سخت بررسی و ارزیابی شد. توزیع مکانی الگوهای سرعت میانگین زمانی و شدت آشفستگی در مقطع‌های عمودی برای هر سه الگو نشان داد؛ با قرارگیری واحدهای F-jacks در پیرامون پایه، الگوی جریان در این ناحیه به طور کامل تغییر می‌کند. به طوری که با آرایش متراکم واحدها، همانند الگوی P₂ پیرامون پایه، مؤلفه طولی سرعت میانگین زمانی از سطح آب به سمت کف به طور قابل ملاحظه‌ای کاهش می‌یابد و جریانی قوی رو به بالا در پیرامون پایه در مقایسه با پایه تک (الگوی SP) مشهود است که در آرایش متراکم واحدها قوی‌تر می‌شود. این عامل به تأثیر مثبت وجود واحدهای محافظ در کاهش جریان رو به پایین^۱، کاهش آشوب‌های^۲ بستر و انتقال آشفستگی ناحیه wake به دور از بستر در پیرامون پایه اشاره دارد. در آرایش P₂، در مقایسه با پایه تک، بزرگی شدت آشفستگی به طور میانگین، حدود ۹۳ درصد کاهش یافته و نوسان‌های جریان به دور از بستر منحرف شد. تنش برشی رینولدز در مقابل پایه پل برای حالتی که واحدهای محافظ پیرامون پایه قرار گرفته‌اند، در مقایسه با الگوی SP حدود ۹۵ درصد کاهش یافته است.

کلیدواژه‌گان: هیدرودینامیک جریان، ADV، شدت آشفستگی، تنش برشی رینولدز.

۱- مقدمه

پدیده آبشستگی موضعی نامیده می‌شود (Bordbar et al., 2021). با توجه به این که آبشستگی موضعی پیرامون پایه‌ها، عامل اصلی تخریب بسیاری از پل‌هاست. از این‌رو مهار و کاهش آبشستگی پیرامون پایه پل گام بزرگی در پایداری این سازه مهم می‌باشد. اقدام‌های حفاظتی به دو گروه مقاوم‌سازی بستر و تغییر الگوی جریان تقسیم می‌شوند. هدف روش مقاوم‌سازی بستر کمینه کردن گودال آبشستگی پیرامون پایه با استفاده از مانع‌های

قرار گرفتن پایه‌های پل در رودخانه‌ها، باعث تغییر الگو و ایجاد آشفستگی قوی جریان در مجاورت پایه می‌شود. افزایش سرعت جریان و در پی آن افزایش تنش برشی بستر در نزدیکی پایه و همچنین فزونی گرفتن ظرفیت انتقال رسوب‌های موضعی در شرایط بستر حفاظت‌نشده منجر به تشکیل یک حفره در محل پایه‌ها می‌شود؛ که این

1 downflow
2 disturbance

می‌شود باید به این نکته توجه کرد که ایجاد شکاف باعث کاهش مقاومت پایه در برابر نیروهای وارده می‌شود. همچنین ممکن است شکاف‌های ایجاد شده روی بدنه پایه پل در نتیجه گذشت زمان به تدریج توسط رسوبها مسدود شوند. (Tang et al. (2009) سازوکار یک وسیله جدید تغییر الگوی جریان به نام Tetrahedron را به‌عنوان یک محافظ آبشستگی پایه پل بررسی کردند. آنان گزارش دادند که عمق آبشستگی تعادلی در صورت وجود قاب‌های Tetrahedron بسیار کمتر از حالت نبود محافظ در پیرامون پایه است. تأثیر آن در کاهش عمق آبشستگی موضعی بسیار بالاتر از پایه‌های قربانی‌شونده و یا دندان‌ها است. افزون بر این نشان دادند؛ با افزایش سرعت جریان، اثربخشی قاب‌های محافظ پیرامون پایه در کاهش عمق آبشستگی موضعی کاهش می‌یابد. همچنین کارایی قاب‌های Tetrahedron به تراکم قرارگیری آن‌ها پیرامون پایه بستگی دارد.

در صورت طراحی مناسب به منظور جلوگیری از شکست، اقدام‌های مقاوم‌سازی بستر در حالت مطلوب آبشستگی صفر را تضمین می‌کنند. در صورتی که ابزارهای تغییر الگوی جریان به‌طور معمول کاهش و عمق آبشستگی غیر صفر را نتیجه می‌دهند. بنابراین عملکرد اقدام‌های مقاوم‌سازی بستر نسبت به روش‌های اصلاح الگوی جریان مؤثرتر خواهد بود (Radice & Davari, 2014). اقدام‌های مقاوم‌سازی بستر مانند سنگ‌های ریپرپ، از روش‌های ابتدایی محافظت از پایه‌های پل در مقابل آبشستگی می‌باشد. با این وجود این روش موفقیت قطعی نداشته است (Tang et al. 2009). (Chiew & Chiew (1995) و Lim (2000) در نتایج بررسی‌شان نشان دادند که استفاده از لایه ریپرپ در پایه‌های پل در معرض شماری سازوکارهای شکست قرار دارد که منجر به ناپایداری سنگ‌ها و در نهایت فروپاشی کامل ابزار محافظ می‌شود. (Zarrati et al. (2010) به بررسی و ارزیابی آزمایشگاهی تأثیر ریپرپ و کاربرد توأم ریپرپ و طوق در مهار آبشستگی پیرامون پایه‌های پل پرداختند. نتایج آزمایش آنان نشان داد که استفاده از طوق، اندازه سنگ ریپرپ مورد استفاده و گستره لایه ریپرپ پیرامون پایه را کاهش

فیزیکی می‌باشد. در عمل، مانع‌ها اغلب در قالب استفاده از قطعه‌های بزرگ و سنگین می‌باشد. در اقدام‌های تغییر الگوی جریان، هدف، کاهش قدرت جریان رو به پایین و گرداب نعل‌اسبی به‌عنوان عامل اصلی آبشستگی موضعی و یا جابه‌جایی ناحیه فرسایش به محلی دور از پایه پل می‌باشد (Chiew & Lim, 2003; Fouli & Elsebaie, 2016; Zhang et al., 2021). در این ارتباط، تأثیر پایه‌های قربانی‌شونده، دندان‌ها، طوق‌ها، ایجاد شکاف در پایه توسط پژوهشگران بسیاری بررسی شده است. Melville & Hadfield (1999) پس از بررسی آزمایشگاهی استفاده از پایه‌های قربانی‌شونده به‌عنوان محافظ پایه پل از آبشستگی موضعی بیان کردند؛ به‌طور کلی پایه‌های قربانی‌شونده به‌عنوان یک محافظ آبشستگی توصیه نمی‌شود؛ مگر در حالتی که جریان در یک راستا باقی بماند و شدت جریان به نسبت کوچک باشد. (Kumar et al. (1999) به بررسی استفاده از طوق و ایجاد شکاف در پایه به منظور کاهش آبشستگی موضعی در پایه‌های پل پرداختند. آنان گزارش دادند که در حالتی که جریان نزدیک‌شونده به پایه در جهت شکاف پایه نیست؛ کارایی و اثربخشی شکاف دارای تردید است. برای استفاده از طوق در پایه نتیجه گرفتند که کارایی یک طوق در کاهش عمق آبشستگی موضعی پیرامون پایه به اندازه و محل آن روی پایه نسبت به بستر بستگی دارد. بنابراین در نصب طوق روی پایه پل در مقایسه با پایه بدون محافظ، عمق آبشستگی موضعی کاهش یافته ولی حفره آبشستگی به دو طرف پایه توسعه پیدا کرده است و کاربرد مؤثر طوق در کاهش عمق آبشستگی موضعی نیز منوط به ابعاد و محل اتصال آن روی پایه می‌باشد. (Khodabakhshi & Farhadi (2016) تأثیر ایجاد شکاف در پایه پل روی مقاومت آن در برابر بارهای وارده را آزمایش و بیان کردند که ایجاد شکاف در پایه می‌تواند عمق گودال آبشستگی را تا حدود ۲۰ درصد کاهش دهد؛ اما وجود شکاف سبب می‌شود؛ قدرت سازه پایه تحت بارهای وارده در مقایسه با پایه بدون شکاف تا حدود ۵۵ درصد کاهش یابد. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت: هنگامی که از ایجاد شکاف در سازه پایه به منظور کاهش عمق آبشستگی موضعی پیرامون آن استفاده

جریان بالا برای واحدهای A-jacks به وجود خواهد آمد؛ ناپایداری و پدیده شکست لبه است که راهکار عملی برای جلوگیری از تخریب لایه واحد، مهار کردن واحدها به یکدیگر می‌باشد (Mohamadpour & Shafaei (2017)). Çelikoğlu & Engin (2017) پایداری واحدهای بتنی Tetrapod را تحت تأثیر دو حالت مختلف قرارگیری بلوک‌ها روی موج‌شکن در شرایط موج‌های منظم و نامنظم آزمایش کردند. Safari et al. (2018) پایداری و عملکرد هیدرولیکی موج‌شکن پوشیده شده با یک قطعه بتنی جدید با نام Starbloc را تحت روگذری موج آزمایش کردند و نتایج، پایداری هیدرولیکی بالایی را برای واحدهای در هم قفل شده نشان می‌دهد. Park et al. (2019) قطعه بتنی جدید Chi Block را با هدف حفاظت شیب ساحل‌ها در برابر موج‌های بلند، آزمایش و معرفی کردند و دریافتند قطعه ساخته شده مقرون به صرفه است و پایداری بالایی در موج‌های بلند دارد. با توجه به مرور نتایج تحقیقات پیشین، هدف این پژوهش، بررسی هیدرودینامیک جریان پیرامون نظر و دید ساخت یک قطعه جدید برای مقاوم‌سازی بستر پیرامون پایه‌های پل به منظور حفاظت از آبشستگی موضعی به صورت آزمایشگاهی می‌باشد. F-jacks، یک بلوک مقاوم‌ساز بتنی (CAU) است و برای نخستین بار در این تحقیق معرفی و نقش آن بر ویژگی‌های جریان به طور آزمایشگاهی ارزیابی شده است. همواره توسعه یک CAU جدید شامل دو بخش (۱) توسعه شکل جدیدی برای قطعه بتنی و (۲) تایید عملکرد آن می‌باشد (Park et al., 2019). این قطعه بتنی طرحی جدید از مدل بتنی A-jacks است. آزمایش‌های آزمایشگاهی نیز به منظور تحلیل عملکرد قطعه در حفاظت از پایه پل در برابر آبشستگی، انجام گرفت.

۲- F-jacks

این واحد بتنی جدید، تغییر شکل یافته قطعه بتنی A-jacks است. انتخاب نام F-jacks برای قطعه به لحاظ همانندی شکل ظاهری آن با گل (Flower) می‌باشد. واحد شش‌پایه با نام تجاری A-jacks، متشکل از دو قطعه بتنی

می‌دهد. (Valela et al. (2022) برای بهبود حفاظت پایه‌های پل از آبشستگی، طرحی نو از قرارگیری لایه ریپرپ پیرامون پایه، همسطح با بستر و شامل فرورفتگی به منظور هدایت گرداب نعل‌اسبی را پیشنهاد دادند. آنان دریافتند که این طرح جدید افزون بر اینکه به‌طور قابل‌ملاحظه‌ای عمق و حجم گودال آبشستگی پیرامون پایه را کاهش می‌دهد؛ نسبت به پوشش ریپرپ معمولی، ۱۸ درصد مواد ریپرپ کمتری استفاده شده و تخریب شکل (شکست برشی) کمتری را نیز نشان می‌دهد.

