Shahid Chamran University of Ahvaz

**Irrigation Sciences and Engineering (JISE)**
**Vol. 48, No. 2, Summer 2025, p. 1-19**

**Research Paper**

Journal homepage: https://jise.scu.ac.ir

**EXTENDED ABSTRACT**

# Investigation of turbulence flow structure and sediment entrainment around a round-nosed rectangular pier using a downstream bed sill

E. Sanadgol [1], M. Heidarpour [2*] and R. Mohammadpour Ghalati [3]

*1- Ph.D. Student of Civil Engineering Department, Estahban Branch, Islamic Azad University, Estahban, Iran.*
*2*- Corresponding Author, Professor, Department of Water Science and Engineering, Isfahan University of Thecnology, Isfahan, Iran. (heidar@iut.ac.ir)*
*3- Assistant Professor, Civil Engineering Department, Estahban Branch, Islamic Azad University, Estahban, Iran.*

**ARTICLE INFO**

*Artlcle history:*
Received: 05 May 2020
Revised: 24 December 2020
Accepted: 27 December 2020

*Keywords:*
Bridge pier, Bed sill, Scour, Bursting events, Quadrant analysis.

**TO CITE THIS ARTICLE:**

Sanadgol, E., Heidarpour, M., Mohammadpour Ghalati, R. (2025). 'Investigation of turbulence flow structure and sediment entrainment around a round-nosed rectangular pier using a downstream bed sill', *Irrigation Sciences and Engineering*, 48(2), pp. 1-19. doi: 10.22055/jise.2020.32989.1916

## Introduction

Estimation of scour at bridge piers has always been a challenging problem to the hydraulic engineers and has attracted the interest of many researchers. Bridges are always degradation due to various factors, but many researchers have identified the main cause of bridge failure as local scour around bridge piers (Lagasse and Richardson, 2001; Dey and Barbhuiya, 2004; Khaple et al., 2017b). Although there are numerous studies of local scour, however, the coherent structures in turbulent flow around the bridge pier still remain unknown. Most studies on scour have focused on techniques to control and reduce the local scouring (e.g. Izadinia and Heidarpour, 2012). Since the sediment transport process is very complicated due to the interaction of many parameters, therefore, studies have been carried out to determine the turbulent flow structure, but not enough. Lu and Willmarth (1973) introduced the quadrant analysis for studying the structure of the bursting phenomenon. In fact, the bursting phenomenon consists of four different events outward interaction, ejection, inward interaction, and sweep. Izadinia et al. (2013) and Izadinia and Heidarpour (2019) by measured velocity profiles around the circular pier and using quadrant analysis, they investigated the flow structure around the pier. Given the importance of the flow structure and in particular the bursting events around the bridge piers, it can be stated that still their characteristics have not been investigated in detail. Therefore, since the quadrant analysis is a powerful tool to recognize the structure of the bursting phenomenon and consequently to find the susceptible regions for sediment entrainment and deposition, this technique is considered in present study to investigate the coherent structure of turbulent flow in scouring process around the bridge pier. In addition, since previous studies have focused more on investigating the flow structure at the circular bridge pier, therefore, the main objective of this study is to investigate the flow structure around round-nosed rectangular with bed sill.

## Methodology

The experiments were carried out in a rectangular flume with 15 m length, 0.9 m width and 0.6 m height. A round-nosed rectangular pier with the ratio of L/b=2 and the width of 30 mm was installed at the center of the test section 1 m long. The test section was filled with uniform sand particles of 0.72 mm medium diameter and geometric standard deviation of 1.2. The coordinates of the pier location are x=0 and y=0. A 1-cm-thick PVC plate as wide as the channel width and flush with the bed was used as the bed sill at downstream of the pier. The bed sill was attached to back of the pier. The local scour test was carried out under conditions that the ratio of flow velocity to the critical flow velocity was 0.92. The longitudinal, transversal, and vertical velocities in the centerline of the channel were measured using by Acoustic Doppler Velocimeter (ADV). The velocity fluctuations at each point were measured with a frequency of 200 Hz and a sampling duration of 120 s, such that 24000 data samples were captured for each velocity component. Velocity profiles were measured in 9 different positions at upstream and downstream of the bridge pier. After measuring the velocity fluctuation data, WinADV was used to filter and process the velocity and turbulence data. The velocity data was processed based on two key parameters, signal to noise ratio (SNR) and correlation coefficient (COR). Velocity data with SNR of less than 15 dB and COR of less than 70% was filtered out.

**Results and Discussion**

Bursting events were analyzed using quadrant analysis. For this purpose, a computer program was written in MATLAB. The occurrence probabilities profiles of each events at upstream and downstream of the pier for H=0 are shown in Fig. (1). The results indicate that at upstream of the pier and near the bed (z/h<0.03), occurrence probabilities outward interaction and inward interaction are dominant. By increasing the distance from the bed due to the velocity reversal phenomenon near the bed, the occurrence probabilities of ejection and sweep become dominant. By averaging of occurrence probabilities at depth in upstream of the pier, it was found that the sweep event has highest occurrence probability than other events, which followed, by ejection, outward interaction and inward interaction events have highest occurrence probabilities. In downstream of the pier, near the bed (Fig. 1b), outward interaction and inward interaction events than ejection and sweep events are highest occurrence probabilities. The occurrence probabilities of outward interaction and inward interaction events become nearly the same in outer region. The other two events, ejection and sweep, have nearly the same occurrence probabilities.

The variations $|S_{i,H}|$ as a function of the hole size H for each quadrant at z/h=0.1 at upstream and downstream of the pier are shown in Fig. (2). The results indicate that ejection (II) and sweep (IV) events are dominant and outward interaction (I) and inward interaction (III) events appear to contribute weakly to the Reynolds shear stress production. In general, the contribution of each events to the Reynolds shear stress production in downstream of the pier due to the presence of bed sill are weaker.

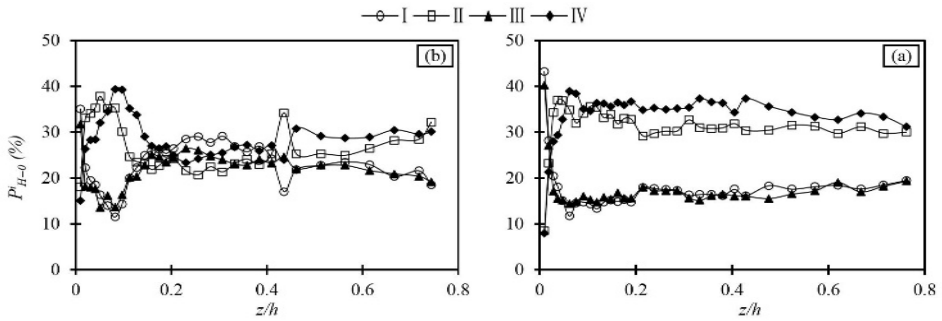



**Fig 1- Occurrence probability of bursting event for each quadrant (I, II, III, IV); (a) upstream of the pier, (b) downstream of the pier**

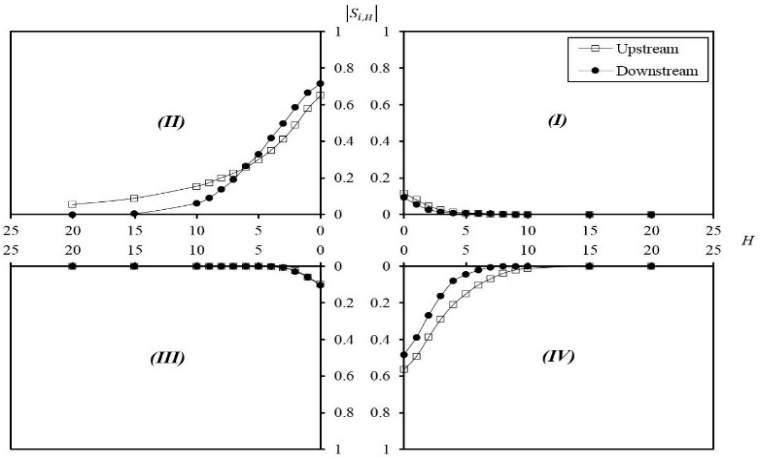



**Fig 2- Variation of $|S_{i,H}|$ with H for z/h=0.1 at upstream and downstream of the pier for each quadrant (I, II, III, IV)**

## Conclusions

At upstream of the pier, it was found that sweep event than ejection, outward interaction and inward interaction events has highest occurrence probabilities. In downstream of the pier, near the bed, outward interaction and inward interaction events are highest occurrence probability. In addition, investigation the variations $|S_{i,H}|$ as a function of the hole size H at z/h=0.1 it shown that the ejection and sweep events are dominant and as well as the contribution of each events to the Reynolds shear stress production in downstream of the pier due to the presence of bed sill are weaker.

## Acknowledgment

Hereby, the authors thanks the head of laboratory which accompanied us on this path.

## Conflict of Interest

The authors declared no potential conflicts of interest concerning the research, authorship, and publication of this article . Confirmation.

## Funding

The authors received no financial support for the research, authorship, and publication of this article.

## Data Availability Statements

Data Availability Statement: All information and results are presented in the text of the article.

## Authors' Contribution

**First Author:** Ehsan Sanadgol, Performed the experiments and carried out the analysis of a portion of the data.
**Second Author:** Manouchehr Heidarpour, Supervised data verification and analysis, and provided guidance in the preparation of the manuscript.
**Third Author:** Reza Mohammadpour Ghalati, article review

## References

1- Dey, S. and Barbhuiya, A.K., 2004. Clear-water scour at abutments in thinly armored beds. *Journal of hydraulic engineering*, *130*(7), pp.622-634.

2- Izadinia, E. and Heidarpour, M., 2012. Simultaneous use of cable and collar to prevent local scouring around bridge pier. *International Journal of Sediment Research, 27*(3), pp.394-401.

3- Izadinia, E. and Heidarpour, M., 2019. Study of affective phenomena on Sediment transport in local scouring around bridge piers. *Iranian Water Research Journal, 13*(2), pp.105-116. (In Persian).

4- Izadinia, E., Heidarpour, M. and Schleiss, A.J., 2013. Investigation of turbulence flow and sediment entrainment around a bridge pier. *Stochastic environmental research and risk assessment, 27*(6), pp.1303-1314.

5- Khaple, S., Hanmaiahgari, P.R., Gaudio, R. and Dey, S., 2017b. Splitter plate as a flow-altering pier scour countermeasure. *Acta Geophysica*, *65*(5), pp.957-975.

6- Lagasse, P.F. and Richardson, E.V., 2001. ASCE compendium of stream stability and bridge scour papers. *Journal of Hydraulic Engineering*, *127*(7), pp.531-533.

7- Lu, S.S. and Willmarth, W.W., 1973. Measurements of the structure of the Reynolds stress in a turbulent boundary layer. *Journal of Fluid Mechanics*, *60*(3), pp.481-511.

© 2025 The Author(s). Published by Shahid Chamran University of Ahvaz. 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.

علوم و مهندسی آبیاری جلد ۴۸، شماره‌ی۲، تابستان ۱۴۰۴، مقاله پژوهشی، ص. ۱۹-۱

# بررسی ساختار جریان آشفته و حمل رسوب در اطراف یک پایه مستطیلی دماغه گرد با استفاده از کفبند پایین‌دست

احسان سندگل [۱]، منوچهر حیدرپور [۲*] و رضا محمدپور قلاتی [۳]

۱- دانشجوی دکتری گروه مهندسی عمران، واحد استهبان، دانشگاه آزاد اسلامی، استهبان، ایران.

۲*- نویسنده مسئول، استاد، گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه صنعتی اصفهان، heidar@iut.ac.ir

۳- استادیار، گروه مهندسی عمران، واحد استهبان، دانشگاه آزاد اسلامی، استهبان، ایران.

