

**EXTENDED ABSTRACT**

## **Mean Flow Structure and Local Scour around Single and Two-Column Bridge Piers**

A. Keshavarzi<sup>1\*</sup>, H. Hamidifar<sup>2</sup> and L. Khajehnouri<sup>3</sup>

1\* - Corresponding Author, Professor, Water Engineering Department, Shiraz University, Shiraz, Iran (*keshavrz@shirazu.ac.ir*).

2- Assistant professor, Water Engineering Department, Shiraz University, Shiraz, Iran.

3- MSc of Hydraulic Structures, Water Engineering Department, Shiraz University, Shiraz, Iran.

Received: 22 October 2017

Revised: 19 January 2018

Accepted: 22 January 2018

**Keywords:** Erosion, Sediment, River, Flow velocity, Flood. **DOI:** 10.22055/jise.2018.22861.1631.

### **Introduction**

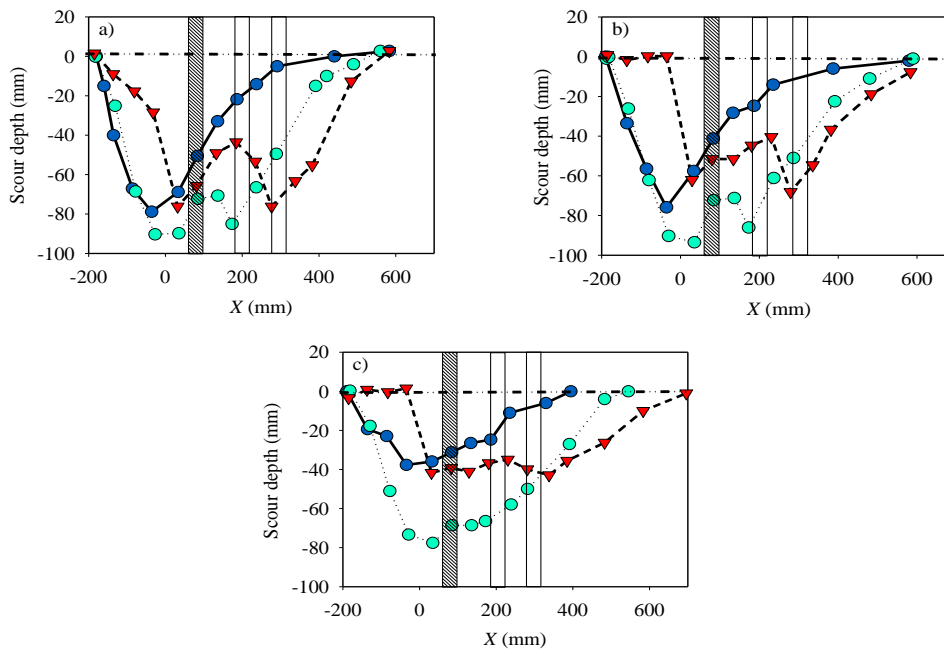
Bridges constructed across rivers are among the most important structures, especially during and after flood events. Bridge piers are exposed to some hazardous factors such as local and contraction scour hydrodynamics. The lower prediction of maximum scour depth can cause bridge failure, while over-prediction leads to a very costly project. The appropriate estimation of maximum scour depth around bridge piers is, thus, necessary. In some bridges, more than a single pier is considered during the design phase, and the interaction between the adjacent piers makes the situation very different. The flow structure and scour process around a group of bridge piers are, indeed, very different from a single bridge pier. Many researchers have studied the scour around single and/or multiple-column bridge piers. For instance, studying the scour depth for a group of piers, Mahjub et al. (2014) reported that the maximum scour depth around the second bridge pier was less than that of the upstream pier, while the scour depth around the third pier was lower than that of the first and second piers. Moreover, Daneshfaraz et al. (2014) investigated the effect of pier slots on the maximum scour depth around the two-column bridge piers. The results that the slot reduced the maximum scour depth compared to the piers without a slot. In this paper, the flow and bed topography around a group of piers was studied experimentally.

### **Methodology**

A laboratory flume of 15 m length, 0.7 m width and 0.6 m height was used in the experiments. The bridge piers were built of steel pipes and were installed at the bed of a flume in three patterns. In the first model, the pier was installed individually and the flow structure was investigated accordingly. In the second and third models, two piers were installed in the flow direction with a distance of 0.20 m and 0.30 m, respectively. The bed of the flume was covered with the sand particle of 0.63 mm medium diameter. In turn, the bed scouring around the piers was investigated in a different flow condition. The experiments were, then, carried out with different longitudinal distance between the piers to investigate the effect of pier distance on the flow field and local scour depth. The streamwise, lateral and vertical components of the mean flow velocity within the scour hole around the piers were, in turn, measured at four different distance of 10, 15, 20 and 25 mm to the bed using a micro-ADV. The Micro-ADV enabled us to capture the flow velocity with a rate of 50 samples per second. Therefore, in a 120-second duration, 6000 velocity samples were totally captured and saved for one point of flow. From the captured velocity data, the time averaged velocity and the Reynolds Shear Stress of the flow were computed.

**Results and Discussion**

As shown in Figure (1), the results showed that the interaction between the two-column piers increased the maximum scour depth around the pier for the two-column piers with a smaller distance (model M2). Besides, the lateral extension of the scour hole for the model M2 was greater than the single pier and two-column pier with a larger distance. The results also showed that in the three physical models, the variation of longitudinal component of the flow velocity,  $V_x$ , was similar to the pattern of bed scouring, and the maximum downward flow direction was found to be at the upstream of the piers. From the profile of the bed scouring, it was observed that the bed scouring occurred at a distance equal to the one-pier diameter from the upstream to the three-pier diameter in the downstream of the pier. Moreover, the maximum bed scouring occurred in the upstream of the piers at a distance equal to the one-time-pier diameter.