Zolghadr & Shafaei (2016) و Zolghadr et al. (2016) Bejestan (2018) تأثیر رقوم کارگذاری و تراکم قرارگیری واحدهای بتنی شش‌پایه (A-jacks) را روی عمق آبشستگی پیرامون دو تکیه‌گاه مستطیلی و دوزنقه‌ای مورد آزمایش قرار داده و نتیجه گرفتند؛ قرارگیری این واحدها بسته به آرایش آن‌ها می‌تواند عمق آبشستگی در دماغه تکیه‌گاه را تا ۱۰۰ درصد کاهش دهد. Zilai & Shafaei (2017) تأثیر شمار واحدهای A-jacks در مهار آبشستگی پیرامون پایه پل مکعبی را در شرایط هیدرولیکی مختلف ارزیابی و گزارش کردند که با افزایش عدد فرود جریان، میزان اثربخشی واحدها در مهار آبشستگی کاهش می‌یابد که راهکار حل این مسئله، افزایش شمار قطعه‌ها در پیرامون پایه می‌باشد. (Najjaran et al. (2019) به منظور مهار فرسایش در قوس بیرونی رودخانه‌ها، از واحدهای شش‌پایه (A-jacks) به عنوان سازه آبشکن در یک قوس ۱۸۰ درجه در فاصله‌های نصب متفاوت از یکدیگر استفاده کردند و دریافتند؛ با افزایش فاصله آبشکن‌ها از یکدیگر، فرسایش در پنجه آن‌ها از نظر میزان و گستردگی افزایش قابل‌توجهی یافته و افزون بر اینکه برای سازه از نظر پایداری خطرناک می‌باشد؛ باعث تخریب ساحل بیرونی نیز می‌شود. Rashki Ghaleh Nou et al. (2020) به منظور مقاوم‌سازی بستر رسوبی پایین‌دست سرریز پرش اسکی در برابر آبشستگی، ترکیبی از واحدهای بتنی A-jacks و ریپرپ را استفاده کرده و نتیجه گرفتند؛ کاربرد این قطعه‌ها با اندازه مناسب سنگ ریپرپ، بیشترین عمق آبشستگی را در زیر لایه محافظ به‌طور قابل‌ملاحظه‌ای کاهش می‌دهد. مشکلی که در شدت

۳- مواد و روش‌ها

۳-۱- تجهیزات آزمایشگاهی

آزمایش‌ها در یک فلوم مجهز به سامانه گردش آب، دارای ابعادی به طول ۷ متر، عرض ۵۰ سانتی‌متر، ارتفاع ۶۰ سانتی‌متر و با شیب ۰/۰۰۰۱ و دیواره‌های شیشه‌ای با امکان رؤیت جریان در آزمایشگاه هیدرولیک مجموعه آزمایشگاه‌های گروه علوم و مهندسی آب دانشگاه فردوسی مشهد انجام شد. جریان در مدار بسته‌ای با بیشینه دبی پمپاژ ۴۰ لیتر بر ثانیه تأمین شد. از این‌رو به منظور آرام کردن جریان و جلوگیری از آشفتگی در جریان ورودی به کانال، جعبه‌های توری سنگی در مخزن ورودی قرار داده شد. برای تنظیم سطح آب از دریچه کشویی در انتهای کانال استفاده شد. تنظیم دبی جریان توسط دستگاه کنترل دور موتور پمپ (اینورتر) انجام و برای سنجش دبی از دبی‌سنج (فلومتر) الکترومغناطیسی استفاده شد. یک سرعت‌سنج صوتی سه‌بعدی (ADV) که روی یک پایه متحرک نصب شده، به منظور ثبت داده‌های سرعت لحظه‌ای جریان در حین آزمایش، روی سازه کانال قرار گرفته است. با توجه به معیار بیشینه عرض انسداد نباید از ۱۰ درصد عرض کانال تجاوز کند (Sahu et al., 2023)؛ به منظور جلوگیری از اثرگذاری‌های انسداد سیلندر و دیواره جانبی، یک استوانه از جنس چوب به قطر ۴۵ میلی‌متر برای مدل پایه پل ساخته شده است. آزمایش‌ها در بستر صاف و در فاصله ۴/۵ متری از ابتدای کانال (به منظور توسعه یافتگی جریان) انجام شده است.

به منظور حذف تأثیر جریان‌های ثانویه ناشی از دیواره‌های جانبی، باید کمترین نسبت عرض کانال به عمق جریان، برابر با ۲ باشد (Tachie et al., 2003; Yang et al., 2018)؛ از این‌رو نسبت یاد شده برابر با ۳/۳۳ در نظر گرفته شد. عمق آب در آزمایش‌ها ثابت و برابر با ۱۵ سانتی‌متر و رژیم جریان به کلی آشفتگی و زیر بحرانی است. در جدول ۱، ویژگی‌های پایه و پارامترهای جریان در آزمایش‌ها نشان داده شده است. شکل ۳ نمایی کلی از کانال و تجهیزات مربوط به آن را نمایش می‌دهد.

T شکل است که در وسط به هم متصل شده‌اند (Zolghadr et al., 2016). در شکل ۱، (a) بلوک مقاوم‌ساز بتنی A-jacks و (b) بلوک جدید F-jacks مشاهده می‌شود. واحد F-jacks، دارای ۱ پایه و ۵ شاخک در بالای آن است و تغییر زاویه شاخک‌های پیرامون پایه میانی از ۹۰ درجه در واحد A-jacks به ۳۰ درجه در F-jacks، تغییر یافته است که کمترین تماس پایه‌های قطعه با سطح رسوب‌ها وجود داشته باشد. انتخاب زاویه ۳۰ درجه برای شاخک‌های واحد F-jacks، به این دلیل صورت گرفته است که میزان بازشدگی شاخک‌ها برابر با قطر پایه پل موردنظر باشد تا پوشش کاملی در پیرامون پایه وجود داشته باشد. قرارگیری شاخک‌های واحد در بالای سطح بستر، می‌تواند انرژی جریان رو به پایین را به دور از بستر منتقل کند. واحدهای بتنی پیش‌ساخته مانند A-jacks، قابلیت اتصال به لایه بستر را ندارند؛ بنابراین به منظور حفظ پایداری بایستی در هم قفل و بست شوند. اما با توجه به قابلیت اتصال واحدهای F-jacks به لایه بستر و شکل سازه‌ای منحصر به فرد آن، این مسئله در قطعه F-jacks، بهبود یافته و می‌توان شمار کمتری از واحد محافظ را در پیرامون پایه به کار برد. مسئله‌هایی چون انجام چند لایه از قطعه به منظور حفاظت بستر در برابر فرسایش و پدیده شکست لبه که اتصال واحدهای A-jacks به یکدیگر را ملزم می‌کند؛ با به کارگیری قطعه F-jacks با هندسه‌ای جدید و منحصر به فرد، مرتفع شده است. شکل ۲، ابعاد قطعه بتنی F-jacks را در مقیاس $\frac{1}{12}$ نشان می‌دهد.

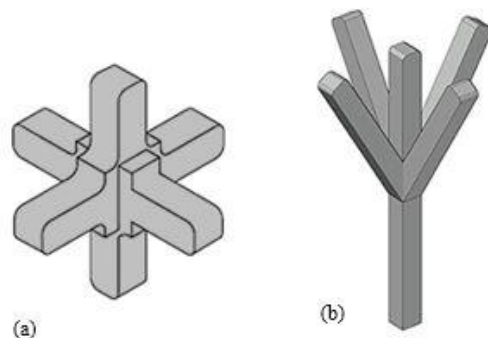


Fig. 1 3D view of (a) A-jacks concrete armor block and (b) new F-jacks block

شکل ۱ نمای سه‌بعدی از (a) بلوک مقاوم‌ساز بتنی A-jacks و (b) بلوک جدید F-jacks

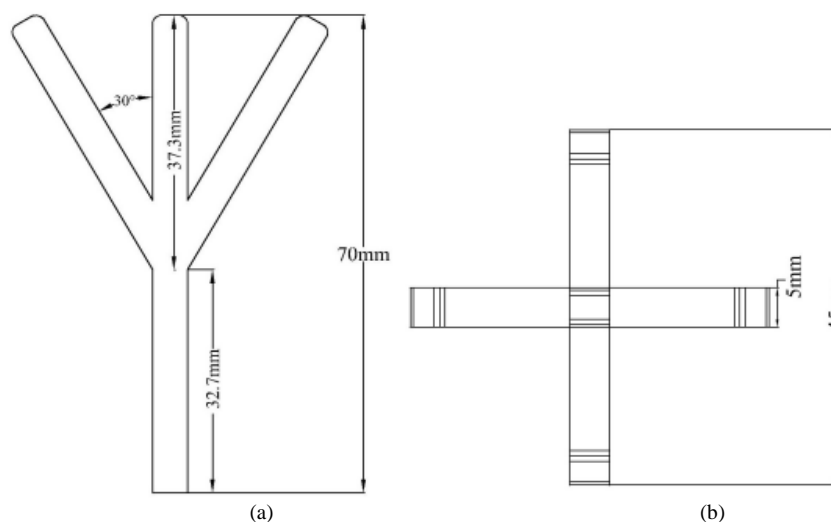


Fig. 2 (a) Front view of the F-jacks CAU with a scale of 1/12 and (b) top view of the F-jacks CAU with a scale of 1/12
 شکل ۲ (a) نمای مقابل قطعه بتنی F-jacks در مقیاس $\frac{1}{12}$ و (b) دید از بالا قطعه بتنی F-jacks با مقیاس $\frac{1}{12}$

است که پایه تک در محور مرکزی کانال قرار گرفته است. شکل ۴، نمای کلی قرارگیری واحدها پیرامون پایه را نشان می‌دهد.

۳-۳- اندازه‌گیری سرعت جریان

به منظور درک فیزیک جریان در ارتباط با تغییرهای سه‌بعدی سرعت از سرعت‌سنج داپلر صوتی Nortek (ADV) با فرکانس ۲۵ هرتز استفاده شد. مدت زمان ثبت داده‌های سرعت نقطه‌ای در هر موقعیت انتخابی (شکل ۵)، ۱۲۰ ثانیه با توجه به نتایج دیگر تحقیقات (Das & Mazumdar (2015); Kitsikoudis et al. (2017); Yang et al. (2018)) انتخاب شد. به منظور دستیابی به اطمینان از کفایت زمان نمونه‌برداری، آزمایشی مقدماتی بدون وجود مانع‌ها در کانال، برای دو نقطه نزدیک بستر و میانه جریان واقع در مرکز کانال و طول توسعه‌یافته با مدت نمونه‌برداری ۶۰۰ ثانیه انجام گرفت. نمودارها نشان داد؛ برای هر سه مؤلفه سرعت، نوسان‌های سرعت از زمان ۱۰۰ ثانیه به بعد تا حدودی ثابت می‌شوند. در ناحیه نزدیک به پایه با توجه به گرادپان بالای سرعت، شبکه نمونه‌برداری، متراکم و در ناحیه‌های دورتر از پایه، نامتراکم انتخاب شد. اندازه‌گیری‌ها در الگوی SP، در امتداد خط مرکزی کانال، در بازه عمودی $0.03 \leq \frac{z}{h} \leq 0.73$ (یا $0.11 \leq \frac{z}{D} \leq 2.44$) با فاصله‌های عمودی ۵ میلی‌متر ($\frac{D}{9}$) و در الگوهای P₁ و

جدول ۱ ویژگی‌های پارامترهای جریان در آزمایش‌ها

Table 1 Characteristics of flow parameters in experiments

D (mm)	h (cm)	U (m/s)	Q (m ³ /s)	Re	Fr
45	15	0.28	0.021	42000	0.23



Fig. 3 A view of the laboratory channel and ADV
 شکل ۳ نمایی از کانال آزمایشگاهی و ADV

۳-۲- مدل واحدهای F-jacks

پس از ترسیم مدل سه‌بعدی قطعه F-jacks در نرم‌افزار AutoCAD، مدل فیزیکی آن از جنس PLA ساخته شد. کف کانال از جنس ورق آهنی گالوانیزه (GI) بوده و اتصال واحدهای F-jacks به بستر با چسب فوری انجام شد. به منظور ارزیابی هیدرودینامیک جریان پیرامون پایه حفاظت‌شده با واحدهای F-jacks، سه الگوی قرارگیری مختلف پیرامون پایه شامل: (۱) آرایش نامتراکم (P₁)، شمار ۲۴ قطعه F-jacks در پیرامون پایه در کنار یکدیگر چیده شده‌اند، (۲) آرایش متراکم (P₂) تعداد ۲۲ قطعه F-jacks در پیرامون پایه، به صورت قفل و بست شده در هم، قرار داده شد. (۳) آرایش SP مربوط به حالتی

اندازه‌گیری روی مقطع‌های عمودی (XZ)، به منظور بررسی سرعت جریان میانگین عمقی و تنش برشی رینولدز در صفحه‌ای افقی، مجموعه‌ای از اندازه‌گیری‌های سرعت در صفحه افقی (XY)، برای هر سه الگو همانند شکل ۶، برداشت شد. شمار کل نقطه‌های برداشت داده ۳۴۷۴ نقطه می‌باشد.