دریافت: ۱۳۹۹/۰۲/۱۶ بازنگری: ۱۳۹۹/۱۰/۰۴ پذیرش: ۱۳۹۹/۱۰/۰۷

## چکیده

**تعامل پیچیده بین جریان آشفته و ذرات رسوب در بستر منجر به آب‌شستگی موضعی در اطراف پایه پل می‌شود. بیشتر مطالعه‌های صورت‌گرفته در زمینه آب‌شستگی است و به بررسی ساختار جریان در اطراف پایه و به خصوص پایه با عامل حفاظتی کمتر توجه شده است. در این مطالعه، به بررسی جریان آشفته در اطراف پایه مستطیلی دماغه گرد با کفبند با اندازه‌گیری پروفیل‌های سرعت پرداخته شده و سهم هر یک از رخدادهای خودانفجار در تنش برشی رینولدز تعیین و مورد بررسی قرار گرفته است. سرعت‌های سه‌بعدی جریان در محور مرکزی کانال با استفاده از یک سرعت سنج صوتی اندازه‌گیری شد. داده‌های سرعت با استفاده از آنالیز کوادرانت برای شناخت مناطق حساس برای حمل و ته‌نشینی رسوب مورد بررسی قرار گرفته‌اند. نتایج نشان داد که رخداد جاروبی پدیده غالب می‌باشد. رخدادهای جاروبی و پرتابی مکانیسم موثری برای حمل رسوب در اطراف پایه با کفبند را دارند. بررسی تغییرات $|S_{i,H}|$ به ازای H نشان داد که در پایین‌دست پایه سهم هریک از رخدادها در تولید تنش برشی رینولدز به علت وجود کفبند نسبت به بالادست پایه ضعیف‌تر است.**

**کلید واژه‌ها:** پایه پل، کفبند، آب‌شستگی، وقایع خودانفجار، آنالیز کوادرانت.

## مقدمه

برآورد آب‌شستگی ناشی از پایه‌های پل همواره مشکل چالش‌برانگیزی برای مهندسان هیدرولیک بوده و علاقه پژوهشگران زیادی را به خود جلب کرده است. زمانی‌که جریان رودخانه ازمیان پایه‌های پل جریان می‌یابد، جدایی جریان در اطراف پایه رخ می‌دهد (Khaple et al., 2017b). انسداد جریان توسط پایه پل و هم‌چنین وجود ساختارهای پیچیده جریان اطراف پایه پل موجب تشکیل آب‌شستگی موضعی در اطراف پایه‌های پل می‌شود که از مهم‌ترین دلایل تخریب پل‌ها می‌باشد (Khaple et al., 2017a and Keshavarzi et al., 2017). محققان بسیاری علت اصلی خرابی پل‌ها را آب‌شستگی موضعی اطراف پایه‌های پل دانسته‌اند (Lagasse and Richardson, 2001; Dey and Barbhuiya, 2004; Khaple et al., 2017b). لایه مرزی بالادست پایه تحت جدایی جریان سه‌بعدی قرار گرفته و سیستم پیچیده‌ای از گرداب‌ها را در اطراف پایه تشکیل می‌دهد (Zarrati et al., 2004; Zarrati et al., 2010; Heidarpour et al., 2010; Keshavarzi et al., 2017; Khaple et al., 2017b). الگوی آب‌شستگی و مکانیسم جریان در اطراف تک پایه پل به‌صورت شماتیک در شکل (۱) نشان شده است.

علی‌رغم این‌که مطالعه‌های بسیاری روی آب‌شستگی موضعی وجود دارد، اما هم‌چنان عدم درک ساختارهای منسجم در جریان آشفته اطراف پایه پل وجود دارد. با بررسی مطالعه‌های گذشته می‌توان بیان نمود که بیشتر تحقیقات روی روش‌های مقابله با کاهش آب‌شستگی موضعی متمرکز شده است (Zarrati et al., 2004; Masjedi et al., 2010; Zarrati et al., 2010; Mashahir et al., 2010; Heidarpour et al., 2010; Izadinia and Heidarpour, 2012; Moreno et al., 2017; Khaple et al., 2017b). هم‌چنین برخی از مطالعه‌های نیز روی پیش‌بینی حداکثر عمق آب‌شستگی متمرکز شده است (Melville and Coleman, 2000; Dey and Barbhuiya, 2004).

از آنجایی‌که فرایند انتقال رسوب به‌علت تعامل بسیاری از پارامترها از پیچیدگی خاصی برخوردار است، لذا مطالعه‌های زیادی برای تعیین ساختار جریان آشفته انجام شده است، اما ماهیت تصادفی جریان آشفته در اطراف پایه‌های پل به درستی مشخص نشده است (Izadinia et al. 2013, Keshavarzi et al. 2014, Keshavarzi et al. 2017, Dey et al., 2018a; Dey et al., 2018b; Izadinia and Heidarpour, 2019).

پدیده خودانفجار ابزاری برای توصیف انتقال حرکت بین جریان آشفته و آرام است که برای بررسی ساختار آن آنالیز کوادرانت معرفی

*DOI:* 10.22055/JISE.2020.32989.1916

گردید (Lu and Willmarth, 1973). در حقیقت آن‌ها از آنالیز کوادرانت به‌عنوان ابزاری برای تعیین تفاوت هریک از رخدادهای پدیده خودانفجار که شامل حرکت جاروبی (Sweep)، حرکت پرتابی (Ejection)، برهم‌کنش درونی (Inward interaction) و برهم‌کنش بیرونی (Outward interaction) است، استفاده کردند.

Drake et al. (1988) و Nelson et al. (1995) نشان دادند که انتقال رسوب در نزدیک بستر، به میزان زیادی به چهار رخداد پدیده خودانفجار مرتبط می‌باشد. Nelson et al. (1995) مطرح کردند که رخداد جاروبی تنها رخداد عامل حرکت بار بستر نبوده و رویداد جریان بیرونی نیز در انتقال بار بستر مؤثر است. آن‌ها نشان دادند وقتی که مقدار جریان بیرونی نسبت به سایر رخدادها افزایش یابد، میزان رسوب به مقدار زیاد افزایش یافته، اگرچه مقدار تنش برشی رینولدز کاهش می‌یابد. Grass (1983) نشان داد که سهم حرکت جاروبی در انتقال مومنتوم بیش از حرکت پرتابی است. Thorne et al. (1989) و Keshavarzy و Ball (1995) اذعان نمودند که احتمال حرکت جاروبی و پرتابی در یک تناوب بیش از برهم‌کنش درونی و برهم‌کنش بیرونی است. Williams (1990) و Thorne et al. (1989) بیان کردند قسمت عمده انتقال رسوبات براساس حرکت جاروبی و تا حدی در اثر برهم‌کنش بیرونی اتفاق می‌افتد، درحالی‌که انتقال رسوبات به‌صورت ذرات معلق بیشتر در حرکت پرتابی اتفاق می‌افتد. Keshavarzy و Ball (1995) نشان دادند اندازه تنش برشی لحظه‌ای در حرکت جاروبی بیش از برهم‌کنش درونی و برهم‌کنش بیرونی می‌باشد. Jafari Mianaei و Keshavarzi (2010) با استفاده از آنالیز کوادرانت جریان آشفته و حمل رسوب روی ریپل‌ها را بررسی کردند. Esfahani و Keshavarzi (2011) به مطالعه پدیده خودانفجار برای به‌دست آوردن ساختار توربلانس در کانال‌های انحنادار پرداختند. Keshavarzi و Ball (2011) به بررسی ساختار جریان منسجم در اطراف تک پایه استوانه‌ای پل پرداختند و اثرات آن را بر الگوی آب‌شستگی بستر مورد بررسی قرار دادند. Izadinia et al. (2013) در اطراف پایه استوانه‌ای پروفیل‌های سرعت را برداشت کرده و به بررسی و مطالعه خصوصیات جریان آشفته پرداختند. Keshavarzi et al. (2014) به تجزیه و تحلیل سه‌بعدی از ساختار جریان آشفته منسجم در اطراف پایه پل پرداخته و تأثیر چهار رخداد وقایع خودانفجار را در انتقال رسوبات از بستر مورد بررسی قرار دادند. Izadinia و Heidarpour (2019) پروفیل‌های سرعت در اطراف پایه پل را برداشت کرده و با استفاده از آنالیز کوادرانت به بررسی ساختار جریان در اطراف پایه پرداختند.

علی‌رغم این‌که مطالعه‌های در زمینه ساختار جریان اطراف پایه انجام شده است و با توجه به اهمیت این موضوع و به‌ویژه وقایع خودانفجار در اطراف پایه پل، می‌توان بیان نمود که هنوز خصوصیات آن‌ها با جزییات مورد بررسی قرار نگرفته است. لذا ازآنجایی‌که آنالیز کوادرانت ابزاری قدرتمند برای شناخت ساختار پدیده خودانفجار و در نتیجه پیدا کردن نواحی حساس برای حمل رسوب و رسوب‌گذاری است، این روش در مطالعه حاضر به‌منظور بررسی ساختارهای جریان آشفته منسجم در فرایند آب‌شستگی اطراف پایه پل در نظر گرفته شده است (Izadinia et al. 2013; Izadinia and Heidarpour, 2019). علاوه‌براین، ازآنجایی‌که مطالعه‌های قبلی روی بررسی ساختار جریان در پایه استوانه‌ای بدون اقدامات حفاظتی متمرکز بوده است، لذا هدف اصلی این مطالعه بررسی ساختار جریان در اطراف پایه مستطیلی دماغه گرد با کفبند است.

## مواد و روش‌ها

### مدل آزمایشگاهی

آزمایش‌ها در یک کانال آزمایشگاهی از جنس پلکسی گلس به طول ۱۵ متر، عرض ۰/۹ متر و ارتفاع ۰/۶ متر انجام شد (شکل ۲). مقطع آزمایش که پایه و کف‌بند در آن قرار گرفته بود به طول یک متر با یک تورفتگی روی بستر به عمق ۰/۱۸ متر و در ده متری از پایین‌دست ورودی کانال قرار داشت تا بتواند یک جریان کاملاً توسعه‌یافته را تضمین کند. منطقه جریان کاملاً توسعه‌یافته جایی است که پروفیل‌های سرعت در جهت جریان تغییر نکنند. تورفتگی با ذرات یکنواخت با اندازه متوسط $d_{50}$=۰/۷۲ میلی‌متر و انحراف معیار هندسی $\sigma_g$=۱/۲ پر شده بود. یک پایه مستطیلی دماغه گرد با نسبت L/b=۲ و به عرض ۳۰ میلی‌متر در مرکز مقطع آزمایش نصب گردیده بود. مختصات محل پایه y=۰ و x=۰ است، همان‌طور که در شکل‌های مربوطه نشان داده شده است. موقعیت x=۰ مرکز پایه است و y=۰ نیز محور مرکزی کانال می‌باشد. علاوه‌براین یک صفحه PVC به ضخامت یک سانتی‌متر و هم‌اندازه با عرض کانال و هم‌ارتفاع با عمق مقطع آزمایش به‌عنوان کفبند بستر در نظر گرفته شد و در فاصله D/b=۰ (D فاصله کفبند از پشت پایه و b عرض پایه) از پشت پایه نصب گردید (شکل ۳).