**Fig. 1- Longitudinal profile of the scour hole in different models, a)section A, b) section B, and c) section C, (●Model M1, ● Model M2, ▼ Model M3)**

**Table 1- Percentage error of different models for the prediction of maximum scour depth around the single and two-column bridge piers**

<i>Model</i>	<i>Equation for prediction of scour depth</i>	<i>PE (%)</i>
<i>M1</i>	Laursen (clear water)	-98
	Laursen (live bed)	19
	CSU	113
	Froehlich	-41
<i>M2</i>	Laursen (clear water)	-98
	Laursen (live bed)	12
	CSU	67
	Froehlich	-20
<i>M3</i>	Laursen (clear water)	-98
	Laursen (live bed)	14
	CSU	99
	Froehlich	-7

**Conclusions**

The distance between the two-column piers was found to affect the mean flow field and scour hole dimensions significantly, which should be considered in the design phase. Further, a comparison was made among some common empirical models for the prediction of the maximum scour depth around the single and two-column bridge piers (Table 1).

**Acknowledgement**

The authors wish to acknowledge the help and assistance of the staff of the Sediment Hydraulics Laboratory at Shiraz University.

**References**

- 1- Mahjoob, B., Mohammadnezhad, B. and Behmanesh, J. 2014. Numerical modeling of local scouring around group bridge piers and compared with experimental results. *Journal of Water and Soil*, 28(2): 267-275.
- 2- Daneshfaraz, R., Ashrafi, S. and Nezafat, H. 2014. Numerical analysis on the effect of slot on the maximum scour depth around a group of bridge piers. 10<sup>th</sup> International Congress on Civil Engineering, Tabriz University, Tabriz, Iran.



© 2019 by the authors. Licensee SCU, Ahvaz, Iran. This article 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/>).



## ساختار جریان و آبستگي موضعي در اطراف پایه‌های پل تکی و دوتایی

علیرضا کشاورزی<sup>۱</sup>، حسین حمیدی‌فر<sup>۲</sup> و لیلا خواجه‌نوری<sup>۳</sup>

<sup>۱-۳</sup> نویسنده مسئول، استاد، بخش مهندسی آب، دانشگاه شیراز، keshavrz@shirazu.ac.ir

<sup>۲</sup> -استادیار سازه‌های آبی، بخش مهندسی آب، دانشگاه شیراز.

<sup>۳</sup> -کارشناس ارشد سازه‌های آبی، بخش مهندسی آب، دانشگاه شیراز.

پذیرش: ۱۳۹۶/۱۱/۲

بازنگری: ۱۳۹۶/۱۰/۲۹

دریافت: ۱۳۹۶/۷/۳۰

### چکیده

در این تحقیق به بررسی آزمایشگاهی ساختار جریان در اطراف پایه‌های پل استوانه‌ای پرداخته شده است. به منظور بررسی اثر فاصله پایه‌های پل بر آبستگي و ساختار جریان پیرامون پایه، آزمایش‌هایی در حالت‌های تک پایه و دو پایه با دو فاصله متفاوت نسبت به هم در یک فلوم آزمایشگاهی به طول ۱۵، عرض ۰/۷ و ارتفاع ۰/۶ متر انجام شده است. مؤلفه‌های طولی، عرضی و عمقی سرعت متوسط جریان در حفره آبستگي پیرامون پایه‌ها در شبکه‌ای از نقاط در چهار عمق ۱۰، ۱۵، ۲۰ و ۲۵ میلیمتری از بستر فرسایش یافته با استفاده از یک دستگاه سرعت‌سنج سه‌بعدی صوتی داپلر اندازه‌گیری گردید. بر اساس اطلاعات به دست آمده، تغییرات مؤلفه‌های سرعت در سه مقطع مختلف به تفصیل مورد بحث قرار گرفته است. نتایج نشان می‌دهد که اثر متقابل دو پایه با فاصله کم روی یکدیگر باعث تشدید فرآیند آبستگي در فاصله بین دو پایه و محل پایه دوم گردیده است. همچنین افزایش تعداد پایه‌ها منجر به توسعه عرضی حفره آبستگي و در نتیجه افزایش حجم گودال آبستگي شده است. از طرفی دیگر، تغییرات سرعت و تغییرات شکل حفره روند مشابهی را دنبال می‌کنند. به طور کلی نتایج نشان‌دهنده تأثیر قابل توجه فاصله بین پایه‌ها بر میدان جریان و آبستگي موضعی بستر است که بایستی در مرحله طراحی به دقت مورد توجه قرار گیرد. همچنین، مقایسه‌ای بین دقت برخی مدل‌های متداول در برآورد حداکثر عمق آبستگي در اطراف پایه‌های تکی و دوتایی انجام شده است.

کلید واژه‌ها: فرسایش، رسوب، رودخانه، سرعت جریان، سیلاب.

### مقدمه

دست آمده تقریباً ۱/۶ و ۳/۳ برابر مقادیرشان در ناحیه جریان آزاد در بالادست بود. Zarrati et al. (2006) در بررسی تأثیر طوقه و سنگجین بر کاهش آبستگي اطراف پایه‌های پل، مشاهده کردند که این روش می‌تواند تا ۶۰ درصد عمق آبستگي را کاهش دهد.