P_2 در امتداد خط مرکزی و در بازه عمودی $0.47 \leq \frac{Z}{h} \leq 0.73$ (یا $1.56 \leq \frac{Z}{D} \leq 2.44$) با فاصله‌های عمودی ۵ میلی‌متر ($\frac{D}{9}$) در محل کارگذاری واحدهای F-jacks پیرامون پایه و در محل دورتر از واحدها، در بازه عمودی $0.03 \leq \frac{Z}{h} \leq 0.73$ (یا $0.11 \leq \frac{Z}{D} \leq 2.44$) صورت گرفته است. شکل ۵، شبکه اندازه‌گیری داده‌های سرعت لحظه‌ای را در مقطع‌های عمودی برای امتداد خط مرکزی کانال در الگوهای SP، P_1 و P_2 نشان می‌دهد. افزون بر شبکه

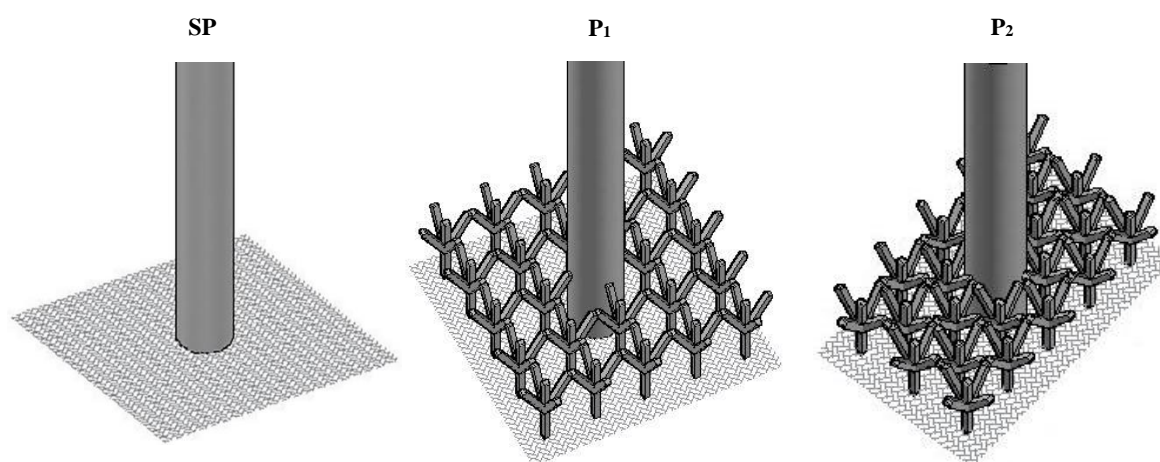


Fig. 4 The mode of the placement of F-jacks models around the pier

شکل ۴ چگونگی قرارگیری مدل‌های F-jacks حول پایه

متری از ابتدای کانال با سطح بستر صاف اندازه‌گیری شد. پس از حذف آلیاژینگ از اندازه‌گیری‌ها، روندنمای مؤلفه‌های سرعت میانگین نرمال‌شده، قانون لگاریتمی برای سرعت طولی جریان، شدت‌های آشفتگی مربوط به مؤلفه‌های طولی و عمودی سرعت و تنش برشی رینولدز در صفحه XZ در شکل ۷(a)-(d) ترسیم شد که روند همانندی را با نتایج Chatterjee و Nezu & Rodi, (1986) et al. (2021) نشان می‌دهد و بنابراین اعتبار داده‌های سرعت را برای شرایط جریان توسعه یافته تأیید می‌کند. در شکل ۷(a)، مؤلفه‌های سرعت میانگین با سرعت برشی (u_*) به دست آمده از قانون لگاریتمی (رابطه ۲) نرمال شده و بر حسب Z/h ترسیم شده است. قانون لگاریتمی برای روندنمای سرعت به صورت معادله (۲) داده شده است (Nezu & Rodi, 1986; Sahu et al., 2023):

۳-۴- استخراج داده‌ها

در جریان آشفته، مؤلفه‌های سرعت لحظه‌ای (u, v, w) در سیستم مختصات دکارتی (X, Y, Z) بر مبنای تجزیه رینولدز به صورت زیر به دست می‌آید (Sahu et al., 2023):

$$u = \bar{u} + u', \quad v = \bar{v} + v', \quad w = \bar{w} + w' \quad (1)$$

که در آن \bar{u} ، \bar{v} ، \bar{w} میانگین زمانی مؤلفه‌های سرعت و u' ، v' ، w' نوسان‌های سرعت می‌باشند. $u'_{rms} = \sqrt{u'^2}$ شدت آشفتگی طولی جریان و w'_{rms} به ترتیب شدت آشفتگی عرضی و عمودی جریان می‌باشند (Kitsikoudis et al., 2017).

به منظور اطمینان از توسعه یافتگی جریان در محدوده آزمایش‌ها، در آغاز داده‌های سرعت لحظه‌ای جریان با استفاده از ADV، در امتداد خط مرکزی و فاصله ۴ و ۴/۳

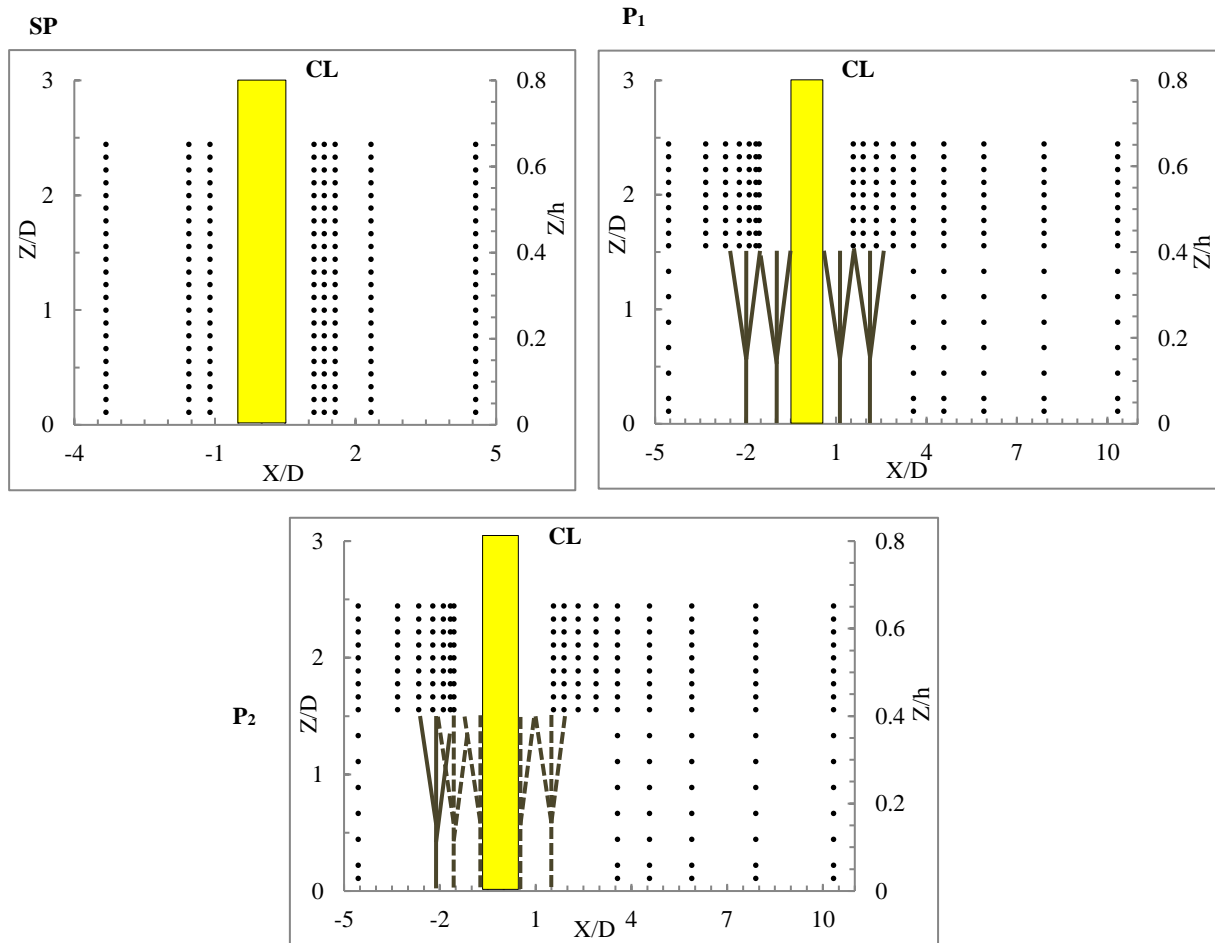


Fig. 5 The measurement grid of instantaneous velocity data by ADV in the vertical sections along the flume centerline (CL) for selected patterns

شکل ۵ شبکه اندازه‌گیری داده‌های سرعت لحظه‌ای توسط ADV در مقطع‌های عمودی در امتداد خط مرکزی کانال (CL) برای الگوهای انتخابی

که در آن $D_{u,w}$ و $C_{u,w}$ ضریب‌های بی‌بعد تعیین شده از داده‌های مشاهده‌ای I_u و I_w می‌باشند که به صورت زیر به دست آمده‌اند.

$$D_u = 29.29 \text{ and } C_u = 4.307$$

$$D_w = 60.708 \text{ and } C_w = 12.02$$

در شکل $\gamma(c)$ ، I_u و I_w مؤلفه‌های شدت آشفتگی نرمال شده در راستای طولی و عمودی هستند که به ترتیب از تقسیم u_{rms} و w_{rms} بر سرعت برشی u_* به دست آمده است. خطوط برازش شده، ارتباط مناسب به داده‌های شدت را نشان می‌دهند و توافق خوبی با یافته‌های Nezu & Nakagawa (1993) و Nezu & Rodi (1986) دارند. شکل $\gamma(d)$ ، نمودار تنش برشی