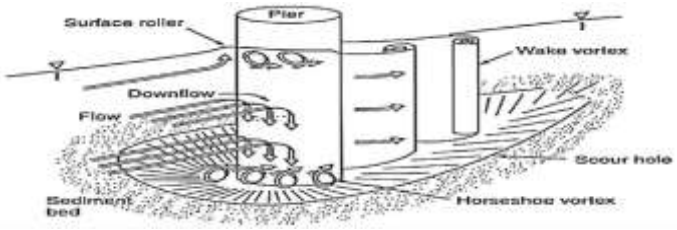



**Fig 1- Flow mechanism around a bridge pier (Breusers and Raudkivi, 1991)**

**شکل ۱- مکانیسم جریان در اطراف پایه پل (Breusers and Raudkivi, 1991)**

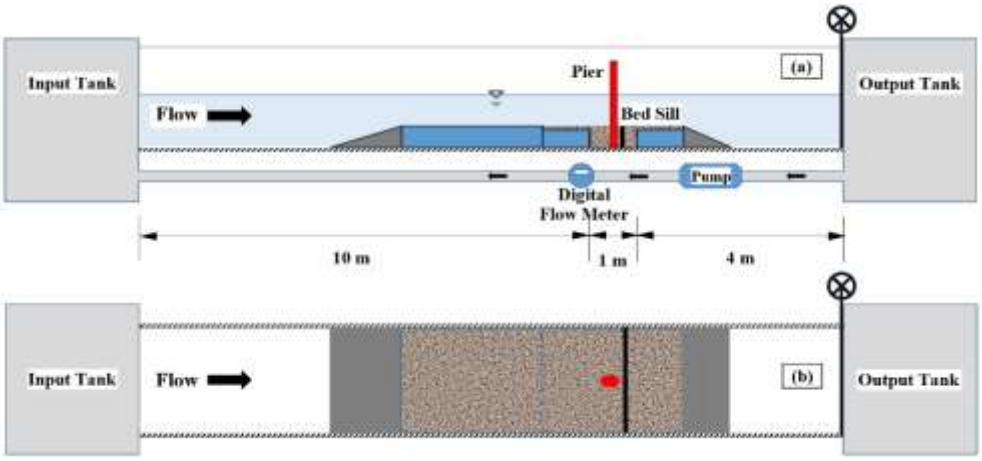



**Fig 2- Schematic plan of the experimental flume: (a) side view, (b) plan view**
**شکل ۲- طرح شماتیکی از فلوم آزمایشگاهی a) نمای جانبی، b) پلان**

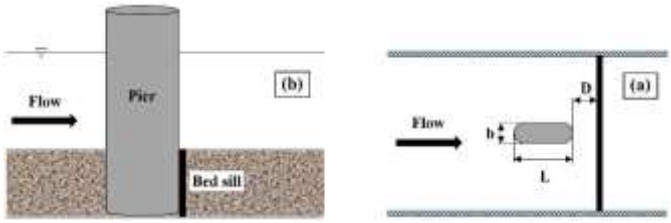



**Fig 3- Illustration of a bed sill installed downstream of a rectangular pier: (a) Plan view, (b) side view**
**شکل ۳- تصویر کفبند نصب‌شده در پایین‌دست پایه مستطیلی a) پلان، b) نمای جانبی**

نسبت فاصله محور پایه تا دیواره به عرض پایه مستطیلی برابر ۱۵ بود، به‌طوری‌که طبق معیار Raudkivi و Ettema (1983) اثر دیواره جانبی حذف شد. نسبت قطر پایه (در این‌جا عرض پایه) به اندازه متوسط ذرات رسوب برابر ۴۲ بود، به‌طوری‌که طبق معیار Raudkivi و Ettema (1983) اثر ذرات رسوب حذف شد. براساس Raudkivi و Ettema (1983) برای عدم تشکیل ریپل در رسوبات ($d_{50}\geq$۰/۷mm)، آزمایش‌ها می تواند با شرایط جریان بدون آشفتگی در بستر بالادست توسط جریان نزدیک‌شونده با موفقیت انجام شود. مطابق Chiew و Melville (1987) اگر انحراف معیار هندسی ذرات کمتر از ۱/۳ باشد، تأثیر عدم یکنواختی رسوبات بر عمق گودال آب‌شستگی ناچیز می‌شود. سطح آب در کانال توسط یک دریچه آبگیر در انتهای کانال کنترل می‌شد.

آستانه حرکت مواد بستر با انجام آزمایش قبل از نصب پایه بدین صورت پیدا شد. مقطع آزمایش بدون پایه و با ذرات رسوب پر گردید و پس از تسطیح آن با آب پر شد. پس از برقراری جریان و تنظیم دبی در کانال، عمق جریان به‌تدریج کاهش داده شد تا سرعت جریان افزایش پیدا کند. عمق متناظر با زمانی که ذرات به آرامی شروع به حرکت کردند به‌عنوان آستانه حرکت در نظر گرفته شد و آزمایش‌ها با این عمق انجام گردید. دبی جریان با استفاده از دبی‌سنج کانال تعیین شد. با تعیین دبی و آستانه حرکت مواد بستر شرایط جریان مطابق با جدول (۱) تعیین شد. ازآنجایی‌که حداکثر عمق آب‌شستگی در شرایط آب زلال در آستانه حرکت مواد بستر اتفاق می‌افتد، آزمایش در نظرگرفته‌شده در این مطالعه با این شرایط انجام شده است (Raudkivi, 1990). Vittal et al. (1994) زمانی را به‌عنوان زمان تعادل تعریف کردند که تغییرات عمق آب‌شستگی موضعی در یک دوره شش ساعته کمتر از یک میلی‌متر باشد. بنابراین حداقل مدت زمان انجام آزمایش به‌منظور دست‌یابی به عمق متعادل آب‌شستگی ۱۵ ساعت در نظر گرفته شد.

به‌منظور برداشت پروفیل‌های سرعت در ابتدا پس از برقراری شرایط تعادل، بستر مقطع آزمایش و گودال آب‌شستگی با مخلوط پودرسنگ و سیمان تثبیت گردید. سپس نوسانات سرعت در جریان با دقت ۰/۳ m/s ± و با فرکانس ۲۰۰ هرتز در سه بعد با استفاده از یک دستگاه سرعت سنج صوتی (ADV) نما پایین، توسعه‌یافته توسط شرکت Nortek، اندازه‌گیری شد. در شرایط تعادل پروب ADV (Probe) در فاصله ۵۲ میلی‌متری از بستر قرار گرفت و نوسانات سرعت در یک حجم کنترل واقع شده در ارتفاع ۵/۵ میلی‌متر لایه بالایی بستر اندازه‌گیری شد. مدت زمان نمونه‌برداری در هر نقطه از جریان ۱۲۰ ثانیه بود، به‌طوری‌که ۲۴۰۰۰ نمونه داده برای هر مؤلفه سرعت گرفته شد. پروفیل‌های سرعت در نه نقطه در محور مرکزی کانال اندازه‌گیری شد، همان‌طور که در شکل (۴) نشان داده شده است. پس از برداشت داده‌های نوسانات سرعت، از برنامه winADV برای فیلتر کردن و پردازش داده‌های سرعت و آشفتگی استفاده شد. برای کنترل درستی داده‌های سرعت، دو پارامتر کلیدی نسبت سیگنال به نویز (SNR) و ضریب همبستگی

*DOI:* 10.22055/JISE.2020.32989.1916

(COR) باید بررسی شود. برای ارایه داده‌های خوب سرعت باید محدوده‌های SNR و COR به‌ترتیب بیشتر از ۱۵ dB و ۷۰ درصد باشد. بنابراین در این مطالعه، مقادیر SNR و COR در ابتدای آزمایش مورد بررسی قرار گرفتند و در محدوده قابل قبول یافت شدند. داده‌های برداشت‌شده براساس این محدوده فیلتر گردیدند.

**آنالیز کوادرانت**

فرایند خودانفجار شامل چهار نوع رخداد است. این فرایندها براساس آنالیز کوادرانت در صفحه u'-w'، بدین صورت طبقه‌بندی می‌شوند: برهم‌کنش بیرونی (u'>۰، w'>۰)، پرتابی (u'<۰، w'>۰)، برهم‌کنش درونی (u'<۰، w'<۰) و جاروبی (u'>۰، w'<۰) (Cellino and Lemmin, 2004; Yue et al., 2007; Maity and Mazumder, 2012, Izadinia et al., 2013; Dey et al., 2018b; Izadinia and Heidarpour, 2019). u' و w' به شرح زیر تعریف می‌شوند:

$$u' = u - \bar{u} \quad (۱)$$

$$w' = w - \bar{w} \quad (۲)$$

درجایی‌که u و w سرعت‌های لحظه‌ای در جهت‌های طولی و عمودی‌اند، $\bar{u}$ و $\bar{w}$ به‌ترتیب سرعت متوسط زمانی در جهت‌های طولی و عمودی هستند. u' و w' نیز به‌ترتیب نوسانات سرعت در جهات طولی و عمودی است. میانگین سرعت زمانی نیز بدین صورت تعیین می‌شود:

$$\bar{u} = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N} u_i \quad (۳)$$

$$\bar{w} = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N} w_i \quad (۴)$$

که N تعداد نمونه‌های سرعت لحظه‌ای است. چهار ربع مشخص‌شده برای نوسانات سرعت و رخدادهای خودانفجار وابسته در شکل (۵) نشان داده شده است.

چهار نوع رخداد خودانفجار اثرات متفاوتی بر میزان و مکانسیم‌های حمل رسوب در یک جریان آشفته دارند. رخداد پرتابی توسط حرکت رو به بالا با جریان با سرعت کم مشخص می‌شود، زیرا سرعت لحظه‌ای کمتر از سرعت متوسط زمانی است. با همین تعریف، رخداد جاروبی یک حرکت روبه‌پایین با جریان با سرعت زیاد به طرف بستر است. بنابراین، رخدادهای خودانفجار در این ربع تاثیر قابل‌توجهی در حمل ذرات به داخل آب در حال جریان دارد (Keshavarzy and Ball, 1997)، درحالی‌که انتقال رسوبات معلق اغلب در طی رخدادهای پرتابی رخ می‌دهد.

**جدول ۱- شرایط جریان در آزمایش‌های تجربی**

**Table 1- Flow conditions in the experimental tests**

| Q ($m^3/s$) | U (m/s) | y (m) | $U/U_c$ | Fr | Re |
|---|---|---|---|---|---|
| 0.05 | 0.292 | 0.19 | 0.92 | 0.214 | 9809 |

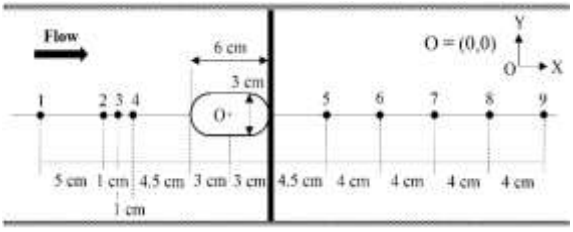



**Fig 4- Points of the velocity measurement**

**شکل ٤- نقاط اندازه‌گیری سرعت**

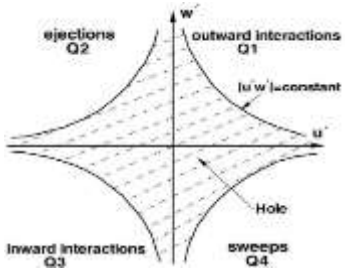



**Fig 5- Bursting events and their associated quadrants**

**شکل ٥- وقایع خودانفجار و ربع‌های وابسته با آن‌ها**

یک حد آستانه یا پارامتر اندازه گودال H در صفحه u'-w' برای آنالیز کوادرانت معرفی شده است. منطقه هاشورخورده در شکل (۵)، Hole نامیده می‌شود که توسط منحنی زیر تعیین می‌شود:

$$|u'w'| = H.\sqrt{\overline{u'^2}}.\sqrt{\overline{w'^2}} \quad (۵)$$

که H اندازه گودال است. در آنالیز کوادرانت، رخدادهایی که در ناحیه Hole قرار دارند، حذف شده‌اند. مقدار H=۰ نشان می‌دهد که همه u' و w' در آنالیز گنجانده شده‌اند. با افزایش پارامتر H، رخدادهای ضعیف‌تر از بین می‌روند. بنابراین، شناسایی رخدادهای قوی از ضعیف با پارامتر H امکان‌پذیر است. همان‌طور که توسط Nezu و Nakagawa (1993) اشاره شد، پارامتر H، کمابیش به‌طور دلخواه انتخاب می‌شود. در حقیقت سهم هر ربع در تنش برشی رینولدز به‌عنوان تابعی از حد آستانه H بوده است که توسط Dey و Nath (2010) تعریف شده است.

$$\langle u'w' \rangle_{i,H} = \lim_{t\to\infty} \frac{1}{T} \int_0^T u'(t)w'(t) I_H^i(y,t) dt \quad (۶)$$

که در آن T فواصل زمانی، y عمق جریان، t متغیر زمان و $I_H^i(y,t)$ تابع تعیین علامت بوده و از رابطه زیر تعیین می‌شود:

$$I_H^i(y,t) = \begin{cases} 1 & when \quad |u'w'| \geq H\left|\overline{u'w'}\right| \\ 0 & otherwise \end{cases} \quad (۷)$$

سهم کسری $S_{i,H}$ به $-\overline{u'w'}$ از هر رخداد از معادله زیر محاسبه می‌شود:

$$S_{i,H} = \frac{\langle u'w' \rangle_{i,H}}{\left|\overline{u'w'}\right|} \quad (۸)$$

برای H=0، مجموع سهم همه رخدادهای خودانفجار برابر با یک است ($\sum_{i=1}^{i=4} S_{i,0} = 1$). احتمال وقوع برای رخداد نوع i، به‌صورت $P_H^i$ بیان می‌شود و از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$P_H^i = \frac{\sum_{t=0}^{t=T_{MEAS}} I_H^i(y,t)}{\sum_{t=0}^{t=T_{MEAS}} \left[I_{H=0}^{i=1}(y,t) + I_{H=0}^{i=2}(y,t) + I_{H=0}^{i=3}(y,t) + I_{H=0}^{i=4}(y,t)\right]} \quad (۹)$$

که در آن $T_{MEAS}$ طول مدت اندازه‌گیری و I تابع تعیین علامت است که از معادله (۷) به‌دست می‌آید (Cellino and Lemmin, 2004).