Alamatiان و Jafarzadeh (2008) میزان بالا آمدگی جریان در برخورد با پایه پل با شکل‌های مختلف را به صورت عددی بررسی کردند. همچنین Raeisi و Ghomeshi (2014) نتیجه گرفتند که با کاهش قطر دانه‌بندی رسوب بستر، زمان رسیدن به حداکثر میزان عمق آبستگي اطراف پایه پل افزایش می‌یابد. Ranjkesh (2010) ضمن بررسی توسعه‌ی زمانی عمق آبستگي، تأثیر ساختار جریان در آبستگي گروه پایه‌های استوانه‌ای را بررسی نمود. نتایج آزمایش‌های وی نشان داد، عامل حفاظ بودن پایه‌های بالادست باعث کاهش عمق آبستگي در پایه‌های پایین‌دست شده است ولی با افزایش فاصله‌ی بین پایه‌ها این عامل کاهش می‌یابد. Houshmand et al. (2014) جریان اطراف پایه پل در بسترهای پیچانوردی را به صورت عددی مورد بررسی قرار دادند. این محققین مشاهده

برای یافتن اطلاعاتی کامل درباره فرآیندهای فیزیکی مؤثر بر آبستگي پایه‌های پل، پژوهش‌های زیادی انجام شده و در آنها پارامترهای متفاوتی از جریان، هندسه و مصالح بستر در نظر گرفته شده است. نتایج این پژوهش‌ها نشان می‌دهد که پیش‌بینی دقیق آبستگي پیرامون پایه‌های پل مستلزم درکی صحیح از ساختار جریان متلاطم و مکانیزم انتقال رسوبات می‌باشد. بررسی ساختار جریان در حفره آبستگي تشکیل شده پیرامون پایه‌های پل برای نخستین بار توسط Melville و Raudkivi (1977) انجام شد. Richardson و Panchang (1998) یک مدل سه‌بعدی دینامیک سیالات محاسباتی برای شبیه‌سازی جریان نزدیک یک پایه پل و انتقال رسوبات را ارائه دادند. نتایج این شبیه‌سازی عددی با مشاهدات آزمایشگاهی Melville و Raudkivi (1977) مقایسه شد و هر دو سری نتایج از لحاظ کیفی و کمی با هم بسیار تطابق داشتند. بررسی‌های Barbhuiya و Dey (2004) بیانگر وجود یک جریان گردابی اولیه همراه با یک جریان روبه پایین در نزدیکی استوانه می‌باشد. علاوه بر این، در جلو استوانه، سرعت و تنش‌های برشی کف به

و مقطع عرضی مستطیل شکل می‌باشد که شیب طولی آن قابل تغییر است. برای اندازه‌گیری دبی جریان از سرریز لبه تیز مثلثی ۹۰ درجه واسنجی شده که در انتهای فلوم و در مخزن خروجی تعبیه گردیده بود استفاده شد. عمق مورد نظر جهت انجام هر آزمایش بوسیله یک سرریز در انتهای فلوم تنظیم گردید.

در وسط فلوم، بازه‌ای به طول ۲ و ضخامت ۰/۱۲ متر با رسوب پر شده و مدل‌های پایه مورد بررسی در وسط آن قرار داده می‌شد. مدل‌های استفاده شده شامل سه مدل پایه استوانه‌ای با قطر خارجی ۵۰ میلی‌متر از جنس آهن گالوانیزه بود. برای پرهیز از اثر جریان جانبی به وسیله دیواره‌های روی آبشستگی موضعی اطراف پایه، Raudkivi و Ettema (1983) حداکثر نسبت عرض پایه به عرض کانال را  $۱:۶/۲۶$  بیان کرده‌اند. در این پژوهش برای اطمینان بیشتر، این نسبت برابر با  $۱:۱۴$  در نظر گرفته شد. برای حذف تأثیر اندازه ذرات بر عمق آب شستگی موضعی، بر اساس نظر Raudkivi و Ettema (1983) نسبت قطر پایه به میانگین اندازه رسوبات باید بیشتر از ۵۰ باشد. رسوبات مورد استفاده دارای قطر میانگین برابر میلی‌متر  $d_{50} = ۰/۶۳$ ، ضریب یکنواختی  $۱/۵۸$  و مقدار انحراف معیار هندسی نیز برابر  $۱/۰۰۳$  می‌باشد که با معیار مذکور هم‌خوانی دارد.

بر اساس بررسی‌های Raudkivi و Ettema (1983) شرایط آبشستگی آب زلال در  $U \leq 0.95U_c$  برقرار می‌شود که  $U_c$  سرعت متوسط جریان و  $U_c$  سرعت بحرانی می‌باشد. ولی بیشینه عمق آبشستگی در شرایط آب زلال زمانی برقرار می‌شود که  $U = 0.95U_c$  باشد. بنابراین، با توجه به دبی  $۲۰$  لیتر بر ثانیه و با استفاده از معیار Melville (1997) عمق جریان به گونه‌ای در نظر گرفته شد که شرایط  $U = 0.95U_c$  برقرار شود.

آزمایش‌ها با دبی  $۲۰ \pm ۰/۵$  لیتر بر ثانیه و عمق جریان  $۱۰ \pm ۰/۵$  سانتیمتر انجام شدند. آزمایش‌ها با نام‌های M1، M2 و M3 نشان داده شده‌اند که به ترتیب بیانگر حالت تک پایه، دوپایه با فاصله کم و دوپایه با فاصله زیاد پشت سر هم می‌باشد. فاصله بین پایه‌ها در آزمایش دوم  $۲۰$  سانتیمتر ( $L/D = 4$ )، که  $L$  فاصله بین پایه‌ها و  $D$  قطر یا عرض هر پایه می‌باشد) و در آزمایش سوم  $۳۰$  سانتی‌متر ( $L/D = 6$ ) در نظر گرفته شد.