است (Nezu & Rodi, 1986; Sahu et al., 2023):

$$\frac{\bar{u}}{u_*} = \frac{1}{k} \ln\left(\frac{z}{z_0}\right) \quad (2)$$

سرعت برشی (u_*) از قانون لگاریتمی (معادله ۲)، 0.288 متر بر ثانیه به دست آمد. k ، ثابت ون کارمن (Von Karman) با مقدار 0.41 می‌باشد. با توجه به اینکه جریان، هیدرولیکی صاف است؛ بنابراین ارتفاع سرعت صفر $z_0 = 0.4 \times 10^{-4} \text{ m}$ خواهد بود. برابر شکل $\gamma(b)$ ، سرعت میانگین طولی با ضریب همبستگی $R^2 = 0.998$ از قانون لگاریتمی پیروی می‌کند. Nezu & Rodi (1986) رابطه شبه‌تحلیلی زیر را برای شدت‌های آشفتگی نرمال شده ($I_{u,w}$) ارائه کرده‌اند (Chatterjee et al., 2021):

$$I_{u,w} = D_{u,w} \exp\left(-C_{u,w} \frac{z}{h}\right) \quad (3)$$

فرکانس رسم شد که نشان می‌دهد؛ شیب طیف توان در زیر محدوده اینرسی به درستی با قانون $5/3$ - کولموگروف همخوانی دارد. در شکل ۸، روندنمای سرعت میانگین طولی نرمال شده جریان $(\frac{u}{u_*})$ بر حسب Z/h برای دو مقطع طولی ۴ و $4/3$ متری از ابتدای کانال، روند همانندی را نشان داده و شرایط جریان یکنواخت را تأیید می‌کند. بنابراین منطقه جریان توسعه یافته در فاصله ۴ متری از ورودی شناسایی شد و با توجه به کارگذاری واحدهای F-jacks در پیرامون پایه، مرکز پایه پل در نقطه $4/5$ متری از ابتدای کانال قرار داده شد.

رینولدز نرمال شده در پلان XZ $(\tau_{uw} = -\frac{\overline{u'w'}}{u_*^2})$ را بر حسب فاصله عمودی Z/h نشان می‌دهد. نمودار نشان می‌دهد تنش برشی از بستر به سمت سطح آب دارای روند خطی است. بیشینه میزان تنش برشی نرمال شده در نزدیک بستر رخ می‌دهد و پس از آن به سمت سطح آب کاهش می‌یابد. این نتیجه به کلی با یافته Chatterjee et al. (2021) همخوانی دارد. افزون بر این، به منظور تأیید دقت و کفایت اندازه‌گیری‌ها در ناحیه مورد بررسی توسعه یافتگی جریان، برابر شکل $\gamma(e)$ ، چگالی طیفی توان (PSD) سری‌های زمانی هر سه مؤلفه سرعت بر حسب

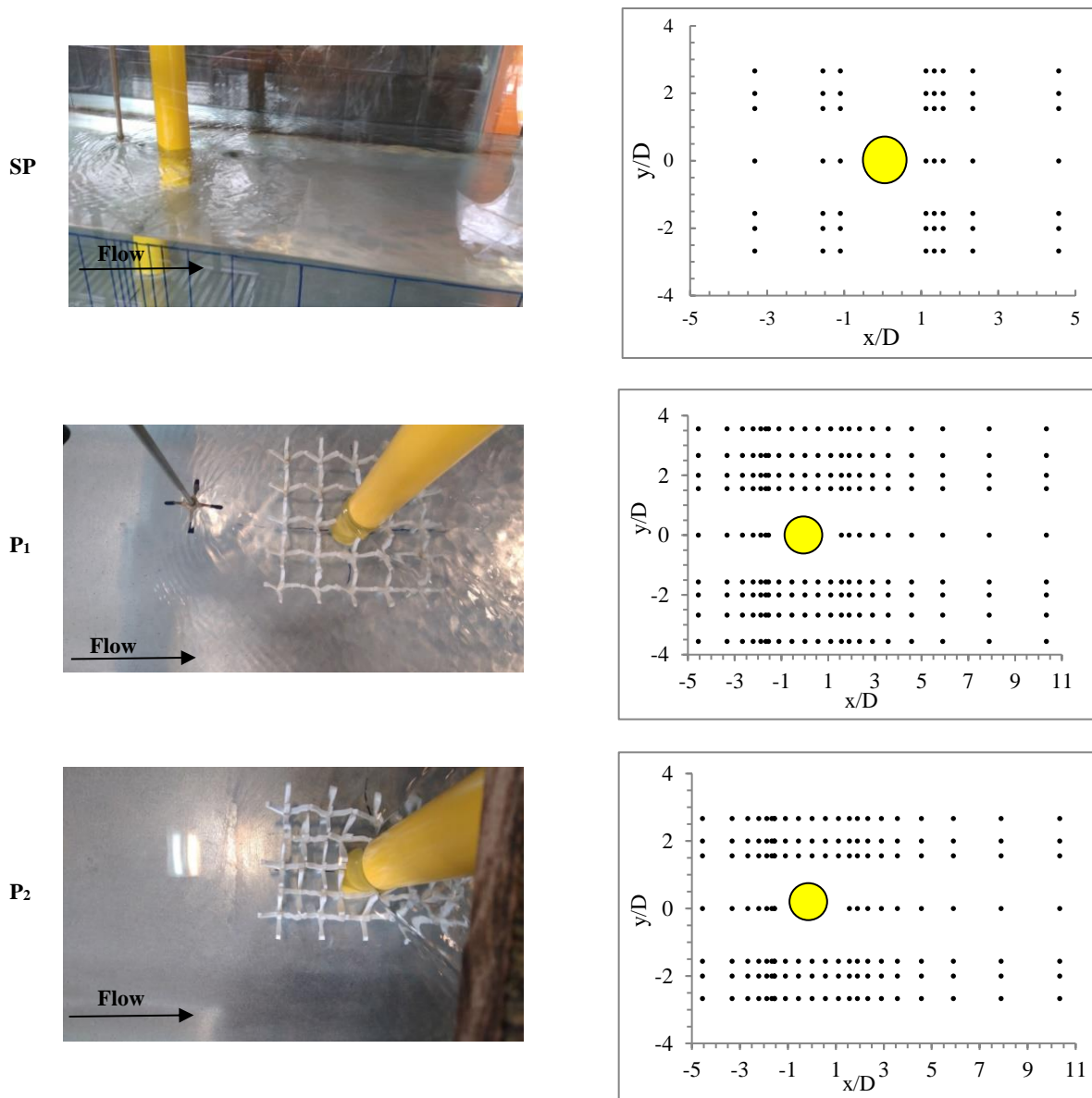


Fig. 6 The measurement grid of instantaneous velocity data by ADV in the horizontal plane at $Z/h=0.6$ for selected patterns
 شکل ۶ شبکه اندازه‌گیری داده‌های سرعت لحظه‌ای توسط ADV در پلان افقی در $Z/h = 0.6$ برای الگوهای انتخابی

۴- نتایج و بحث

۴-۱- توزیع مکانی سرعت میانگین جریان

به منظور بررسی تأثیر قرارگیری واحدهای F-jacks در پیرامون پایه بر هیدرودینامیک جریان، داده‌های سرعت اندازه‌گیری شده در مقطع‌های مختلف طولی از بالادست تا پایین‌دست پایه برای هر سه الگوی SP، P₁ و P₂ تجزیه و تحلیل شد. شکل ۹، کانتورهای سرعت میانگین طولی جریان (\bar{u}) در امتداد خط مرکزی کانال بر حسب عمق (Z)، را برای هر سه الگو نشان می‌دهد. در شکل ۱۰، میدان جریان میانگین زمانی با ترسیم بردارهای سرعت در صفحه XZ، نشان داده شد. در شکل (SP) ۱۰ و ۹، که پایه بدون محافظ درون کانال قرار گرفته است؛ با توجه به کانتورهای سرعت، یک الگوی کاهش از سرعت جریان نزدیک‌شونده به پایه به دلیل ایجاد گرادیان فشار در مقابل پایه مشاهده می‌شود. سرعت طولی جریان در بالادست در منطقه نزدیک پایه بسیار بزرگ بوده و مقابل پایه به سمت بستر امتداد می‌یابد که نشان می‌دهد؛ جریان به پایه برخورد کرده و سپس به سمت کف متمایل می‌شود. در پشت پایه، در ناحیه نزدیک بستر ($0 \leq Z \leq 30$) میلی‌متر، برگشت بردارهای سرعت به سوی پایه نشان‌دهنده جریان چرخشی قابل توجه در پشت پایه و گردابه‌های برخاستگی در نتیجه جداسازی جریان می‌باشد. همچنین یک ناحیه سرعت پایین در نزدیک سطح آب در $90 \leq Z \leq 110$ میلی‌متر مشاهده شد. هنگامی که واحدهای F-jacks در پیرامون پایه قرار گرفته‌اند (الگوی P₁ و P₂ از شکل ۹ و ۱۰)؛ الگوی جریان در بالادست پایه به طور کامل تغییر یافته است. به طوری که در مقابل پایه، سرعت میانگین از سطح آب به سمت کف با توجه به گرادیان فشار استاتیک کاهش یافته که اشاره به رشد کمینه گردابه نعل‌اسبی دارد. در الگوی P₁ که واحدهای F-jacks به صورت کنار هم (نامتراکم) در پیرامون پایه قرار گرفته‌اند؛ در بالادست پایه، در منطقه قرارگیری واحدها ($-22.5 \leq X \leq -112.5$) میلی‌متر، از سرعت جریان طولی در برخورد با واحدهای F-jacks کاسته شده و جریان به سمت بالادست کانال و بردارهای سرعت به دور از پایه متمایل شده‌اند. در ناحیه بالای واحدها

($70 \leq Z \leq 110$) سرعت جریان نزدیک‌شونده در مقابل پایه کاهش یافته و بردارهای سرعت نیز به سمت سطح آب متمایل شده است. در پشت پایه و در ناحیه قرارگیری واحدها ($22.5 \leq X \leq 112.5$) و ($0 \leq Z \leq 70$)، یک منطقه جریان با سرعت‌های منفی بزرگ متمایل به سمت پایه شکل گرفته که نشان می‌دهد نسبت به یک پایه بدون محافظ (SP)، در این ناحیه شرایط بحرانی‌تر شده و به دنبال آن، گردابه‌های بزرگ‌تری نیز شکل می‌گیرد. کارگذاری واحدها در پیرامون پایه به صورت متراکم، برابر الگوی P₂ از شکل ۹ و ۱۰، نشان می‌دهد که در بالادست پایه، در فاصله تقریباً برابر با $\frac{4}{5}D$ از پایه ($-225 \leq X \leq -22.5$) و ($0 \leq Z \leq 65$)، سرعت جریان طولی بسیار کاهش یافته و جریان پس از برخورد به واحدها به دور از پایه و به سمت بالادست واحدها متمایل شده است. در پایین‌دست پل، در منطقه قرارگیری واحدها و در فاصله افقی و عمودی برابر با ($22.5 \leq X \leq 450$) و ($0 \leq Z \leq 70$)، از سرعت جریان بسیار کاسته شده و بردارهای سرعت طولی همواره به سمت پایین‌دست کانال و هم‌جهت با جریان می‌باشند و جریان برگشتی در ناحیه پشت پایه دیده نمی‌شود. لذا استنباط می‌شود؛ هنگامی که واحدها بر مبنای الگوی P₂ در پیرامون پایه قرار گرفته‌اند؛ عملکرد بسیار مطلوب‌تری نسبت به الگوی P₁ دارد. مقایسه الگوی P₂ با پایه تک (SP) نشان می‌دهد که در پیرامون پایه با توجه به تغییر الگوی جریان توسط واحدها، در بالادست پایه، کاهش سرعت جریان و در نتیجه کاهش قدرت جریان رو به پایین (Downflow) و گردابه‌های نعل‌اسبی و در پایین‌دست پایه، برگشت نشدن جریان به سمت پایه و بنابراین کاهش قدرت گردابه‌های برخاستگی و چرخشی را به دنبال خواهد داشت. در شکل ۱۱، کانتورهای سرعت طولی میانگین عمقی جریان (u_d) پیرامون پایه در صفحه افقی XY برای سه الگوی SP، P₁ و P₂ ارائه شده است. برابر شکل (SP) ۱۱، هنگامی که پایه بدون محافظ درون کانال قرار گرفته است؛ با توجه به انقباض ناحیه جریان در دو طرف پایه، سرعت طولی جریان در این ناحیه افزایش یافته است. در ناحیه مجاور پشت پایه، سرعت‌های طولی منفی اشاره به جریان