## نتایج و بحث

این مطالعه به بررسی و تجزیه و تحلیل ساختار جریان در اطراف پایه مستطیلی دماغه گرد با کف‌بند بستر پرداخته است. لذا برای رسیدن به این هدف، آزمایش‌ها روی پایه مستطیلی دماغه گرد با کف‌بند بستر با مشخصات ارایه شده در قبل انجام گردید. خطوط کانتور در اطراف پایه مستطیلی دماغه گرد با کف‌بند بستر و توسعه زمانی آب‌شستگی موضعی در شکل (۶) ارایه شده است. به نظر می‌رسد که در شکل (۶-a) قسمت پایینی گرداب‌های برخاستگی با کفبند در تعامل است و به‌صورت عرضی انحراف می‌یابد. در نتیجه حرکت عرضی گرداب‌های برخاستگی موجب پهن‌تر شدن گودال آب‌شستگی می‌شود. علاوه‌براین انحراف عرضی گرداب‌های برخاستگی دو گودال متقارن در پایین‌دست کفبند ایجاد می‌کند. توسعه زمانی عمق آب‌شستگی در شکل (۶-b) نشان داده شده است. همان‌طور که مشخص است میزان افزایش عمق آب‌شستگی در ابتدای آزمایش بسیار زیاد بوده و با گذشت زمان از شدت آن کاسته می‌شود، به‌طوری‌که به شرایط تعادل نزدیک می‌شود. پس از برقراری شرایط تعادل، بستر آزمایش تثبیت گردید و برای داده‌برداری نوسانات سرعت توسط دستگاه ADV آماده شد. داده‌برداری نوسانات سرعت توسط دستگاه ADV در محور مرکزی کانال و از بالادست پایه تا پایین‌دست پایه انجام گردید. موقعیت نقاط داده‌برداری در محور مرکزی کانال روی پروفیل طولی بستر در شکل (۷) نشان داده شده است. داده‌برداری نوسانات سرعت در بالادست پایه در چهار نقطه و در پایین‌دست پایه در پنج نقطه انجام شده است. هر کدام از نقاط با یک شماره نام‌گذاری شده‌اند که در ادامه از این شماره‌ها برای توصیف و تجزیه و تحلیل نمودارها استفاده خواهد شد.

### بررسی ساختار جریان در محور مرکزی کانال

بررسی ساختار جریان در اطراف پایه‌ها با بررسی پروفیل‌های سرعت صورت می‌گیرد. بنابراین، نیمرخ‌های سرعت در اطراف پایه مستطیلی دماغه گرد در محور مرکزی کانال برداشت گردید. در سیستم مختصات کارتزین مولفه‌های سه‌بعدی سرعت به‌صورت (u,v,w) می‌باشد که: u مولفه سرعت در راستای طولی (مستقیم)، v مولفه سرعت در راستای عرضی و w مؤلفه سرعت در راستای قائم می‌باشد. مبدا مختصات در مرکز پایه قرار گرفته و جهت مثبت X در جهت جریان می‌باشد. بنابر قانون دست راست محور خارج‌شده از کف دست جهت مثبت محور Y و محور خارج‌شده از انگشت شصت جهت مثبت محور Z را نشان می‌دهد. پروفیل‌های سرعت در بالادست و پایین‌دست پایه با فرض قرارگیری مرکز پایه در مختصات صفر برداشت گردیدند. شروع گودال آب‌شستگی تقریباً در x = −۱۲ cm می‌باشد (شکل ۷).

*DOI:* 10.22055/JISE.2020.32989.1916

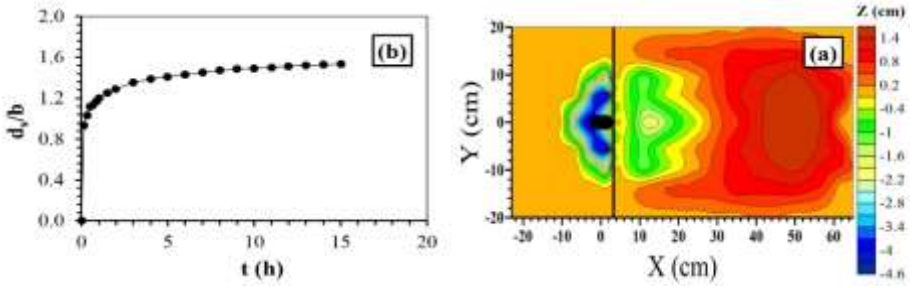



**Fig 6- (a) Contour lines of the equilibrium scour hole around the pier and downstream of the bed sill, (b) Temporal development of local scour**

**شکل ٦- a) خطوط تراز گودال آب‌شستگی متعادل در اطراف پایه و پایین‌دست کف‌بند، b) توسعه زمانی آب‌شستگی موضعی**

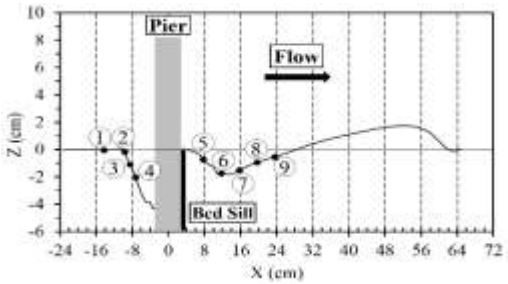



**Fig 7- Location of velocity measurement points on the channel centerline on the bed profile**

**شکل ۷- موقعیت نقاط اندازه‌گیری سرعت در خط مرکزی کانال روی پروفیل بستر**

مؤلفه‌های طولی، عرضی و قائم سرعت نسبی در بالادست پایه در شکل (۸) نشان داده شده است. با توجه به شکل بالا با ورود به محدوده داخل گودال سرعت‌های طولی کاهش می‌یابند و با نزدیک شدن به پایه نیز سرعت‌های طولی در نزدیک بستر منفی می‌شوند که می‌توان این امر را به گرداب‌های اطراف پایه به‌دلیل جریان‌های رفت و برگشتی در اثر برخورد جریان با پایه نسبت داد. در این‌جا به‌دلیل محدودیت داده‌برداری در نزدیک پایه، سرعت‌های منفی مشاهده نگردید. به طورکلی می‌توان بیان نمود که مولفه‌های طولی سرعت در بالادست پایه غالب بوده و به‌ترتیب بیشتر از مؤلفه‌های قائم و عرضی سرعت می‌باشد.

مؤلفه‌های طولی، عرضی و قائم سرعت نسبی در پایین‌دست پایه در شکل (۹) نشان داده شده است. همان‌طور که از شکل مشخص است، سرعت‌های طولی در محدوده درون گودال مقادیر کمتری نسبت به موقعیت‌های دیگر دارد. هم‌چنین به علت کاهش سرعت در خارج از محدوده گودال در پشت پایه، یک جدایی جریان رخ داده است. علاوه‌براین در پشت پایه جریان معکوس به علت محدودیت دستگاه ADV در داده‌برداری اطراف پایه مشاهده نگردید. Sarker (1998) در مطالعه‌های خود در نزدیکی کف حفره جریان معکوس را مشاهده کرده است. با توجه به وجود کفبند در پشت پایه و هم‌چنین براساس شکل (۹) می‌توان بیان نمود که جریان روبه‌پایین قوی‌تری در پشت پایه نسبت به جلوی پایه مشاهده می‌شود. همان‌طور که قبلاً اشاره شده گرداب‌های برخاستگی در تعامل با کفبند بوده و به‌صورت عرضی منحرف می‌شوند. وجود این دو عامل موجب ایجاد دو گودال متقارن در پشت پایه شده است (شکل ۶-a). جریان با خروج از گودال و حرکت به سمت پایین‌دست به شرایط جریان نرمال نزدیک می‌شود.

## پروفیل‌های سرعت

بالادست و پایین‌دست پایه (نقاط چهار و پنج) دو نقطه بحرانی براساس مطالعه‌های قبلی هستند (Izadinia et al. 2013; Izadinia and Heidarpour, 2019). بنابراین این دو نقطه برای بررسی جزییات ساختار جریان برای ادامه در نظر گرفته شده‌اند. نمودارهای مربوط به پروفیل سرعت، قانون لگاریتمی توزیع سرعت، سرعت مطلق و هم‌چنین قانون کولز برای نقطه بالادست و پایین‌دست پایه در شکل (۱۰) نشان داده شده است. همان‌طور که در شکل (۱۰-a۱) و (۱۰-a۳) برای بالادست پایه نشان داده شده است، در محدوده درون گودال و در نزدیکی پایه سرعت معکوس رخ می‌دهد که به علت محدودیت داده‌برداری در اطراف پایه سرعت معکوس در این نقطه مشاهده نگردید. بنابراین وجود یک گرداب نعل اسبی قوی در بالادست پایه و در درون گودال آب‌شستگی مورد تایید می‌باشد. Dey و Raikar (2007) ویژگی‌های گرداب نعل اسبی در بالادست پایه را در مراحل مختلف در طی پیشرفت فرایند آب‌شستگی بررسی کردند. آن‌ها برای پایه دایره‌ای اظهار داشتند که حداکثر جریان روبه‌پایین بسیار نزدیک به بالادست پایه در گودال آب‌شستگی متعادل اتفاق می‌افتد. شکل (۱۰) نشان می‌دهد که با افزایش فاصله از بستر مولفه سرعت جریان در گودال آب‌شستگی افزایش می‌یابد و در خارج از گودال آب‌شستگی نیمرخ سرعت یکنواخت می‌شود.