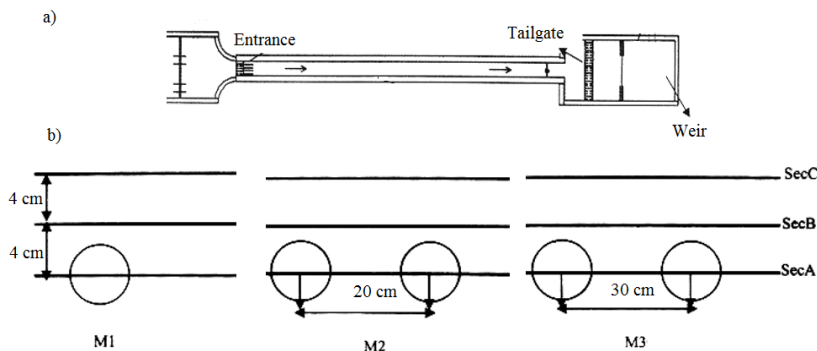


Fig. 1-a) Schematic view of the plan of the experimental flume, and b) measurement sections

شکل ۱ - الف) نمای شماتیک از پلان فلوم آزمایشگاهی و ب) مقاطع داده برداری

کردند که مدل آشفستگی RSM نسبت به مدل‌های دیگر برای شبیه‌سازی سرعت جریان و جریان‌های ثانویه عملکرد بهتری داشته است. Esmaeili Varaki et al. (2015) تأثیر موقعیت آستانه بر آبشستگی اطراف پایه‌های پل را بررسی و مشاهده کردند که بسته به موقعیت نصب آستانه، مقدار عمق آبشستگی تا ۲۲ درصد کاهش می‌یابد. Keshavarzi et al. (2014) ساختار جریان آشفته در اطراف یک پایه دایره‌ای را بررسی و نقش رخدادهای سه‌بعدی آشفستگی جریان بر فرآیند آبشستگی پایه منفرد را بررسی کردند. Fenocchi و Natale (2015) آبشستگی کل (مجموع آبشستگی حاصل از تنگ شدگی مقطع و آبشستگی موضعی) در اطراف پایه پل را به صورت عددی و آزمایشگاهی بررسی کردند. همچنین Baykal et al. (2015) جریان و آبشستگی در اطراف یک پایه منفرد دایره‌ای را بررسی و مشاهده کردند که فرآیند محو گردابه فقط در فازهای ابتدایی آبشستگی تأثیرگذار است. Mahjoob et al. (2014) به بررسی آبشستگی موضعی اطراف گروه پایه پل پرداختند و نتیجه گرفتند که عمق آبشستگی در پایه دوم کمتر از پایه اول و عمق آبشستگی در پایه سوم کمتر از مقادیر مربوط به پایه‌های اول و دوم است. Daneshfaraz et al. (2014) تأثیر شکاف گروه پایه‌ها بر عمق آبشستگی را بررسی کردند. نتایج این محققین حاکی از کاهش قابل توجه عمق آبشستگی نسبت به مدل گروه دوتایی پایه‌ی بدون شکاف می‌باشد.

با توجه به اهمیت شناسایی میدان جریان و تغییرات مؤلفه‌های سرعت در حفره آبشستگی پیرامون پایه‌های پل، در این تحقیق به بررسی ساختار چنین جریان‌هایی پرداخته شده است. همچنین به منظور بررسی اثر فاصله پایه‌های پل بر آبشستگی پایین‌دست و ساختار جریان پیرامون آن، آزمایش‌ها در حالت‌های تک پایه و دو پایه با دو فاصله متفاوت نسبت به هم انجام شده است.

## مواد و روش‌ها

آزمایش‌ها در یک فلوم آزمایشگاهی در آزمایشگاه هیدرولیک رسوب دانشکده کشاورزی دانشگاه شیراز انجام شدند (شکل ۱). فلوم شیشه‌ای مذکور دارای طول ۱۵، عرض ۰/۷ و ارتفاع ۰/۶ متر

### نتایج و بحث

تغییرات مؤلفه‌های سرعت در سه راستای  $X$ ،  $Y$  و  $Z$  در طول فلوم و در سه مقطع  $A$ ،  $B$  و  $C$  (شکل ۱ب) در فواصل مختلف از بستر در آزمایش مربوط به تک پایه در شکل‌های (۲ الف-ج) آمده است. در شکل (۲) تغییرات مؤلفه طولی سرعت  $V_x$  در سه مقطع  $A$ ،  $B$  و  $C$  در چهار فاصله از کف معادل ۱، ۱/۵، ۲ و ۲/۵ سانتیمتری نشان داده شده است. در آزمایش اول در مقطع  $A$  و در هر چهار فاصله مورد بررسی تغییرات مؤلفه طولی سرعت  $V_x$  شبیه شکل حفره آبستگي می‌باشد. همانند آنچه در بررسی‌های  $Barbhuiya$  و  $Dey$  (2004) مشاهده شد یک جریان روبه پایین در نزدیکی بالادست پایه استوانه‌ای وجود دارد. همچنین با فاصله گرفتن از کف، میزان حداقل سرعت  $V_x$  قبل و بعد از پایه افزایش یافته است. در مقطع  $A$  سرعت  $V_x$  منفی نبوده و این نشان می‌دهد که براساس محورهای مختصات فرض شده جریان برگشتی در راستای مذکور وجود نداشته است. حداقل سرعت  $V_x$  در فاصله بین ۵۰ و ۵۰- (۵۰ میلیمتری بالادست مبدا مختصات و ۵۰ میلیمتری پایین دست) یعنی در جایی که حفره آبستگي دارای بیشترین عمق می‌باشد اتفاق می‌افتد.

برای تعیین مدت زمانی که چاله آبستگي به حالت تعادل می‌رسد از رابطه  $Chiew$  و  $Melville$  (1999) استفاده و براین اساس مدت زمان آزمایش ۱۱ ساعت منظور گردید. به منظور بررسی تغییرات مؤلفه‌های سرعت جریان در حفره آبستگي پیرامون پایه‌های پل مجموعه‌ای از نقاط به صورت یک شبکه در اطراف پایه‌ها در نظر گرفته شده است. مؤلفه‌های سرعت جریان در حفره آبستگي پیرامون پایه‌ها در چهار فاصله ۱۰، ۱۵، ۲۰ و ۲۵ میلی‌متری از بستر فرسایش یافته اندازه‌گیری گردید. سرعت نقطه‌ای جریان آب با استفاده از یک دستگاه سرعت‌سنج سه‌بعدی  $micro-ADV$  با فرکانس ۵۰ هرتز ساخت شرکت نورتنک اندازه‌گیری شد. از مزایای دیگر این دستگاه، علاوه بر دقت بسیار بالای سرعت‌سنجی بر اساس پدیده داپلر، آن است که به علت این که سرعت‌سنجی در نقطه‌ای دور از انتهای بازوی دستگاه انجام می‌شود و هیچ جسم فیزیکی در آن مکان وجود ندارد، میدان جریان توسط دستگاه تحت تأثیر قرار نگرفته و اندازه‌گیری سرعت با دقت بسیار خوبی انجام می‌شود. تعداد سرعت‌های لحظه‌ای برداشت شده در هر نقطه در حدود ۶۰۰۰ سرعت به مدت دو دقیقه بود که سرعت در هر سه جهت طولی، عرضی و عمقی که به ترتیب با  $X$ ،  $Y$  و  $Z$  نمایش داده می‌شوند، به صورت همزمان برداشت گردید.