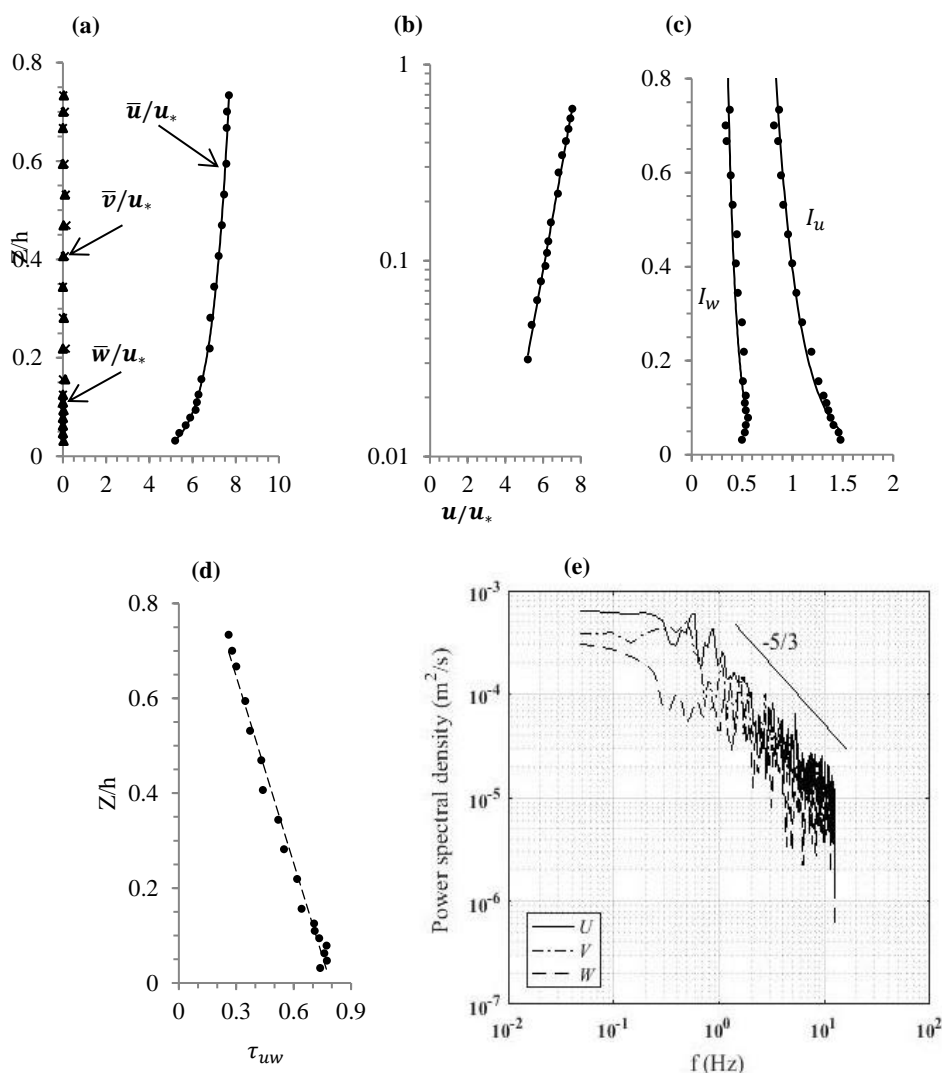


Fig. 7 Normalized profiles of (a) streamwise, lateral and vertical velocity, (b) the log-law fit of streamwise Profile, (c) turbulence intensities due to streamwise and vertical component, (d) RSS along u-w plane, and (e) power spectral density for streamwise, lateral, and vertical velocity components

شکل ۷ روندنمای نرمال شده (a) سرعت طولی، عرضی و عمودی جریان، (b) تناسب قانون لگاریتمی برای سرعت طولی، (c) شدت آشفتگی ناشی از مؤلفه طولی و عمودی سرعت جریان، (d) تنش برشی رینولدز در امتداد صفحه uw و (e) چگالی طیفی توان برای مؤلفه‌های طولی، جانبی و عمودی سرعت

در منطقه پایین‌دست پایه، ناحیه Wake تا فاصله طولی به تقریب برابر با $1/8^2 D$ از پایه به سمت پایین‌دست گسترش یافته است. همچنین سرعت‌های منفی بزرگ‌تر در منطقه Wake نشان‌دهنده تقویت جریان برگشتی، رشد گردابه‌های برخاستگی و شرایط بحرانی‌تر در پشت پایه می‌باشد. همان‌طور که در شکل ۱۱ (P₂) مشاهده می‌شود؛ هنگامی که واحدها به صورت متراکم پیرامون پایه قرار گرفته‌اند؛ نتیجه مطلوبی در میدان جریان پیرامون پایه دیده می‌شود. به طوری که در ناحیه مقابل و دو طرف پایه، به دلیل برخورد جریان به واحدها و نبودن ناحیه چرخشی

برگشتی و ناحیه Wake در منطقه یاد شده دارد. از آنجا که ناحیه جریان چرخشی در پشت پایه، در انتقال جریان به سمت پایین‌دست مشارکتی ندارد؛ بنابراین جریان در ناحیه‌های مجاور Wake به انتقال بیشتر سیال تمایل داشته و در پی آن، سرعت در این ناحیه‌ها افزایش یافته و انتقال رسوبها از پیرامون پایه به سمت پایین‌دست هدایت می‌شود. در الگوی P₁ از شکل ۱۱ در مقایسه با الگوی SP، در ناحیه بالادست پایه، با توجه به قرارگیری واحدها پیرامون پایه، از سرعت طولی جریان به دلیل برخورد با واحدهای F-jacks بسیار کاسته شده است. اما

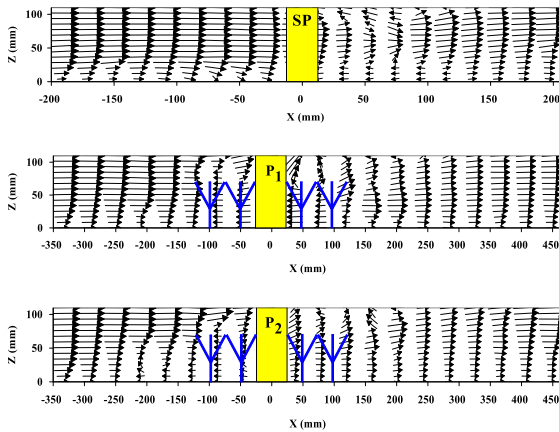


Fig. 10 Velocity vectors in the longitudinal sections to depth for three selected patterns

شکل ۱۰ بردارهای سرعت در مقطع‌های طولی بر حسب عمق برای سه الگوی انتخابی

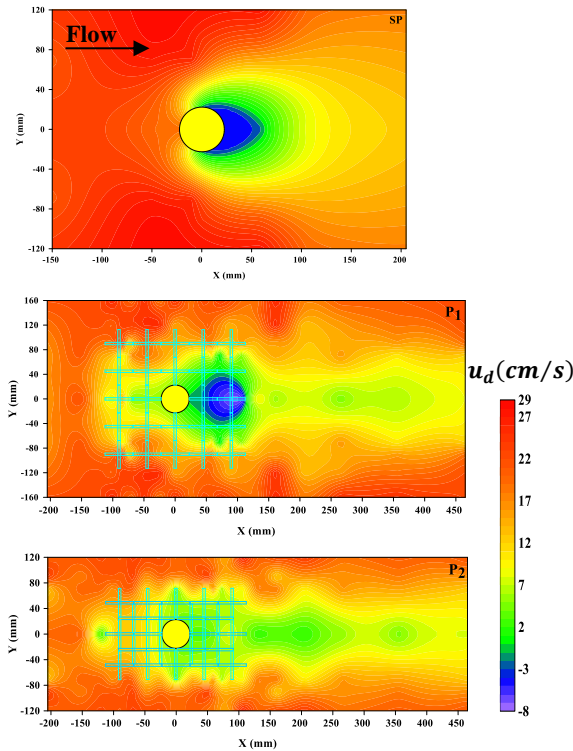


Fig. 11 Depth average flow velocity contours in the XY plane for three selected patterns

شکل ۱۱ کانتورهای سرعت جریان میانگین عمقی در صفحه XY برای سه الگوی انتخابی

شکل ۱۲، کانتور پلات سرعت میانگین عمودی جریان (\bar{w}) را در امتداد خط مرکزی کانال بر حسب عمق (Z)، برای الگوهای یاد شده نشان می‌دهد. الگوی SP در شکل ۱۲، نشان می‌دهد هنگامی که پایه بدون محافظ در مسیر جریان قرار گیرد؛ در بالادست و در منطقه نزدیک پایه،

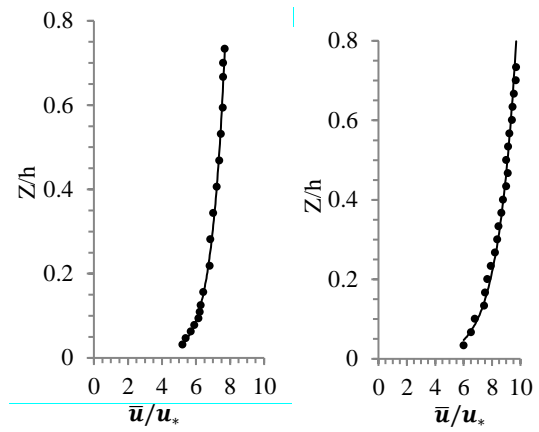


Fig. 8 Normalized streamwise average velocity profile along the centerline of the flume (a) 4-meter-long section from the flume inlet, (b) 4.3-meter-long section from the flume inlet

شکل ۸ روندنمای سرعت میانگین طولی نرمال شده در امتداد خط مرکزی کانال (a) مقطع طولی ۴ متری از ورودی کانال، (b) مقطع طولی ۴/۳ متری از ورودی کانال

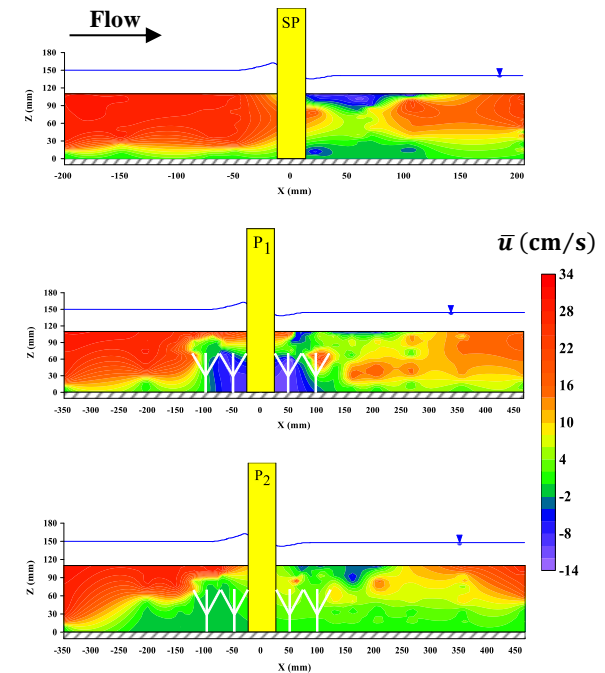


Fig. 9 Streamwise velocity contours in the longitudinal sections to depth and along the centerline of the flume, for three selected patterns

شکل ۹ کانتورهای سرعت طولی در مقطع‌های طولی بر حسب عمق و امتداد خط مرکزی کانال، برای سه الگوی انتخابی

در پشت پایه، سرعت جریان در مقایسه با دو الگوی دیگر بسیار کاهش یافته است. در ناحیه پشت پایه نیز، هیچ‌گونه سرعت‌های منفی و ناحیه Wake در نزدیک پایه مشاهده نمی‌شود که اشاره به تأثیر مثبت واحدها در الگوی متراکم در کاهش قدرت و رشد گردابه‌های پیرامون پایه دارد.