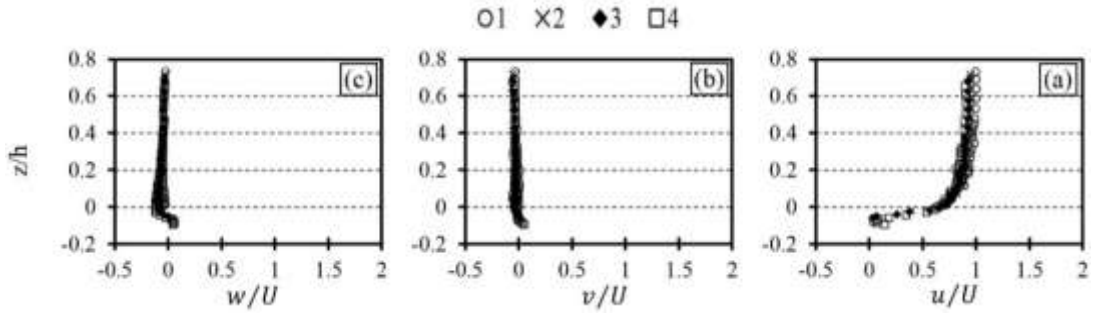



**Fig 8- Velocity profiles at upstream of the pier in directions: (a) streamwise, (b) vertical, and (c) transverse**

**شکل ۸- پروفیل‌های سرعت در بالادست پایه در جهت‌های: a) مستقیم، b) عمودی، و c) عرضی**

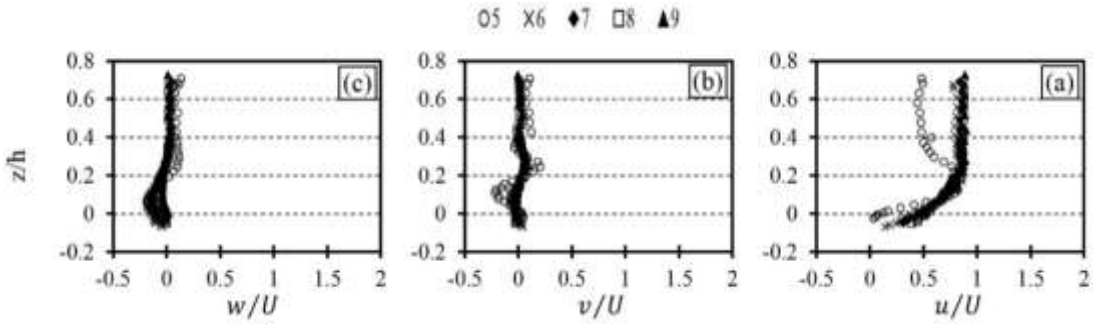



**Fig 9- Velocity profiles at downstream of the pier in directions: (a) streamwise, (b) vertical, and (c) transverse**

**شکل ۹- پروفیل‌های سرعت در پایین‌دست پایه در جهت‌های: a) مستقیم، b) عمودی، و c) عرضی**

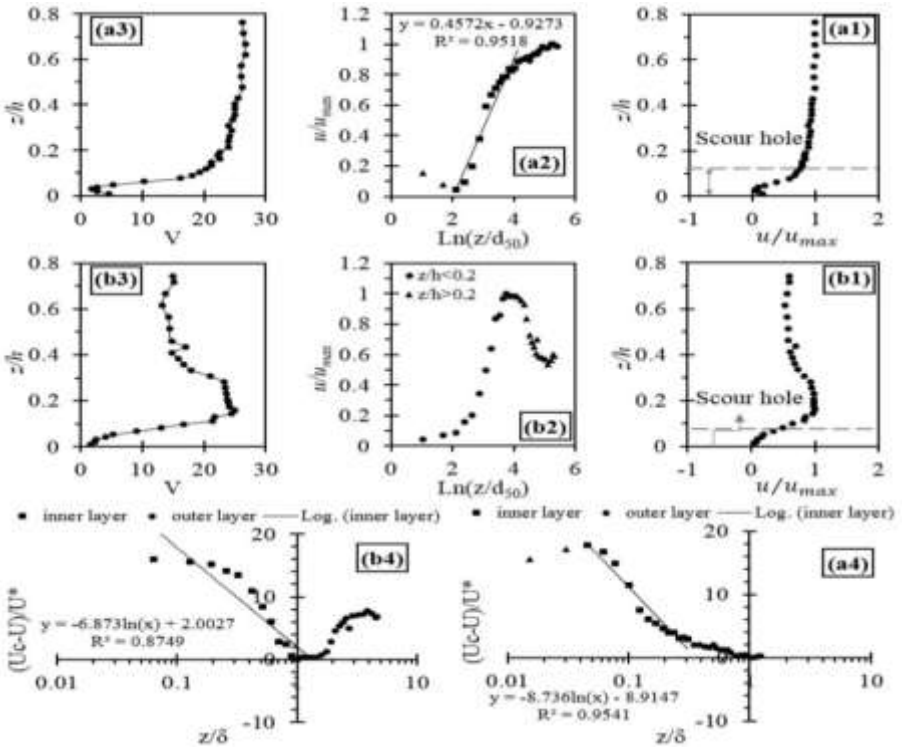



**Fig 10- Numbers 1 to 4, respectively, velocity profile, logarithmic law of velocity distribution, absolute velocity and Coles' law for: (a) upstream of the pier, (b) downstream of the pier**

**شکل ۱۰- شماره‌های ۱ تا ٤ به‌ترتیب پروفیل سرعت، قانون لگاریتمی توزیع سرعت، سرعت مطلق و قانون کولز برای: a) بالادست پایه، b) پایین‌دست پایه**

*DOI:* 10.22055/JISE.2020.32989.1916

برای نسبت عرض فلوم به عمق جریان (نسبت ظاهری) کمتر از پنج، پدیده دیپ (Dip) در نیمرخ‌های سرعت روی بستر هموار توسط Nezu et al. (1989) و روی بستر زبر توسط Kironoto و Graf (1994) مشاهده شده است. Graf و Altinakar (1998) استنباط کردند که جریان‌های ثانویه باعث پدیده دیپ پروفیل‌های سرعت می‌شوند. آن‌ها نشان دادند که برای نسبت ظاهری بیشتر از پنج، حداکثر سرعت جریان در سطح آب رخ می‌دهد و اثر جریان‌های ثانویه را می تواند از بین ببرد. درحالی‌که برای نسبت ظاهری کمتر از پنج، تاثیر جریان ثانویه معنی‌دار بوده و حداکثر سرعت در زیر سطح آب اتفاق می‌افتد. در مطالعه حاضر نسبت ظاهری کمتر از پنج است (W/h = ۴/۷۵). علاوه‌براین وجود پایه در جریان، جریان‌های ثانویه را تشدید می‌کند و موقعیت حداکثر سرعت را به سمت بستر جابه‌جا می‌کند.

در پایین‌دست پایه سرعت افزایش پیدا می‌کند و نزدیک به حداکثر مقدار خود، تقریباً در z/h=۰/۱۵ در بیرون از گودال آب‌شستگی می‌رسد (شکل ۱۰-b۱ و ۱۰-b۳). در این منطقه پدیده وارونگی سرعت در بیرون از گودال و به سمت سطح آب رخ می‌دهد. با مقایسه حداکثر سرعت در بالادست و پایین‌دست پایه، می‌توان نتیجه گرفت که جریان‌های ثانویه در پایین‌دست پایه قابل توجه‌تر هستند، زیرا حداکثر سرعت در نزدیکی بستر در این منطقه رخ می‌دهد.

سرعت مطلق متوسط زمانی $[V=(u^2+v^2+w^2)^{0.5}]$ در بالادست و پایین‌دست پایه در شکل (۱۰-a۳) و (۱۰-b۳) نشان داده شده است. نمودارها وجود یک جریان آشفته پیچیده را در بالادست و پایین‌دست پایه نشان می‌دهد. در محدوده بالای گودال آب‌شستگی در بالادست پایه سرعت مطلق V یکنواخت است و جریان گردابی مشاهده نمی‌شود. با کاهش فاصله از بستر، شدت جریان روبه‌پایین افزایش می‌یابد. جریان معکوس در بالادست پایه (درون گودال آب‌شستگی) به علت محدودیت داده‌برداری با ADV و در پایین‌دست پایه (بالای گودال آب‌شستگی) به علت وجود کفبند و محدودیت داده‌برداری با ADV مشاهده نگردید. Izadinia et al. (2013) جریان معکوس را در این دو منطقه در پایه استوانه‌ای بدون عامل حفاظتی مشاهده کردند.

در جریان‌های یکنواخت، قانون لگاریتمی می‌تواند نیمرخ‌های سرعت را برای لایه داخلی (z/h ≤ ۰/۲) توصیف کند (Graf and Altinakar, 1998).

$$\frac{u(z)}{u_*}=\frac{1}{K}\ln\left(\frac{z}{k_s}\right)+B_R \qquad (۱۰)$$

که $u_*$ سرعت برشی، $k_s$ زبری معادل استاندارد بستر (mm)، ($k_s=d_{50}$=۰/۷۲)، $B_R$ ثابت انتگرال و K ثابت ون کارمن است (K=۰/۴). در بالادست پایه جریان معکوس در نزدیکی بستر رخ می‌دهد. با نزدیک شدن به سطح آب مؤلفه سرعت جریان در گودال آب‌شستگی مثبت است. قانون لگاریتمی عمومی برای این قسمت معتبر است (شکل ۱۰-a۲). نیمرخ سرعت در گودال آب‌شستگی پس از حذف سرعت‌های منفی در لایه داخلی که در منطقه جدایی در نزدیکی بستر رخ می‌دهد، لگاریتمی می‌شود. همان‌طور که در شکل (۱۰-b۲) نشان داده شده است توزیع لگاریتمی در پایین‌دست پایه معتبر نیست.

Coles (1956) به‌دلیل عدم اعتبار قانون لگاریتمی در لایه خارجی و انحراف داده‌ها از این قانون، تابع برخاستگی را برای اصلاح انحراف سرعت از قانون لگاریتمی در لایه خارجی پروفیل سرعت، به قانون لگاریتمی اضافه کرد که تحت عنوان قانون کولز شناخته می‌شود. قانون لگاریتمی با افزودن تابع برخاستگی در رابطه (۱۱) ارایه شده است.

$$\frac{U_c-U}{U_*}=-\frac{1}{K}\ln\frac{z}{\delta}+\frac{2\Pi}{K}\left(\cos\frac{\pi z}{2\delta}\right)^2 \qquad (۱۱)$$

که $U_c$ حداکثر سرعت در پروفیل سرعت، z فاصله هر نقطه از بستر در پروفیل سرعت، $\delta$ ضخامت لایه مرزی از بستر تا نقطه‌ای که حداکثر سرعت رخ می‌دهد، $\Pi$ پارامتر کولز می‌باشند. در شکل‌های (۱۰-a۴) و (۱۰-b۴) قانون کولز به‌ترتیب برای پروفیل‌های سرعت در بالادست و پایین‌دست ارایه‌شده است. برای محاسبه تابع برخاستگی، مقادیر $\frac{U_c-U}{U_*}$ در مقابل $\frac{z}{\delta}$ ترسیم گردید و در مقیاس لگاریتمی خطی بر لایه داخلی برازش داده شد. محل تقاطع امتداد این خط در لایه خارجی با محور عمودی در $\frac{z}{\delta}=1$ برابر با $\frac{2\Pi}{K}$ است که پارامتر کولز $\Pi$ از طریق آن محاسبه می‌شود (Kironoto, 1993). مقدار پارامتر کولز در بالادست پایه برابر ۱/۷۸۳- و در پایین‌دست پایه برابر ۰/۴۰۱ به‌دست آمد. شکل‌های (۱۰-a۴) و (۱۰-b۴) نشان می‌دهد که استفاده از قانون کولز در بالادست پایه با کفبند مناسب است، درحالی‌که در پایین‌دست استفاده از این قانون مناسب به نظر نمی‌رسد.

## شدت آشفتگی

شدت‌های آشفتگی مقادیر نوسانات سرعت (RMS) هستند. پروفیل‌های عمودی شدت‌های آشفتگی در بالادست و پایین‌دست پایه در شکل (۱۱) نشان داده شده است. در بالادست پایه و نزدیک به بستر به علت این‌که جریان معکوس در نزدیکی پایه رخ می‌دهد، RMS(u') تمایل کاهشی دارد. هر سه مولفه شدت‌های آشفتگی تقریباً تا لبه گودال آب‌شستگی افزایش یافته و سپس کاهش می‌یابند و سرانجام به یک مقدار تقریباً ثابتی نزدیک می‌شوند. می‌توان بیان نمود که در گودال آب‌شستگی و در بالادست پایه، با نزدیک شدن به پایه RMS(v') نسبت به RMS(u') و RMS(w') بزرگتر می‌شود. این نشان می‌دهد که جریان‌های ثانویه در این منطقه غالب هستند. این درحالی است که در بالای گودال آب‌شستگی مقادیر RMS(u') به علت کاهش جریان‌های ثانویه و

یکنواختی پروفیل‌های سرعت نسبت به RMS(v') و RMS(w') بزرگتر هستند.