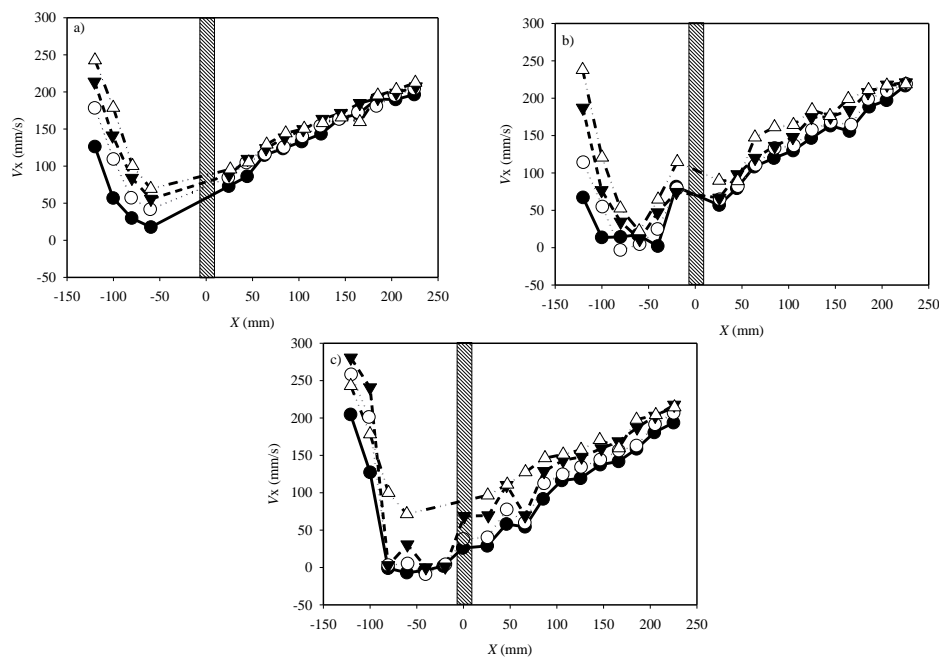


Fig. 2- The longitudinal component of the mean velocity at various distances in the M1 model (a) section A, B) section B, and C) section C (● 10, ○ 15, ▼ 20, and ▲ 25 mm distance).

شکل ۲- مؤلفه طولی سرعت متوسط در فواصل مختلف در مدل M1 (الف) مقطع A، (ب) مقطع B و (ج) مقطع C (● فاصله ۱۰، ○ فاصله ۱۵، ▼ فاصله ۲۰ و ▲ فاصله ۲۵ میلیمتر).

در جهت مثبت در سرعت  $V_y$  و در مقطع عرضی ۵۰- (فاصله ۵۰ میلیمتری بالادست مرکز پایه) وجود دارد که این به دلیل اثری است که پایه بر روی جریان می‌گذارد و پایه باعث منحرف شدن و کاهش سرعت جریان از این نقطه به بعد خواهد شد که این امر در مقطع A به دلیل برخورد مستقیم جریان با پایه نسبت به دو مقطع دیگر مشهودتر است.

در شکل (۴) تغییرات سرعت در جهت Z برای مدل M1 در فواصل ۱، ۲، ۱/۵ و ۲/۵ سانتیمتری از کف نشان داده شده است. منحنی تغییرات سرعت برای مقطع A نشان‌دهنده جریان‌های روبه‌پایین در بالادست پایه برای هر چهار فاصله می‌باشد. اما در پایین‌دست، درست در مجاورت پایه، مؤلفه عمقی سرعت  $V_z$  یک جهش به سمت مقادیر مثبت داشته که این روند تا انتهای مقطع A ادامه پیدا می‌کند. این امر بیانگر وجود جریان‌های چرخشی رو به بالا درون حفره (به دلیل وجود پایه در این راستا) درست بعد از پایه می‌باشد. در مقطع B نیز این جریان روبه‌پایین در بالادست پایه وجود داشته که حداکثر این جریان‌ها درست در مجاورت پایه (مقطع ۲۵- سانتیمتر در بالادست پایه با فاصله ۲۵ میلیمتری از کف) اتفاق می‌افتد که این مقدار حداکثر با فاصله گرفتن از کف با شدت بیشتری دنبال شده است. برخلاف مقطع A، در مقطع B در پایین‌دست پایه و در فواصل ۲ و ۲/۵ سانتیمتری از کف، هنوز جریان‌های روبه‌پایین وجود داشته ولی در دو فاصله دیگر  $V_z$  به صفر نزدیک شده که بیانگر عدم وجود این مؤلفه عمقی سرعت می‌باشد.