دیده نمی‌شود. در ناحیه بالای واحدها ($70 \leq Z \leq 110$) و طول تا حدودی برابر با $2D$ از پایه، $(22.5 \leq X \leq 110)$ ، سرعت عمودی جریان دارای اندازه مثبت قابل ملاحظه‌ای می‌باشد و تنها ردی بسیار جزئی از اندازه منفی بسیار کوچک برای سرعت عمودی در منطقه دور از پایه و واحدها و در نزدیک سطح آب دیده می‌شود. بنابراین عامل دیگری که در کاهش آشوب بستر در الگوی P_2 مؤثر است؛ سرعت عمودی میانگین زمانی (\bar{w}) رو به سمت بالا است که انتظار می‌رود این مؤلفه سرعت، آشفتگی ناحیه Wake را به دور از بستر منحرف کند.

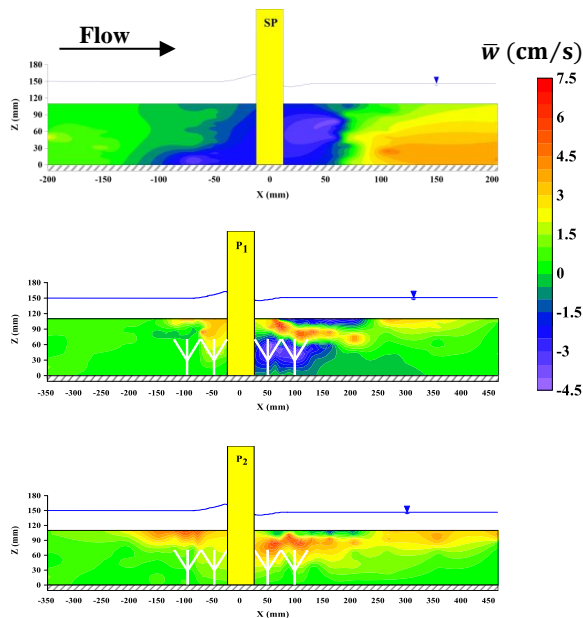


Fig. 12 Vertical velocity contour in the longitudinal sections to depth and along the centerline of the flume, for SP, P₁ and P₂ patterns

شکل ۱۲ کانتور سرعت عمودی جریان (\bar{w}) در مقطع‌های طولی بر حسب عمق و امتداد خط مرکزی کانال، برای الگوهای SP، P₁ و P₂

۴-۲- توزیع مکانی شدت آشفتگی جریان

بدانته شدت آشفتگی شاخصی از نوسان‌های سرعت می‌باشد که بر الگوی جریان در یک منطقه، تأثیر می‌گذارد. بنابراین با افزایش نوسان‌های سرعت، شدت آشفتگی نیز افزایش می‌یابد. در این بخش، تغییرهای شدت آشفتگی در جهت طولی و عمودی جریان برای امتداد خط مرکزی کانال بررسی شده است. شکل ۱۳، کانتور پلات شدت آشفتگی طولی جریان (u_{rms}) را در

مؤلفه سرعت عمودی جریان دارای اندازه‌های منفی بزرگ می‌باشد که نشان‌دهنده وجود Downflow با قدرت زیاد است که پس از برخورد به بستر، منجر به شکل‌گیری گردابه‌های نعل‌اسبی با توان بالا در ایجاد آبشستگی پیرامون پایه می‌شود. در مکان پشت پایه، یک منطقه Wake با طولی برابر با $(22.5 \leq X \leq 70)$ در عمق جریان پیرامون پایه شکل گرفته است. با توجه به اندازه‌های منفی بزرگ برای سرعت عمودی جریان، قدرت گردابه‌های برخاستگی در این ناحیه بالا بوده و بنابراین افزایش انتقال رسوب‌ها از پیرامون پایه به سمت پایین دست را منجر می‌شود. در الگوی P₁ و P₂ سرعت عمودی جریان در ناحیه بالادست پایه، مثبت و بنابراین جهت جریان متمایل به سمت سطح آب می‌باشد. البته با توجه به این‌که در الگوی P₂ نسبت به P₁، میزان و منطقه سرعت‌های مثبت قابل ملاحظه‌تر بوده و هیچ نشانی از سرعت منفی عمودی دیده نمی‌شود؛ می‌توان نتیجه گرفت که چیدمان واحدها به صورت متراکم، حفاظت بهتری از بستر پیرامون پایه در ناحیه بالادست آن خواهد داشت. در منطقه پایین دست پایه، الگوی P₁ از شکل ۱۲، در بازه طولی تا حدودی برابر با $6/6D$ از پایه $(22.5 \leq X \leq 320)$ و بازه عمودی به تقریب $1/33D$ از کف، اندازه‌های منفی برای سرعت میانگین عمودی جریان را نشان می‌دهد. وجود یک منطقه با سرعت‌های عمودی بزرگ منفی در نزدیک بستر پشت پایه $(22.5 \leq X \leq 130)$ و $(0 \leq Z \leq 70)$ ، نشان‌دهنده تشدید قدرت گردابه‌ها در انتقال رسوب‌ها از پیرامون پایه به پایین دست و در نتیجه عملکرد منفی از واحدها در این ناحیه می‌باشد. البته برخلاف الگوی SP که در پشت پایه، هیچ‌گونه سرعت عمودی رو به بالا در آن دیده نشد؛ در این الگو، در لایه بالای واحدها $(70 \leq Z \leq 110)$ ، در طولی تا حدودی برابر با $4/5D$ ، اندازه‌های مثبت بزرگی برای سرعت عمودی دیده می‌شود. الگوی P₂ شکل ۱۲، نشان می‌دهد که کارگذاری واحدهای F-jacks در پیرامون پایه، اثر قابل توجهی روی مؤلفه عمودی سرعت جریان داشته است. به طوری که در ناحیه پشت پایه نسبت به الگوی SP، اثری از سرعت‌های منفی عمودی و ناحیه Wake در نزدیک پایه

امتداد خط مرکزی کانال بر حسب عمق (Z)، برای الگوهای SP، P_1 و P_2 نشان می‌دهد. در حالت پایه تک (الگوی SP از شکل ۱۴)، شدت آشفتگی ناشی از مؤلفه عمودی سرعت جریان در بالادست و پایین‌دست پایه بیشینه می‌باشد. بزرگی شدت آشفتگی عمودی در مقایسه با شدت آشفتگی طولی کوچک‌تر می‌باشد که به آشفتگی حاصل از مؤلفه عمودی سرعت، پایین‌تر اشاره دارد. در بالادست پایه با نزدیک شدن به پایه در دو الگوی P_1 و P_2 در سرتاسر عمق جریان، شدت آشفتگی عمودی جریان در مقایسه با الگوی SP کاهش یافته است. برای الگوی P_2 ، در بازه طولی $-200 \leq X \leq -22.5$ شدت آشفتگی در مقابل پایه و نزدیک بستر حدود $95/2$ درصد کاهش یافته و با نزدیک شدن به سطح آب افزایش می‌یابد. در ناحیه Wake از الگوی SP، قدرت شدت آشفتگی عمودی تولید شده (W_{rms}) به اندازه (u_{rms}) نیست؛ به دلیل اینکه منبع اصلی آشفتگی در ناحیه یاد شده، گردابه‌های روی صفحه افقی می‌باشد.

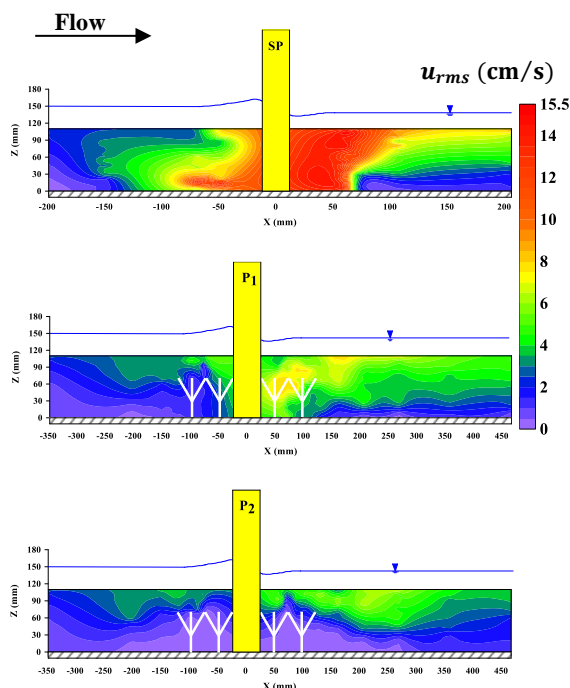


Fig. 13 Contour plot of Streamwise turbulence intensity (u_{rms}) along the centerline of the flume to depth (Z), for selected patterns

شکل ۱۳ کانتور پلات شدت آشفتگی طولی جریان (u_{rms}) در امتداد خط مرکزی کانال بر حسب عمق (Z)، برای الگوهای انتخابی

امتداد خط مرکزی کانال بر حسب عمق (Z)، برای سه الگو موردنظر نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود در الگوی SP، شدت آشفتگی طولی زیادی در مقابل پایه پل و نزدیک بستر ایجاد شده است. پس از آن شدت به سمت سطح آب و در فاصله‌های دورتر از پایه به سمت بالادست کاهش می‌یابد. اما شدت آشفتگی طولی در الگوهای P_1 و P_2 در مقابل پایه به طور چشمگیری کاهش یافته به طوری که در نزدیک بستر، شدت آشفتگی بسیار کم و به سمت سطح آب در حال افزایش است. برای الگوی SP، آشفتگی در ناحیه Wake به دلیل وجود گردابه‌های برخاستگی و جاده گردابه ون کارمن (Von Karman street) ناشی از جریان‌های چرخشی به طور قابل توجهی شدیدتر از دو الگوی P_1 و P_2 می‌باشد. با قرارگیری واحدها پیرامون پایه، در ناحیه پشت پایه، الگوی آشفتگی در منطقه‌های بالاتر و پایین‌تر جریان تفاوت قابل توجهی پیدا کرده است. به طوری که در ناحیه‌های بالاتر جریان، آشفتگی در بازه طولانی‌تری امتداد یافته و شدت آشفتگی ناشی از مؤلفه طولی سرعت در منطقه‌های بالاتر جریان، در مقایسه با ناحیه‌های پایین‌تر جریان بیشتر است. بنابراین با کارگذاری واحدهای F-jacks در پیرامون پایه (الگوهای P_1 و P_2 در شکل ۱۳)، شدت آشفتگی طولی جریان در بالادست و پایین‌دست پایه در مقایسه با پایه تک کاهش یافته است. به طوری که در الگوی P_2 ، در ناحیه قرارگیری واحدها پیرامون پایه ($0 \leq Z \leq 70$)، در فاصله طولی برابر با $7/22D$ از پایه در بالادست ($-350 \leq X \leq -22.5$) و $9/44D$ از پایه به سمت پایین‌دست ($22.5 \leq X \leq 450$) در ناحیه نزدیک بستر شدت آشفتگی طولی دارای اندازه ناچیزی در بازه صفر تا 1 cm/s است که شدت آشفتگی در مقایسه با الگوی SP، حدود $96/7$ درصد کاهش یافته است. اما کانتورهای نشان داده شده برای الگوی P_1 شکل ۱۳ گویای آن است که شدت آشفتگی ناشی از مؤلفه طولی سرعت جریان، در ناحیه پشت پایه ($22.5 \leq X \leq 85$) در مقایسه با دیگر ناحیه‌ها قابل ملاحظه بوده که اشاره به نوسان‌های بالای جریان و آشفتگی بیشتر در ناحیه یاد شده دارد.