به‌عنوان یک نتیجه از جدایی جریان می‌توان بیان نمود که بیشترین شدت آشفتگی در پایین‌دست پایه قرار دارد. شدت آشفتگی در بالای لبه گودال با افزایش فاصله از بستر کاهش یافته و سپس افزایش می‌یابد. حداکثر شدت‌های آشفتگی راستای طولی و قائم در لبه گودال آب‌شستگی و حداکثر شدت آشفتگی راستای عرضی در نزدیکی سطح آب رخ می‌دهد. کاهش شدت‌های آشفتگی بعد از لبه گودال را می‌توان به کفبند متصل شده به پشت پایه نسبت داد که موجب کاهش آب‌شستگی شده است. Izadinia et al. (2013) نشان دادند که در بالای لبه گودال آب‌شستگی در پایه بدون اقدامات حفاظتی شدت‌های آشفتگی ابتدا افزایش و سپس کاهش می‌یابند. در پایین‌دست پایه و روی کل عمق جریان، شدت آشفتگی راستای عرضی به علت جدایی جریان در پایین‌دست پایه و هم‌چنین به علت حاکم بودن گرداب‌های برخاستگی در این ناحیه نسبت به جهت‌های مستقیم و عمودی قوی‌تر است. ازآنجایی‌که RMS(v') در پایین‌دست پایه قوی‌تر است، جریان‌های ثانویه بیشتر در این ناحیه غالب هستند. در نتیجه، در پایین‌دست پایه حداکثر سرعت در موقعیتی رخ می‌دهد که به بستر نزدیک است.

**تنش برشی رینولدز**

جریان آب نزدیک‌شونده توسط پایه مسدود شده است و منجر به جدایی جریان به شکل جریان روبه‌پایین در وجه بالادست پایه و گردش‌های جانبی در امتداد طرفین پایه می‌شود. تغییر در الگوی جریان آب منجر به افزایش تنش برشی رینولدز و در نتیجه آب‌شستگی اطراف پایه می‌شود. شکل (۱۲) توزیع تنش‌های برشی رینولدز ($-\overline{u'w'}$) و ($-\overline{v'w'}$) را در امتداد عمق جریان برای بالادست و پایین‌دست پایه نشان می‌دهد. به‌طورکلی به علت وجود کفبند در پشت پایه، تنش‌های برشی رینولدز ($-\overline{u'w'}$) و ($-\overline{v'w'}$) در پایین‌دست پایه قوی‌تر از بالادست پایه است. برای تنش برشی رینولدز ($-\overline{u'w'}$)، در نزدیکی بستر در بالادست پایه و میانه عمق جریان در پایین‌دست پایه مقادیر منفی یافت شد. شدت نوسانات تنش‌های برشی رینولدز ($-\overline{u'w'}$) و ($-\overline{v'w'}$) در پایین‌دست پایه به علت گرداب‌های برخاستگی ایجادشده بیشتر از بالادست پایه می‌باشد. برای تنش برشی رینولدز ($-\overline{v'w'}$)، در امتداد عمق جریان در بالادست پایه و در نزدیکی بستر در پایین‌دست پایه مقادیر منفی یافت شد. نتایج نشان می‌دهد که مقادیر تنش‌های برشی رینولدز ($-\overline{u'w'}$) و ($-\overline{v'w'}$) در نواحی بالای گودال آب‌شستگی در طرف بالادست پایه تقریباً یکنواخت است.

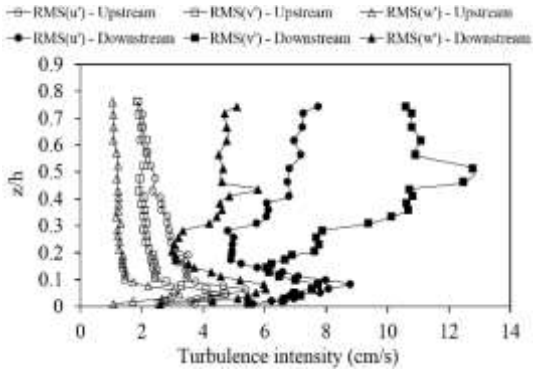



**Fig 11- Profiles of turbulence intensities at upstream and downstream of the pier**

**شکل ۱۱- پروفیل‌های شدت آشفتگی در بالادست و پایین‌دست پایه**

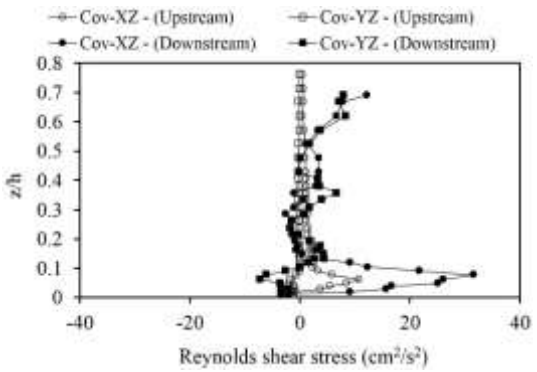



**Fig 12- Profiles of Reynolds shear stress at upstream and downstream of the pier**

**شکل ۱۲- پروفیل‌های تنش برشی رینولدز در بالادست و پایین‌دست پایه**

*DOI:* 10.22055/JISE.2020.32989.1916

**آنالیز کوادرانت**

به‌منظور استفاده از آنالیز کوادرانت برای تعیین سهم هر ربع تنش برشی رینولدز، یک برنامه رایانه‌ای در متلب نوشته شد. سهم کسری $S_{i,H}$ در تنش برشی رینولدز برای هر ربع با تغییر پارامتر H مشخص شد. چندین مقدار برای H در منابع مورد توجه قرار گرفته است. Mazumder et al. (2009) مقادیر H برابر صفر، دو، پنج، شش، ده و ۱۵ را برای آنالیز کوادرانت انتخاب کرده‌اند. Afzalimehr et al. (2011) مقادیر H برابر صفر، یک، دو و سه را برای بررسی مشخصات جریان آشفته در کانال با پوشش گیاهی متراکم در نظر گرفته‌اند. Izadinia et al. (2013) مقادیر H صفر، ده و ۲۰ را برای بررسی تاثیر H بر $S_{i,H}$ در نظر گرفته‌اند. Izadinia و Heidarpour (2019) مقادیر H برابر صفر، پنج، ده، ۱۵ و ۲۰ را برای ارزیابی تاثیر پارامتر H بر $S_{i,H}$ در ایجاد تنش‌های رینولدز در هر یک از کوادرانت‌ها برای تمام عمق جریان در بالادست پایه در نظر گرفته‌اند. طیف گسترده‌ای از مقادیر H برابر صفر، یک، دو، ...، ده، ۱۵ و ۲۰ به‌منظور تشخیص تفاوت‌های بین رخدادهای ضعیف و قوی در فرایند خودانفجار در نظر گرفته شده است. محاسبات در ابتدا برای تمامی وقایع انجام شده است (H=۰)، و سپس به‌تدریج رخدادهای قوی‌تر انتخاب شده‌اند.

پروفیل احتمالات وقوع در بالادست و پایین‌دست پایه برای H=۰ در شکل (۱۳) نشان داده شده است. در داخل گودال برای z/h<۰/۰۳ بیشترین احتمالات وقوع برای برهم‌کنش‌های بیرونی و برهم‌کنش‌های درونی به جای رخدادهای پرتابی و جاروبی یافت می‌شود (شکل ۱۳-a). بنابراین در گودال آب‌شستگی نزدیک بستر جریان انرژی کافی برای انتقال ذرات را ندارد. از این رو رسوب‌گذاری در این منطقه رخ می‌دهد. از نظر بصری در طول آزمایش نیز مشاهده شد که ذرات موجود در گودال آب‌شستگی در نزدیکی بستر از بستر جدا می‌شوند. با این حال آن‌ها نمی‌توانند در طول جریان حرکت کنند و سرانجام به بستر بر می‌گردند. برای z/h>۰/۰۳ رخدادهای غالب جاروبی و پرتابی هستند. در خارج از گودال آب‌شستگی (z/h>۰/۱) نوسانات همه رخدادها در مقایسه با نوسانات آن‌ها در داخل گودال آب‌شستگی متعادل‌تر است. مقدار میانگین رخدادها در تمام عمق در بالادست پایه نشان می‌دهد که رخداد جاروبی بیشترین احتمالات وقوع را دارند. پس از آن به‌ترتیب رخدادهای پرتابی، برهم‌کنش بیرونی و برهم‌کنش درونی بیشترین احتمالات وقوع را دارا می‌باشند. رخداد جاروبی مهم‌ترین رخداد خودانفجار برای حمل ذرات رسوب است و باعث حرکت ذرات به‌صورت غلتش، لغزش و جهش می‌شود. در نتیجه حداکثر عمق آب‌شستگی در سمت بالادست پایه و انتقال رسوبات در جهت پایین‌دست اتفاق می‌افتد.

در پایین‌دست پایه نزدیک بستر شکل (۱۳-b)، رخدادهای برهم‌کنش بیرونی و درونی نسبت به رخدادهای پرتابی و جاروبی بیشترین احتمالات وقوع را دارند. احتمالات وقوع رخدادهای برهم‌کنش بیرونی و درونی در مناطق بیرونی تقریباً یکسان می‌شود. دو رخداد دیگر، پرتابی و جاروبی نیز تقریباً احتمالات وقوع یکسانی دارند. در z/h=۰/۱، احتمالات وقوع رخدادهای پرتابی و جاروبی بیشترین مقدار خود و احتمالات وقوع رخدادهای برهم‌کنش بیرونی و برهم‌کنش درونی کمترین مقدار خود را دارا می‌باشند. به همین علت در پایین‌دست کفبند نیز ذرات فرسایش یافته و موجب ایجاد گودال‌های آب‌شستگی کوچکی می‌شوند. ذرات فرسایش یافته به مناطقی در پایین‌دست انتقال می‌یابند.

تأثیر H بر سهم پارامتر $S_{i,H}$ در تولید تنش برشی رینولدز به ازای مقادیر H برابر صفر، ده و ۲۰ در هر ربع برای کل عمق جریان در بالادست پایه در شکل (۱۴) نشان داده شده است. برای H=۰ (شکل ۱۴-a)، در تمام عمق جریان رخدادهای برهم‌کنش بیرونی و برهم‌کنش درونی غالب هستند. برای z/h>۰/۰۳ برهم‌کنش بیرونی و درونی تقریباً یکسان می‌باشند. نتایج نشان می‌دهد که با افزایش H سهم هر یک از رخدادها در تولید تنش برشی رینولدز به‌یکدیگر نزدیک می‌شود و نوسانات $S_{i,H}$ در سرتاسر عمق جریان کاهش می‌یابد. در منطقه با z/h<۰/۰۳ با افزایش H نوسانات $S_{i,H}$ در سرتاسر عمق جریان در مقایسه با منطقه با z/h>۰/۰۳ سریعتر از بین می‌رود. بنابراین رخدادهای ضعیف بیشتر در z/h<۰/۰۳ غالب هستند.

سهم هر ربع در تنش برشی رینولدز به ازای H برابر صفر، ده و ۲۰ برای کل عمق جریان در پایین‌دست پایه در شکل (۱۵) نشان داده شده است. در پایین‌دست پایه، صرف‌نظر از اندازه H، هم برهم‌کنش بیرونی ($S_{1,H}$) و هم برهم‌کنش درونی ($S_{3,H}$) به‌طور قابل‌توجهی در تنش برشی رینولدز نقش دارند. Izadinia et al. (2013) و Izadinia و Heidarpour (2019) برای یک پایه استوانه‌ای بدون اقدامات حفاظتی بیان داشتند که در پایین‌دست پایه رخدادهای پرتابی و جاروبی نقش مهمی را در تنش برشی رینولدز ایفا می‌کنند. بنابراین کف‌بند در پشت پایه موجب تغییراتی در عوامل مؤثر بر انتقال رسوبات ایجاد می‌کند. به عبارت دیگر غالب بودن سهم رخدادهای برهم‌کنش بیرونی و درونی در پشت عامل اصلی کاهش عمق آب‌شستگی در جلوی پایه نسبت به پایه بدون حفاظ می‌باشد. از طرفی در z/h<۰/۱۵ کفبند باعث تقریباً یکسان شدن سهم هر ربع شده است و در منطقه z/h>۰/۱۵ کفبند موجب تقویت سهم برهم‌کنش بیرونی و برهم‌کنش درونی شده است. اگرچه با افزایش اندازه H، تبعیض بین هر یک از رخدادها در منطقه z/h<۰/۱۵ دشوارتر می‌شود، اما در منطقه z/h>۰/۱۵ رخداد غالب برهم‌کنش درونی ($S_{3,H}$) است و به دنبال آن رخداد برهم‌کنش بیرونی ($S_{1,H}$) قرار دارد. در پایین‌دست پایه، نوسانات $S_{i,H}$ در سرتاسر عمق جریان در مقایسه با طرف بالادست پایه قوی‌تر است. می‌توان نتیجه گرفت که با افزایش اندازه H رخدادهای ضعیف در پایین‌دست پایه برخلاف بالادست پایه کاملاً حذف نمی‌شوند.