در شکل‌های (۳ الف-ج) تغییرات مؤلفه عرضی سرعت  $V_y$  در طول فلولم در سه مقطع A، B و C و برای فواصل مختلف نسبت به کف کانال نشان داده شده است. در مقطع A در فاصله یک سانتیمتری از کف و از مرکز پایه به بعد، مؤلفه سرعت  $V_y$  منفی شده و در انتهای مقطع A (فاصله ۱۵۰ میلیمتری از مرکز پایه) مقادیر آن به صفر میل می‌کند. همچنین در مقطع A با فاصله گرفتن از بستر در پایین‌دست پایه، مقادیر منفی مؤلفه‌های سرعت  $V_y$  کوچک‌تر شده (بدون در نظر گرفتن علامت) و به صفر نزدیک می‌شوند. برای سایر مقاطع (B و C) حتی از بالادست پایه نیز مؤلفه عرضی سرعت  $V_y$  منفی شده است. در این مقاطع هر چه از کف فاصله گرفته می‌شود در طول مقطع سرعت‌های منفی با مقادیر بزرگتر (بدون در نظر گرفتن علامت) بیشتر به چشم می‌خورد.

با توجه به شکل‌های (۳ ب و ج)، مؤلفه عرضی سرعت  $V_y$  در طول مقاطع A و B در پایین‌دست پایه عمدتاً منفی است. با توجه به مطالب فوق می‌توان نتیجه گرفت که جریان‌های گردابی عرضی که در دو مقطع B و C اتفاق می‌افتد بزرگ‌تر و تحت تأثیر حفره آبستگمی می‌باشد اما در مقطع A تنها در فواصل یک سانتیمتری از کف این جریان‌ها بطور واضح به چشم می‌خورد و با نزدیک شدن به بستر در پایین‌دست پایه در مقطع A سرعت  $V_y$  تقریباً به صفر نزدیک می‌شود و این نشان‌دهنده عدم جریان‌های عرضی و گردابی در این فواصل و مقطع موردنظر می‌باشد. اما مسأله دیگر که در هر سه مقطع به چشم می‌خورد این است که در هر سه مقطع و در تمامی فواصل یک جهش ناگهانی

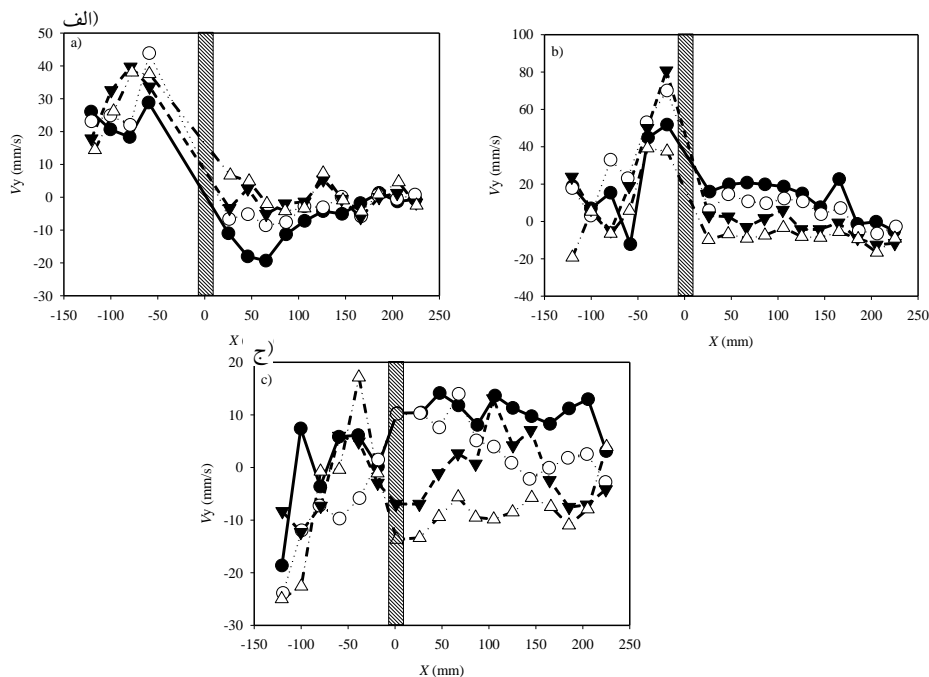
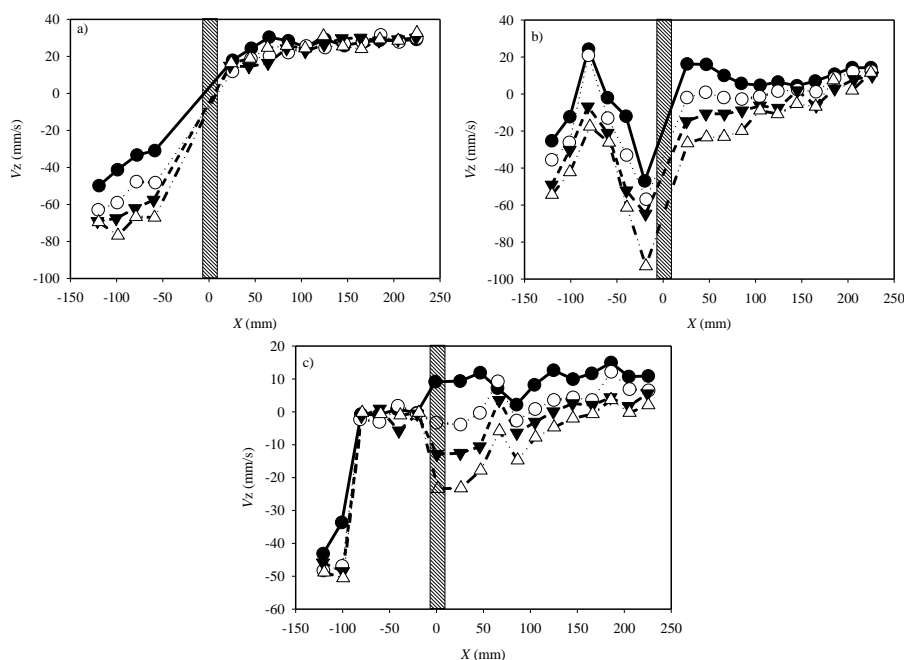


Fig. 3- The lateral component of the mean velocity at various distances in the M1 model (a) section A, B) section B, and C) section C (●10, ○ 15, ▼ 20, and Δ 25 mm distance).