شکل ۱۴ کانتور پلات شدت آشفتگی عمودی جریان

به ویژه نزدیک بستر به شدت کاهش یافته و بنابراین می‌توان گفت قدرت جریان در معلق نگه‌داشتن ذرات رسوب در پشت پایه بسیار کاهش یافته و بنابراین هدایت رسوب‌ها از پیرامون پایه به پایین دست مختل می‌شود. در نتیجه الگوی P₂، توانایی قابل توجه واحدهای F-jacks کارگذاری شده در پیرامون پایه در تضعیف قدرت گردابه‌های پیرامون را نشان می‌دهد.

۳-۴- تنش برشی رینولدز

تنش برشی رینولدز^۱ (RSS) حاصل از گردابه‌های تولید شده در یک جریان آشفته می‌باشد. در چنین جریانی ذرات سیال تمایل به حرکت تصادفی دارند و نرخ جابه‌جایی یک ذره سیال بین لایه‌ها به عنوان شار مومنوموم تعریف می‌شود. ماهیت این شار همانند تنش برشی است و RSS نام دارد و در صفحه XZ به صورت زیر تعریف می‌شود (Sahu et al., 2023).

$$\tau_{uw} = -\rho \overline{u'w'}; \quad \text{where}$$

$$\overline{u'w'} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (u_i - \bar{u})(w_i - \bar{w}) \quad (4)$$

شکل ۱۵، کانتور پلات تنش برشی رینولدز در صفحه XZ، (τ_{uw}) برحسب عمق جریان (Z) را برای الگوهای SP، P₁ و P₂ روی پلان افقی در $\frac{Z}{h} = 0.47$ نشان می‌دهد. موقعیت جریان می‌باشد. RSS برای الگوی SP شکل ۱۵، اندازه‌های بزرگی را در محدوده ۱- تا ۴/۵- در بازه $-70 \leq X \leq 70$ و $90 \leq Y \leq 90$ پیرامون پایه نشان می‌دهد که به نوسان‌های زیاد سرعت جریان اشاره داشته و در نتیجه آشفتگی بیشتر، وجود گردابه‌های قوی در این مکان را تأیید می‌کند. در الگوی P₁ شکل ۱۵، در بازه طولی $-22.5 \leq X \leq -112.5$ و بازه عرضی $-112.5 \leq Y \leq -112.5$ مقابل پایه و محل قرارگیری واحدها، تنش برشی رینولدز کاهش یافته و بنابراین قدرت گردابه‌ها تضعیف شده است. در پشت پایه، RSS تا فاصله حدود ۱/۱D از پایه ($22.5 \leq X \leq 70$) در محدوده ۳/۱- تا ۶/۹- تغییر می‌کند و از شدت آن در مقایسه با الگوی SP در این

کانتورهای شدت آشفتگی عمودی پشت پایه در الگوی P₁، تفاوت محسوسی را با شدت آشفتگی طولی (u_{rms}) نشان نمی‌دهد و شدت آشفتگی عمودی در مقایسه با الگوی SP به سمت منطقه جریان میانی انتقال یافته و از شدت آن در نزدیک بستر کاسته شده است. بنابراین قدرت گردابه‌های برخاستگی در بلند کردن و هدایت رسوب‌های پیرامون پایه به پایین دست کمتر می‌باشد. اما ناحیه پشت پایه در الگوی P₂، کاهش قابل ملاحظه شدت آشفتگی عمودی جریان و انتقال آن به ناحیه‌های بالاتر جریان و دورتر از پایه را نشان می‌دهد. به طوری که شدت آشفتگی عمودی در پشت پایه نسبت به الگوی SP در بازه طولی $22.5 \leq X \leq 70$ تا حدودی به اندازه ۹۱٪ درصد کاهش یافته است. با توجه به این که علت اصلی تعلیق ذرات رسوب در پشت پایه، نوسان‌های آشفتگی عمودی شناخته شده است (Kitsikoudis et al., 2017). با قرارگیری واحدها پیرامون پایه برابر الگوی P₂ شکل ۱۴، شدت آشفتگی حاصل از نوسان‌های عمودی جریان در پشت پایه

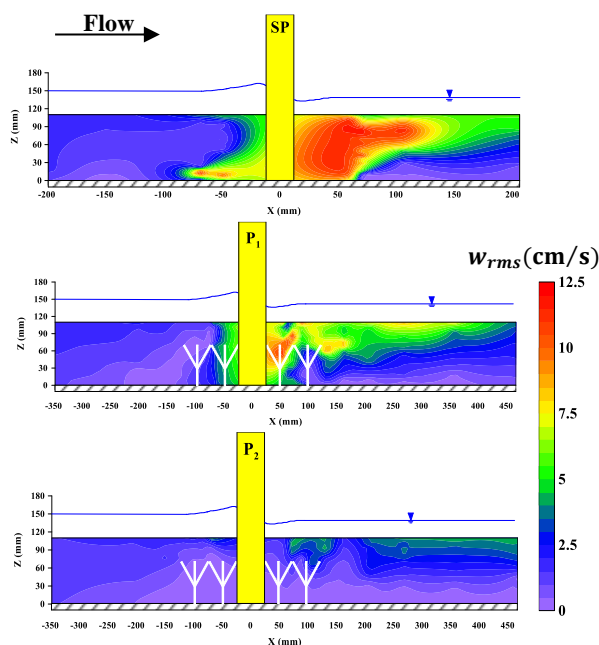


Fig. 14 Contour plot of vertical turbulence intensity (w_{rms}) along the centerline of the flume to depth (Z), for selected patterns

شکل ۱۴ کانتور پلات شدت آشفتگی عمودی جریان (w_{rms}) در امتداد خط مرکزی کانال بر حسب عمق (Z)، برای الگوهای انتخابی

۵- نتیجه گیری

این پژوهش، نتایج به دست آمده از یک بررسی و ارزیابی آزمایشگاهی را ارائه می دهد که در آن از واحدهای جدید F-jacks به عنوان اقدام مقابله با آشفستگی پیرامون پایه‌ها استفاده شده است. اثربخشی استفاده از واحدهای F-jacks در پیرامون پایه پل برابر الگوی P₁ و P₂ به وسیله اندازه گیری میدان های سرعت و شدت آشفتگی در پیرامون پایه پل با و بدون محافظ بررسی شد. نتایج نشان داد که در مقایسه با پایه تک (الگوی SP)، هنگامی که واحدهای F-jacks به صورت متراکم برابر الگوی P₂ پیرامون پایه پل قرار می گیرند؛ نتایج مطلوب در ویژگی های آشفتگی جریان به دست می آید. به طوری که نتایج به دست آمده از این پژوهش به شرح زیر می باشد:

کانتور و بردارهای مؤلفه طولی سرعت جریان میانگین زمانی (\bar{u}) نشان داد که هنگامی که واحدهای F-jacks برابر الگوی P₂ در پیرامون پایه پل کار گذاشته می شود؛ الگوی جریان در ناحیه پیرامون پایه به طور کامل تغییر می یابد. به طوری که در بالادست پایه، سرعت میانگین از سطح آب به سمت کف به طور قابل ملاحظه ای کاهش یافته که نشان دهنده رشد کمترینی و تضعیف قدرت جریان رو به پایین و گردابه های نعل اسبی است. در پایین دست پایه، منطقه جریان سرعت بالا در پشت پایه ناپدید شده و از آشفتگی جریان به طور قابل ملاحظه ای کاسته شده است. همچنین منطقه چرخش دوباره^۱ جریان که به دلیل جدایی جریان با توجه به گرادیان فشار برعکس می باشد (Kitsikoudis et al., 2017)، در Wake پایه به طور کامل ناپدید شده است و بنابراین کاهش رشد و تضعیف قدرت گردابه های برخاستگی و چرخشی را به دنبال خواهد داشت.

هنگامی که واحدهای F-jacks در پیرامون پایه قرار می گیرند؛ یک سرعت عمودی (\bar{w}) رو به بالای قوی در ناحیه پیرامون پایه در مقایسه با پایه تک (الگوی SP) مشهود است که در آرایش متراکم واحدها (الگوی P₂) قوی تر می شود. این عامل به تأثیر مثبت وجود واحدها در

ناحیه کاسته شده است. اما در فاصله طولی $70 \leq X \leq 100$ ، RSS افزایش یافته و اندازه های بزرگی در محدوده $-1/4$ تا $-1/8$ را نشان می دهد. با حرکت از این ناحیه به سمت پایین دست، بزرگی RSS کاهش می یابد. بنابراین می توان گفت؛ در منطقه نزدیک پایه در مقایسه با الگوی SP، از شدت های آشفتگی و قدرت گردابه ها کاسته شده و ناحیه بحرانی نوسان ها و گردابه ها باریک تر و به محلی دور از پایه منتقل شده است. در الگوی P₂ شکل ۱۵، RSS منفی با بزرگی بالا در منطقه قرارگیری واحدها پیرامون پایه ($-112.5 \leq X \leq 112.5$) و ($-72.5 \leq Y \leq 72.5$) در مقایسه با دو الگوی دیگر مشاهده می شود. از این رو شدت RSS بسیار پایین، نشان دهنده آشفتگی بسیار ناچیز و گردابه های بسیار ضعیف در این منطقه می باشد.