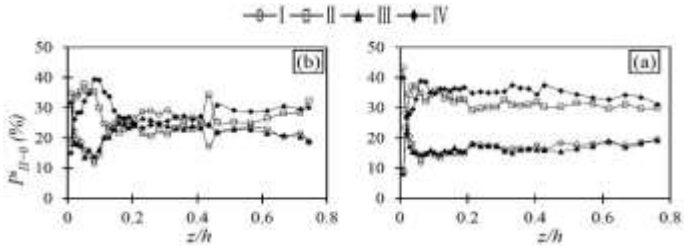



**Fig 13- Occurrence probability of bursting event for each quadrant (I, II, III, IV); (a) upstream of the pier, (b) downstream of the pier**

**شکل ۱۳- احتمال وقوع وقایع خودانفجار برای هر ربع (I، II، III، IV): a) بالادست پایه، b) پایین‌دست پایه**

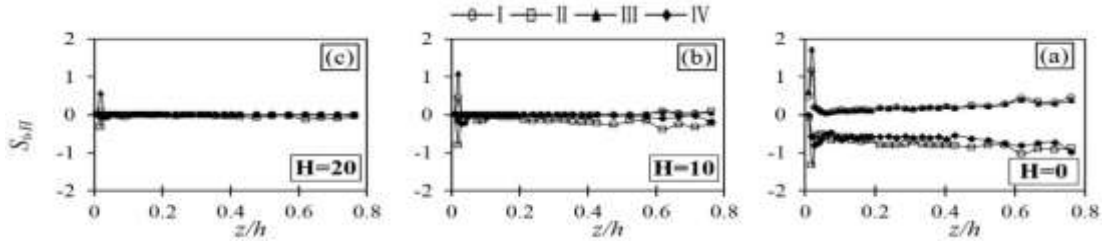



**Fig 14- $S_{i,H}$ versus z/h for different values of H upstream of the pier for each quadrant (I, II, III, IV)**

**شکل ۱۴- $S_{i,H}$ در مقابل z/h برای مقادیر مختلف H در بالادست پایه برای هر ربع (I، II، III، IV)**

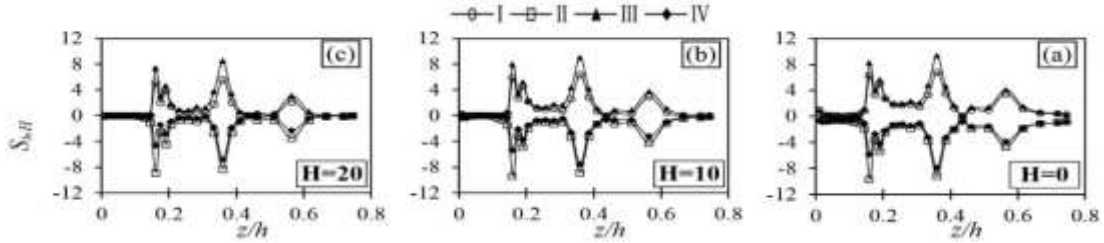



**Fig 15- $S_{i,H}$ versus z/h for different values of H downstream of the pier for each quadrant (I, II, III, IV)**

**شکل ۱۵- $S_{i,H}$ در مقابل z/h برای مقادیر مختلف H در پایین‌دست پایه برای هر ربع (I، II، III، IV)**

تغییرات $|S_{i,H}|$ به‌عنوان تابعی از اندازه H برای هر ربع در z/h=۰/۱ (نزدیک لبه گودال آب‌شستگی) در بالادست و پایین‌دست پایه در شکل (۱۶) نشان داده شده است. در z/h=۰/۱ رخدادهای پرتابی (II) و جاروبی (IV) غالب هستند و رخدادهای برهم‌کنش بیرونی (I) و برهم‌کنش درونی (III) به نظر می‌رسد نقش ضعیف‌تری در تولید تنش برشی رینولدز دارند. نتایج به‌دست‌آمده در بالادست پایه روند یکسانی را با مطالعه Izadinia et al. (2013) و Izadinia و Heidarpour (2019) نشان می‌دهد. به‌طورکلی با افزایش اندازه H سهم هر رخداد در تولید تنش برشی رینولدز اندک می‌شود. در بالادست پایه، رخداد پرتابی ($|S_{2,0}| \approx$ ۰/۶۵) رخداد غالب است و به دنبال آن رخداد جاروبی ($|S_{4,0}| \approx$ ۰/۶) رخداد غالب می‌باشد. سهم رخداد جاروبی در تولید تنش برشی رینولدز به ازای H>۹ قابل صرف نظر کردن می‌باشد، درحالی‌که سهم رخداد پرتابی حتی در H>۲۰ قابل توجه است. سهم رخدادهای برهم‌کنش بیرونی و برهم‌کنش درونی در تولید تنش برشی رینولدز ضعیف است و تقریباً به ازای H>۳ از بین می‌روند.

در پایین‌دست پایه روند نتایج به علت وجود کفبند در پشت پایه و تاثیر آن بر عمق آب‌شستگی و پروفیل بستر متفاوت از نتایج به‌دست‌آمده در مطالعه‌های Izadinia et al. (2013) و Izadinia و Heidarpour (2019) است. نتایج آن‌ها نشان می‌دهد که در پشت پایه سهم رخدادها در تولید تنش برشی رینولدز نسبت به جلوی پایه مهم و قابل توجه‌تر است، درحالی‌که در این مطالعه، استفاده از کف‌بند در پشت پایه نه تنها روندی مشابه با پایه شاهد را ایجاد نکرده است بلکه موجب ضعیف‌تر شدن سهم هر یک از رخدادها نیز شده است. در رخداد پرتابی در H<۶ به‌علت تاثیر همه رخدادهای ضعیف و قوی در آنالیز کوادرانت، سهم این رخداد در تولید تنش برشی رینولدز در بالادست نسبت به پایین‌دست پایه قابل توجه‌تر است. در پایین‌دست پایه، سهم رخداد پرتابی غالب است ($|S_{2,0}| \approx$ ۰/۷) و به دنبال آن جاروبی ($|S_{4,0}| \approx$ ۰/۵) رخداد غالب است. سهم رخدادهای برهم‌کنش بیرونی و درونی در تولید تنش برشی رینولدز در پایین‌دست پایه تقریباً برابر با بالادست پایه است.

*DOI:* 10.22055/JISE.2020.32989.1916

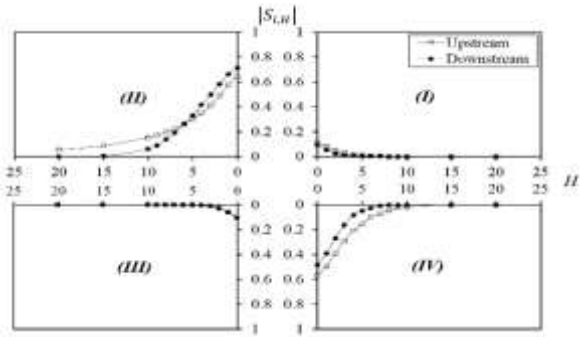



**Fig 16- Variation of $|S_{i,H}|$ with H for z/h=0.1 at upstream and downstream of the pier for each quadrant (I, II, III, IV)**

**شکل ۱۶- تغییرات $|S_{i,H}|$ به ازای H برای z/h=۰/۱ در بالادست و پایین‌دست پایه برای هر ربع (I، II، III، IV)**

## نتیجه‌گیری

بررسی ساختار جریان آشفته در گودال آب‌شستگی برای درک درست حمل و انتقال ذرات رسوب مهم است. لذا در مطالعه حاضر، ماهیت تصادفی ساختار جریان آشفته در اطراف پایه مستطیلی دماغه گرد پل با کفبند مورد بررسی قرار گرفته است. گرداب‌های برخاستگی به علت جدایی جریان در پایین‌دست پایه ایجاد می‌شوند و به علت تعامل با کفبند به‌صورت عرضی نیز انحراف می‌یابند. انحراف عرضی گرداب‌های برخاستگی موجب عریض‌تر شدن گودال آب‌شستگی شده و هم‌چنین دو گودال متقارن را در پایین‌دست کفبند ایجاد می‌کند. اندازه‌گیری‌ها نشان می‌دهد که در بالادست پایه حداکثر سرعت تقریباً بالای لبه گودال آب‌شستگی رخ می‌دهد. در خارج از گودال آب‌شستگی نیمرخ سرعت تقریباً یکنواخت می‌شود. قانون لگاریتمی سرعت برای نیمرخ عمودی مولفه طولی سرعت در بالادست پایه برقرار می‌باشد. مشخص شد که جریان‌های ثانویه در پایین‌دست پایه به‌علت این‌که حداکثر سرعت نزدیک به بستر رخ می‌دهد، قابل توجه‌تر هستند. به همین ترتیب RMS ($v'$) در این منطقه قوی‌تر است. نتایج آنالیز کوادرانت نشان می‌دهد که در بالادست پایه و در نزدیکی بستر، احتمالات وقوع رخدادهای برهم‌کنش بیرونی و برهم‌کنش درونی غالب هستند. با افزایش فاصله از بستر به‌علت پدیده وارونگی سرعت در نزدیکی بستر، احتمالات وقوع رخدادهای پرتابی و جاروبی غالب می‌شوند. در داخل گودال آب‌شستگی نزدیک بستر، جریان انرژی کافی برای انتقال ذرات را ندارد؛ از این رو در این منطقه ذرات از بستر بلند می‌شوند اما نمی‌توانند در طول جریان حرکت کنند و سرانجام به بستر بر می‌گردند. با میانگین‌گیری از احتمالات وقوع در تمام عمق در بالادست پایه، مشخص گردید که رخداد جاروبی بیشترین احتمال وقوع را نسبت به سایر رخدادها دارد و پس‌ازآن به‌ترتیب رخدادهای پرتابی، برهم‌کنش بیرونی و برهم‌کنش درونی بیشترین احتمالات وقوع را دارا می‌باشند. ازآنجایی‌که رخداد جاروبی پدیده غالب در بالادست پایه می‌باشد، حداکثر عمق آب‌شستگی در این منطقه اتفاق می‌افتد و رسوبات فرسایش‌یافته در جهت پایین‌دست منتقل می‌شوند. نتایج آنالیز کوادرانت نشان داد که با افزایش مقدار H در ناحیه $z/h<۰/۰۳$ نوسانات $S_{i,H}$ سریعتر از ناحیه $z/h>۰/۰۳$ از بین می‌روند. بنابراین رخدادهای ضعیف بیشتر در $z/h<۰/۰۳$ قرار دارند. در پایین‌دست پایه برهم‌کنش بیرونی ($S_{1,H}$) و برهم‌کنش درونی ($S_{3,H}$) به‌علت وجود کف‌بند در این منطقه نقش مهم‌تری را نسبت به پرتابی ($S_{2,H}$) و جاروبی ($S_{4,H}$) در تنش برشی رینولدز ایفا می‌کنند. بررسی تغییرات $|S_{i,H}|$ با H در بالادست و پایین‌دست پایه نشان می‌دهد که به‌طورکلی سهم هر یک از رخدادها در تولید تنش برشی رینولدز در پایین‌دست پایه به علت وجود کفبند ضعیف‌تر است.

## تشکر و قدردانی

بدین ترتیب نویسندگان از مسئول آزمایشگاه که ما را در این مسیر همراهی کرد، تشکر می‌کنند.

## تضاد منافع نویسندگان

نویسندگان این مقاله اعلام می‌دارند که هیچ گونه تضاد منافعی در خصوص نگارش و انتشار مطالب و نتایج این پژوهش ندارند.