شکل ۳- مؤلفه عرضی سرعت در فواصل مختلف در مدل M1 الف) مقطع A، ب) مقطع B و ج) مقطع C



**Fig. 4- The vertical component of the mean velocity at various distances in the M1 model (a) section A, B) section B, and C) section C (●10, ○ 15, ▼ 20, and △ 25 mm distance).**

شکل ۴ - مؤلفه عمقی سرعت متوسط در فواصل مختلف در مدل M1 الف) مقطع A، ب) مقطع B و ج) مقطع C (● فاصله ۱۰، ○ فاصله ۱۵، ▼ فاصله ۲۰ و △ فاصله ۲۵ میلیمتر).

تغییرات شروع می‌شود که این اثر متقابل دو پایه روی یکدیگر و روی جریان باعث افت سریع سرعت در محل پایه دوم شده و باعث تشدید فرآیند آبشستگی در فاصله بین دو پایه و محل پایه دوم گردیده است که در قسمت‌های بعدی در مورد آن بحث خواهد شد. مطابق نمودارها در راستای A، مقادیر منفی مؤلفه طولی سرعت  $V_x$  مشاهده نمی‌شود که نشان می‌دهد جریان‌های برگشتی در این راستا وجود نداشته است. تغییرات سرعت در مقاطع B و C نیز مشابه مقطع A بوده که این دلیل گستردگی زیاد حفره آبشستگی برای این مدل می‌باشد.

تغییرات مؤلفه عرضی سرعت در فواصل مختلف برای مدل M2 در سه مقطع A، B و C در شکل‌های (۶ الف-ج) نشان داده شده است. در شکل ۶-الف که مربوط به مقطع A می‌باشد مقادیر سرعت  $V_y$  در این مقطع در هر چهار فاصله مورد بررسی مثبت بوده و مقدار حداکثر آن در محل پایه اول و مجاورت آن می‌باشد و در سایر نقاط صفر و نزدیک به آن می‌باشد که این نشان‌دهنده عدم انحراف جریان در این نقاط می‌باشد. اما برای مقطع B سرعت  $V_y$  در هر چهار فاصله از بالادست پایه اول از منفی به مثبت تبدیل شده که نشان‌دهنده چرخش جریان در این نقطه می‌باشد و از حدود نقطه صفر (مبدأ مختصات) به سرعت مثبت تبدیل می‌شود که نشان‌دهنده شروع چرخش جریان حول پایه از این نقطه به بعد می‌باشد. در این مقطع حداقل سرعت  $V_y$  در محل پایه‌ها اتفاق می‌افتد که هر دو دارای حداقل مقدار منفی هستند.

در مقطع C جریان‌های روبه پایین قابل توجه در بالادست و پایین دست و در نزدیکی پایه وجود نداشته که وجود  $V_z$  های صفر و نزدیک به صفر در این راستا این مسأله را نشان می‌دهد. البته به جز در نقاط ۱۰۰- و ۱۲۰- میلیمتری که این به دلیل شروع حفره از این نقاط و تغییر جهت جریان به سمت داخل حفره و جداسازی جریان، در نقاط مذکور می‌باشد.

با توجه به مطالب ذکر شده فوق می‌توان نتیجه گرفت که حداکثر جریان‌های روبه پایین در بالادست پایه و در مقاطع A و B (خط مرکزی حفره که از مرکز پایه نیز عبور می‌کند و مجاور آن) وجود دارد. در نهایت مشاهده تغییرات سرعت در هر سه راستای  $X$ ،  $Y$  و  $Z$  و در سه مقطع برای مدل M1 بیانگر این مسأله می‌باشد که وجود پایه تا فاصله حدود دو برابر قطر پایه در بالا دست و تا شش برابر قطر پایه در پایین دست بر خطوط جریان اثر گذاشته و از کناره‌ها نیز تا فاصله حدود دو برابر قطر پایه وجود پایه بر جریان پیرامون اثرگذار می‌باشد. در مدل M2 دو پایه با فاصله معادل چهار برابر قطر پایه از یکدیگر در کانال کار گذاشته شده‌اند. شکل‌های (۵ الف-ج) مربوط به تغییرات مؤلفه طولی سرعت  $V_x$  در سه راستای A، B و C برای مدل M2 و در ۴ فاصله ۱، ۱/۵، ۲ و ۲/۵ سانتیمتری از کف می‌باشد. در مقطع A در دو موقعیت، حداقل سرعت اتفاق می‌افتد که این دو موقعیت، مکان‌های قرارگیری پایه‌ها و مجاورت آنها می‌باشد. همان طور که نمودارها نشان می‌دهند قبل از اینکه کاهش سرعت جریان ناشی از وجود پایه اول تمام شود از نقاط حدود (۱۲۵ میلیمتری مرکز پایه اول)