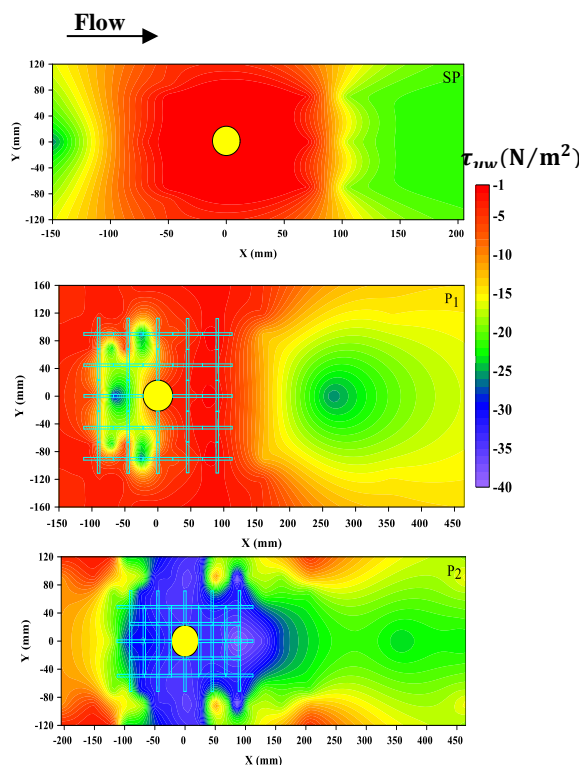


Fig. 15 Contour plot of Reynolds Shear Stress in the XZ plane (τ_{uw}) to the flow depth (Z) on the horizontal plane at $Z/h=0.47$ for SP, P1 and P2 patterns

شکل ۱۵ کانتور پلات تنش برشی رینولدز در صفحه XZ، τ_{uw} بر حسب عمق جریان (Z) روی پلان افقی در $Z/h = 0.47$ برای الگوهای SP، P₁ و P₂

واحدهای F-jacks به صورت متراکم (الگوی P₂) در پیرامون پایه قرار می‌گیرند؛ به طور قابل توجهی از آشفتگی جریان در این ناحیه کاسته می‌شود.

۶- فهرست نشانه‌ها

D	قطر پایه پل (mm)
h	عمق آب (cm)
U	سرعت جریان میانگین عمقی (m.s ⁻¹)
Q	دبی جریان (m ³ .s ⁻¹)
Re	عدد رینولدز جریان
Fr	عدد فرود جریان

۷- منابع‌ها

Bordbar, A., Sharifi, S. & Hemida, H. (2021). Investigation of the flow behaviour and local scour around single square-shaped cylinders at different positions in live-bed. *Ocean Engineering*, 238, <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2021.109772>.

Çelikoğlu, Y. & Engin, D. (2017). Placement effect on the stability of tetrapod armor unit on breakwaters in irregular waves. *China Ocean Engineering*, 31(6), 747–753.

Chatterjee, D., Mazumder, B.S., Ghosh, S. & Debnath, K. (2021). Turbulent flow characteristics over forward-facing obstacle. *Journal of Turbulence*, 22(3), 141–179.

Chiew, Y.M. (1995). Mechanics of Riprap Failure at Bridge Piers. *Journal of Hydraulic Engineering*, 121(9), 635–643.

Chiew, Y.M. & Lim, F.-H. (2000). Failure Behavior of Riprap Layer at Bridge Piers under Live-Bed Conditions. *Journal of Hydraulic Engineering*, 126(1), 43–55.

Chiew, Y.M. & Lim, S.Y. (2003). Protection of bridge piers using a sacrificial sill. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers: Water and Maritime Engineering*, 156(1), 53–62.

Das, S. & Mazumdar, A. (2015). Turbulence flow field around two eccentric circular piers in scour hole. *International Journal of River Basin Management*, 13(3), 343–361.

Fouli, H. & Elsebaie, I. H. (2016). Reducing local scour at bridge piers using an upstream subsidiary triangular pillar. *Arabian Journal of Geosciences*, 9(598), <https://doi.org/10.1007/s12517-016-2615-3>.

کاهش رشد downflow (سرعت عمودی منفی)، کاهش آشوب‌های بستر و انتقال آشفتگی ناحیه Wake به دور از بستر در پیرامون پایه پل اشاره دارد.

با توجه به کانتورهای سرعت میانگین عمقی پیرامون پایه، در الگوی P₂ در مقایسه با پایه بدون محافظ، سرعت جریان نزدیک‌شونده به پایه به دلیل تأثیر حفاظتی واحدهای F-jacks به طور قابل توجهی کاهش یافته، انحراف عرضی جریان ضعیف‌تر و در ناحیه پایین دست پایه نیز ماهیت جریان به کلی تغییر یافته است و اثری از جریان‌های برگشتی مشاهده نمی‌شود.

مؤلفه طولی و عمودی شدت آشفتگی جریان (u_{rms}, w_{rms}) با قرارگیری واحدهای F-jacks در پیرامون پایه برابر الگوی P₂، به طور قابل توجهی کاهش یافته است. در منطقه نزدیک بستر پیرامون پایه، شدت آشفتگی در مقایسه با الگوی SP، به طور میانگین، حدود ۹۳ درصد کاهش یافته است که نشان‌دهنده توانایی بالای واحدهای F-jacks در مهار نوسان‌ها و آشفتگی جریان در این منطقه است. همچنین نقش مؤثری در تضعیف نوسان‌ها و شدت آشفتگی جریان داشته و نوسان‌های جریان را به سمت سطح آب و دور از بستر منحرف می‌کند.

مقایسه تنش برشی رینولدز روی پلان XY در $\frac{z}{h} = 0.47$ برای سه الگوی SP، P₁ و P₂ معلوم کرد که $-\overline{\rho u'w'}$ در الگوی SP نسبت به الگوی P₁ و P₂، در مقابل پایه پل به طور تقریبی ۹۵٪ بالاتر است. افزون بر این، بزرگی $-\overline{\rho u'w'}$ ، با قرارگیری واحدهای F-jacks به صورت متراکم (الگوی P₂) در پیرامون پایه، به طور قابل توجهی کاهش یافته است. از این رو عملکرد مطلوب واحدهای در آرایش یاد شده، در کاهش تنش برشی پیرامون پایه، کاهش نوسان‌های جریان، آشفتگی ناچیز و تضعیف شکل‌گیری و قدرت گردابه‌ها در انتقال رسوب‌های پیرامون پایه را به دنبال خواهد داشت.

نتایج آزمایشگاهی ارائه شده در این پژوهش، درک جدیدی از جزئیات رفتار جریان در پیرامون مدل پایه پل با طرح جدیدی از واحدهای مقاوم‌سازی بستر (F-jacks) پیرامون آن در شرایط بستر صاف را فراهم می‌کند. نتیجه کلی این بررسی و ارزیابی نشان داد که هنگامی که

- overtopping of Starbloc® armored mound breakwaters. *Ocean Engineering*, 151, 268–275, <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2017.12.061>.
- Sahu, C., Eldho, T.I. & Mazumder, B.S. (2023). Experimental Study of Flow Hydrodynamics Around Circular Cylinder Arrangements Using Particle Image Velocimetry. *Journal of Fluids Engineering, Transactions of the ASME*, 145(1), <https://doi.org/10.1115/1.4055597>.
- Shariati, H., Khodashenas, S.R. & Esmaili, K. (2010). Effect of Collar Shape on the Local Scouring Around the Bridge Piers. *Journal of Hydraulics*, 4(4), 1–11. (In Persian)
- Tachie, M.F., Bergstrom, D.J. & Balachandar, R. (2003). Roughness effects in low-Re θ open-channel turbulent boundary layers. *Experiments in Fluids*, 35(4), 338–346.
- Tang, H.W., Ding, B., Chiew, Y.M. & Fang, S.L. (2009). Protection of bridge piers against scouring with tetrahedral frames. *International Journal of Sediment Research*, 24(4), 385–399.
- Valela, C., Rennie, C.D. & Nistor, I. (2022). Improved bridge pier collar for reducing scour. *International Journal of Sediment Research*, 37(1), 37–46.
- Yang, Y., Qi, M., Li, J. & Ma, X. (2018). Evolution of hydrodynamic characteristics with scour hole developing around a pile group. *Water*, 10(11), 1632, <https://doi.org/10.3390/w10111632>.
- Zarrati, A.R., Chamani, M.R., Shafaie, A. & Latifi, M. (2010). Scour countermeasures for cylindrical piers using riprap and combination of collar and riprap. *International Journal of Sediment Research*, 25(3), 313–322.
- Zhang, Q., Tang, G., Lu, L. & Yang, F. (2021). Scour protections of collar around a monopile foundation in steady current. *Applied Ocean Research*, 112, 102718, <https://doi.org/10.1016/j.apor.2021.102718>.
- Zilai, Z. & Shafai Bejestan, M. (2017). Effects of Six-Leg Elements Row Quantity on Reduction of Cubic Bridge Pier Scour Depth. *Water and Soil Science*, 26(4.2), 187–200. (In Persian)
- Zolghadr, M., Shafai Bejestan, M. & Fathi, A. (2016). Effect of Density and Depth of Six-Legged Elements Placement on Rectangular Abutment Scour Depth. *Water and Soil Science*, 26(4.1), 119–135. (In Persian)
- Zolghadr, M., Shafai Bejestan, M. & Khodabakhshi, A. & Farhadi, A. (2016). Experimental Study on Effect of Slot Level on Local Scour Around Bridge Pier. *The Journal of Applied Research*, 02(05), 238–243.
- Kitsikoudis, V., Kirca, V.S.O., Yagci, O. & Celik, M.F. (2017). Clear-water scour and flow field alteration around an inclined pile. *Coastal Engineering*, 129, 59–73, <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2017.09.001>.
- Kumar, V., Raju, K.G.R. & Vittal, N. (1999). Reduction of Local Scour around Bridge Piers Using Slots and Collars. *Journal of Hydraulic Engineering*, 125(12), 1302–1305.
- Melville, B.W. & Hadfield, A.C. (1999). Use of Sacrificial Piles as Pier Scour Countermeasures. *Journal of Hydraulic Engineering*, 125(11), 1221–1224.
- Mohamadpour, S. & Shafai Bejestan, M., (2017). Investigation of The Area of Around Bridge Abutment by A-Jacks to Protect Against Scour. *Journal of Irrigation Sciences and Engineering (JISE)*, 40(1), 25–35. (In Persian)
- Najjaran, E., Kamanbedast, A.A., Shafai Bejestan, M., Masjedi, A.R. & Hasonizadeh, H. (2019). Laboratory evaluation of the effect of permeable vanes distance using six-pillar concrete elements on the bend migration. *Journal of Water and Soil Resources Conservation*, 10(1), 31–44. (In Persian)
- Nezu, I. & Nakagawa, H. (1993). Turbulence in open-channel flows. 294p.
- Nezu, I. & Rodi, W. (1986). Open-channel Flow Measurements with a Laser Doppler Anemometer. *Journal of Hydraulic Engineering*, 112(5), 335–355.
- Park, Y.H., Oh, Y.M., Ahn, S.M., Han, T.H., Kim, Y.T., Suh, K.D. & Won, D. (2019). Development of a new concrete armor unit for high waves. *Journal of Coastal Research*, 35(3), 719–728.
- Radice, A. & Davari, V. (2014). Roughening Elements as Abutment Scour Countermeasures. *Journal of Hydraulic Engineering*, 140(8), 1–7.
- Rashki Ghaleh Nou, M., Azhdary Moghaddam, M., Shafai Bajestan, M. & Mohammad Azamathulla, H. (2020). Control of bed scour downstream of ski-jump spillway by combination of six-legged concrete elements and riprap. *Ain Shams Engineering Journal*, 11(4), 1047–1059.
- Safari, I., Mouazé, D., Ropert, F., Haquin, S. & Ezersky, A. (2018). Hydraulic stability and wave

Rezaeianzadeh, M. (2016). Investigating the Effect of Six-Legged Element Placement Density on Local Scour at Wing-Wall Bridge Abutments. World Environmental And Water Resources Congress 2016.

Zolghadr, M. & shafaei Bejestan, M. (2018). Effect of Six-Legged Elements installation arrangement on bed topography around Wing-Wall Abutments. *Water Engineering*, 11(36), 47–58. (In Persian)