## منابع مالی

نویسنده (نویسندگان) هیچ گونه حمایت مالی برای تحقیق، تالیف و انتشار این مقاله دریافت نکردند.

## دسترسی به داده‌ها

همه اطلاعات و نتایج در متن مقاله ارائه شده است.

## مشارکت نویسندگان

**نویسنده اول:** احسان سندگل، انجام آزمایشات و تجزیه و تحلیل بخشی از داده ها مقاله

**نویسنده دوم:** منوچهر حیدرپور، کنترل داده و تجزیه و تحلیل داده ها و راهنمایی نگارش مقاله

**نویسنده سوم:** رضا محمدپور قلاتی، بررسی مقاله

**References**

1- Afzalimehr, H., Moghbel, R., Gallichand, J., & Sui, J., 2011. Investigation of turbulence characteristics in channel with dense vegetation. International Journal of Sediment Research, 26(3), 269-282. https://doi.org/10.1016/S1001-6279(11)60093-0

2- Barbhuiya, A.K., & Dey, S., 2004. Local scour at abutments: A review. Sadhana, 29(5), 449-476.

3- Breusers, H.N.C., & Raudkivi, A.J., 1991. Scouring. IAHR Hydraulic Structures Design Manual 2. AA Balkema, Rotterdam, The Netherlands.

4- Cellino, M., & Lemmin, U., 2004. Influence of coherent flow structures on the dynamics of suspended sediment transport in open-channel flow. Journal of Hydraulic Engineering, 130(11), 1077-1088. https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(2004)130:11(1077)

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

6- Coles, D., 1956. The law of the wake in the turbulent boundary layer. Journal of Fluid Mechanics, 1(2), 191-226. https://doi.org/10.1017/S0022112056000135.

7- Dey, S., & Barbhuiya, A.K., 2004. Clear-water scour at abutments in thinly armored beds. Journal of Hydraulic Engineering, 130(7), 622-634. https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(2004)130:7(622).

8- Dey, S., & Nath, T.K., 2010. Turbulence characteristics in flows subjected to boundary injection and suction. Journal of Engineering Mechanics, 136(7), 877-888. https://doi.org/10.1061/(ASCE)EM.1943-7889.0000124.

9- Dey, S., & Raikar, R.V., 2007. Characteristics of horseshoe vortex in developing scour holes at piers. Journal of Hydraulic Engineering, 133(4), 399-413. https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(2007)133:4(399).

10- Dey, S., Swargiary, D., Sarkar, S., Fang, H., & Gaudio, R., 2018a. Self-similarity in turbulent wall-wake flow downstream of a wall-mounted vertical cylinder. Journal of Hydraulic Engineering, 144(6), 04018021. https://doi.org/10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.0001457

11- Dey, S., Swargiary, D., Sarkar, S., Fang, H. and Gaudio, R., 2018b. Turbulence features in a wall-wake flow downstream of a wall-mounted vertical cylinder. *European Journal of Mechanics-B/Fluids*, *69*, pp.46-61. https://doi.org/10.1016/j.euromechflu.2018.01.003.

12- Drake, T.G., Shreve, R.L., Dietrich, W.E., Whiting, P.J. and Leopold, L.B., 1988. Bedload transport of fine gravel observed by motion-picture photography. *Journal of Fluid Mechanics*, *192*, pp.193-217. https://doi.org/10.1017/S0022112088001831.

13- Esfahani, F.S. and Keshavarzi, A., 2011. Effect of different meander curvatures on spatial variation of coherent turbulent flow structure inside ingoing multi-bend river meanders. *Stochastic Environmental Research And Risk Assessment*, *25*(7), pp.913-928.

14- Graf, W.H. and Altinakar, M.S., 1998. *Fluvial hydraulics: Flow and transport processes in channels of Simple Geometry*.

15- Grass, A.J., 1983. The influence of boundary layer turbulence on the mechanics of sediment transport. *Euromech 156: Mechanics of Sediment Transport, Rotterdam: AA Balkema*.

16- Heidarpour, M., Afzalimehr, H. and Izadinia, E., 2010. Reduction of local scour around bridge pier groups using collars. *International Journal of Sediment Research*, *25*(4), pp.411-422. https://doi.org/10.1016/S1001-6279(11)60008-5.

17- Izadinia, E. and Heidarpour, M., 2012. Simultaneous use of cable and collar to prevent local scouring around bridge pier. *International Journal of Sediment Research*, *27*(3), pp.394-401. https://doi.org/10.1016/S1001-6279(12)60044-4.

18- Izadinia, E. and Heidarpour, M., 2019. Study of affective phenomena on sediment transport in local scouring around bridge piers. *Iranian Water Research Journal, 13*(2), pp.105-116. (In Persian).

19- Izadinia, E., Heidarpour, M. and Schleiss, A.J., 2013. Investigation of turbulence flow and sediment entrainment around a bridge pier. *Stochastic Environmental Research And Risk Assessment*, *27*(6), pp.1303-1314.

20- Jafari Mianaei, S. and Keshavarzi, A.R., 2010. Study of near bed stochastic turbulence and sediment entrainment over the ripples at the bed of open channel using image processing technique. *Stochastic Environmental Research And Risk Assessment*, *24*(5), pp.591-598.

21- Keshavarzi, A. and Ball, J., 2011. Transition probability of the coherent turbulent flow around a circular bridge pier. In *World Environmental and Water Resources Congress 2011: Bearing Knowledge for Sustainability* (pp. 2478-2487). https://doi.org/10.1061/41173(414)25.

22- Keshavarzi, A., Melville, B. and Ball, J., 2014. Three-dimensional analysis of coherent turbulent flow structure around a single circular bridge pier. *Environmental Fluid Mechanics*, *14*(4), pp.821-847.

23- Keshavarzi, A., Shrestha, C.K., Zahedani, M.R., Ball, J. and Khabbaz, H., 2017. Experimental study of flow structure around two in-line bridge piers. *Proceedings of The Institution of Civil Engineers-Water Management*, *171*(6), pp.311-327. https://doi.org/10.1680/jwama.16.00104.

24- Keshavarzy, A. and Ball, J.E., 1995. Instantaneous shear stress on the bed in a turbulent open channel flow. In *Proceedings of The Congress-International Association for Hydraulic Research, Local Organizing Committee of the XXV Congress. London.*

25- Keshavarzy, A. and Ball, J.E., 1997. An analysis of the characteristics of rough bed turbulent shear stresses in an open channel. *Stochastic Hydrology and Hydraulics*, *11*(3), pp.193-210.

26- Khaple, S., Hanmaiahgari, P.R., Gaudio, R. and Dey, S., 2017a. Interference of an upstream pier on local scour at downstream piers. *Acta Geophysica*, *65*(1), pp.29-46.

27- Khaple, S., Hanmaiahgari, P.R., Gaudio, R. and Dey, S., 2017b. Splitter plate as a flow-altering pier scour countermeasure. *Acta Geophysica*, *65*(5), pp.957-975.

28- Kironoto, B.A., 1993. Turbulence characteristics of uniform and non-uniform, rough open-channel flow, Thesis, *EPFL*, Lausanne, Switzerland.

29- Kironoto, B.A. and Graf, W.H., 1994. Turbulence characteristics in rough uniform open-channel flow. *Proceedings of The Institution of Civil Engineers-Water Maritime and Energy*, *106*(4), pp.333-344. https://doi.org/10.1680/iwtme.1994.27234.

30- Lagasse, P.F. and Richardson, E.V., 2001. ASCE compendium of stream stability and bridge scour papers. *Journal of Hydraulic Engineering*, *127*(7), pp.531-533. https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(2001)127:7(531).

31- Lu, S.S. and Willmarth, W.W., 1973. Measurements of the structure of the Reynolds stress in a turbulent boundary layer. *Journal of Fluid Mechanics*, *60*(3), pp.481-511. https://doi.org/10.1017/S0022112073000315.

32- Maity, H. and Mazumder, B.S., 2012. Contributions of burst-sweep cycles to Reynolds shear stress over fluvial obstacle marks generated in a laboratory flume. *International Journal of Sediment Research*, 27(3), pp.378-387. https://doi.org/10.1016/S1001-6279(12)60042-0.

33- Mashahir, M.B., Zarrati, A.R. and Mokallaf, E., 2010. Application of riprap and collar to prevent scouring around rectangular bridge piers. *Journal of Hydraulic Engineering*, *136*(3), pp.183-187. https://doi.org/10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.0000145.

34- Masjedi, A., Shafaei-Bejestan, M. and Esfandi, A., 2010. Experimental study on local scour around single oblong pier fitted with a collar in a 180 degree flume bend. *International Journal of Sediment Research*, *25*(3), pp.304-312. https://doi.org/10.1016/S1001-6279(10)60047-9.

35- Mazumder, B.S., Pal, D.K., Ghoshal, K. and Ojha, S.P., 2009. Turbulence statistics of flow over isolated scalene and isosceles triangular-shaped bedforms. *Journal of Hydraulic Research*, *47*(5), pp.626-637.

36- Melville, B.W. and Coleman, S.E., 2000. *Bridge scour*. Water Resources Publication.

37- Moreno, M., Birjukova, O., Grimaldi, C., Gaudio, R. and Cardoso, A.H., 2017. Experimental study on local scouring at pile-supported piers. *Acta Geophysica*, *65*(3), pp.411-421.

38- Nelson, J.M., Shreve, R.L., McLean, S.R. and Drake, T.G., 1995. Role of near-bed turbulence structure in bed load transport and bed form mechanics. *Water Resources Research*, *31*(8), pp.2071-2086. https://doi.org/10.1029/95WR00976.

39- Nezu, I. and Nakagawa, H., 1993. *Turbulence in Open Channel Flows.* IAHR Monograph, Balkema, Rotterdam.

40- Nezu, I., Nakagawa, H. and Rodi, W., 1989. Significant difference between secondary currents in closed channels and narrow open channels. In *The 23rd IAHR congress, Ottawa, Canada*.

41- Raudkivi, A.J. and Ettema, R., 1983. Clear-water scour at cylindrical piers. *Journal of Hydraulic Engineering*, *109*(3), pp.338-350. https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(1983)109:3(338.

42- Raudkivi, A.J., 1990. *Loose Boundary Hydraulics 3rd Edition*. Technical report, Pergamon Press, Oxford.

43- Sarker, M.A., 1998. Flow measurement around scoured bridge piers using Acoustic-Doppler Velocimeter (ADV). *Flow Measurement And Instrumentation*, *9*(4), pp.217-227. https://doi.org/10.1016/S0955-5986(98)00028-4.

44- Thorne, P.D., Williams, J.J. and Heathershaw, A.D., 1989. In situ acoustic measurements of marine gravel threshold and transport. *Sedimentology*, *36*(1), pp.61-74. https://doi.org/10.1111/j.1365-3091.1989.tb00820.x.

45- Vittal, N., Kothyari, U.C. and Haghighat, M., 1994. Clear-water scour around bridge pier group. *Journal of Hydraulic Engineering*, *120*(11), pp.1309-1318. https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(1994)120:11(1309).

46- Williams, J.J., 1990. Video observations of marine gravel transport. *Geo-Marine Letters*, *10*(3), pp.157-164.

47- Yue, W., Meneveau, C., Parlange, M.B., Zhu, W., Van Hout, R. and Katz, J., 2007. A comparative quadrant analysis of turbulence in a plant canopy. *Water Resources Research*, *43*(5), pp.1-14. https://doi.org/10.1029/2006WR005583.

48- Zarrati, A.R., Chamani, M.R., Shafaie, A. and Latifi, M., 2010. Scour countermeasures for cylindrical piers using riprap and combination of collar and riprap. *International Journal of Sediment Research*, *25*(3), pp.313-322. https://doi.org/10.1016/S1001-6279(10)60048-0.

49- Zarrati, A.R., Gholami, H. and Mashahir, M.B., 2004. Application of collar to control scouring around rectangular bridge piers. *Journal of Hydraulic Research*, *42*(1), pp.97-103. https://doi.org/10.1080/00221686.2004.9641188.