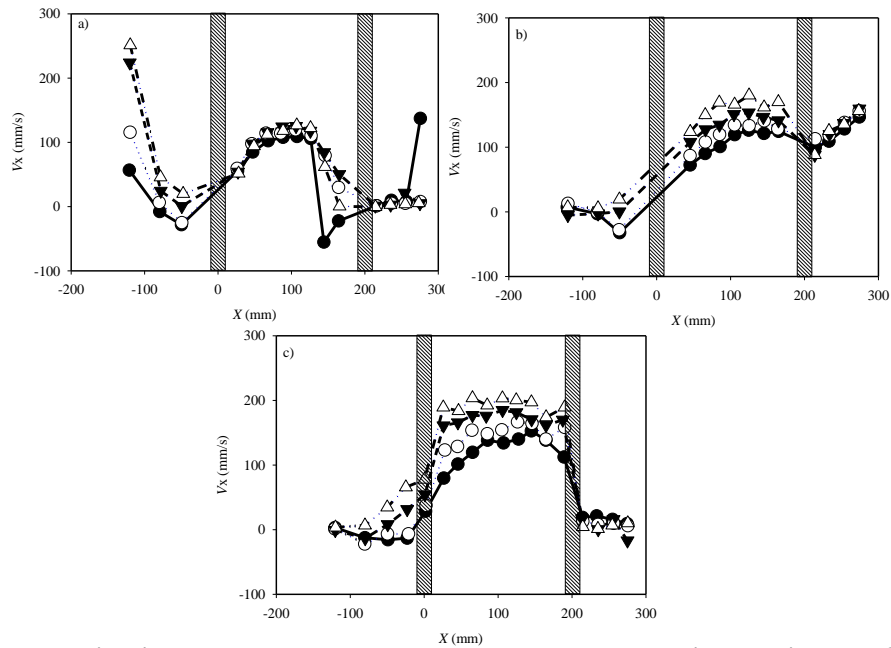


Fig. 5- The longitudinal component of the mean velocity at various distances in the M2 model (a) section A, B) section B, and C) section C (●10, ○ 15, ▼ 20, and Δ 25 mm distance).

شکل ۵- مؤلفه طولی سرعت در فواصل مختلف در مدل M2 الف) مقطع A، ب) مقطع B و ج) مقطع C (● فاصله ۱۰، ○ فاصله ۱۵، ▼ فاصله ۲۰ و Δ فاصله ۲۵ میلیمتر).

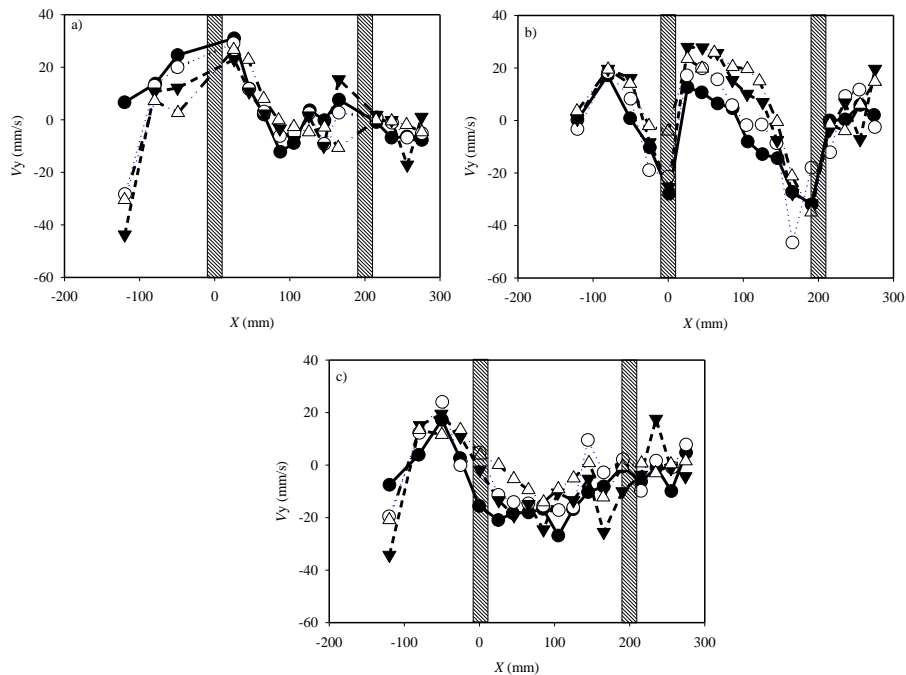


Fig. 6- The lateral component of the mean velocity at various distances in the M2 model (a) section A, B) section B, and C) section C (●10, ○ 15, ▼ 20, and Δ 25 mm distance).

شکل ۶- مؤلفه عرضی سرعت در فواصل مختلف در مدل M2 الف) مقطع A، ب) مقطع B و ج) مقطع C (● فاصله ۱۰، ○ فاصله ۱۵، ▼ فاصله ۲۰ و Δ فاصله ۲۵ میلیمتر).

فاصله ۲/۵ سانتیمتری از کف این جریان‌ها بزرگ‌تر بوده و با فاصله گرفتن از بستر این جریان‌ها تقویت شده و با نزدیک‌تر شدن به کف به دلیل اثر بستر جریان‌های روبه‌پایین تضعیف می‌شوند.

تغییرات مؤلفه طولی سرعت برای مدل M3 در شکل‌های (الف-ج) ترسیم گردیده است. برای مدل M3 در مقطع A سرعت-های  $V_x$  با علامت منفی در نقاط مجاور پایه‌ها دیده می‌شود. که بیانگر وجود جریان‌های برگشتی در این نقاط می‌باشد اما در فاصله بین دو پایه مقدار سرعت تقریباً به سرعت متوسط جریان در کانال نزدیک شده که این نشان‌دهنده از بین رفتن اثر پایه اول روی جریان در محلی که اثر پایه دوم شروع می‌شود می‌باشد. در این حالت نیز مانند مدل M2 نقاط دارای حداقل سرعت در محل قرارگیری پایه‌ها و مجاورت آنها دیده می‌شود که این نقاط حداقل برای پایه اول قبل از پایه (نقطه ۲۵- میلیمتری بالادست) و برای پایه دوم بعد از پایه (نقطه ۳۲۵) دیده می‌شود. اما برای مقطع B و C تنها در یک نقطه نمودار دارای حداقل است و این مقدار  $V_x$  حداقل در محل قرارگیری پایه اول اتفاق افتاده و در سایر نقاط سرعت  $V_x$  به حالت عادی برگشته و در محل پایه دوم تنها افت ناچیزی دیده می‌شود که این نقاط نشان اثر کم پایه دوم بر میزان آبستگي می‌باشد یعنی در حالت M3 دو پایه اثر متقابل بسیار کمی روی یکدیگر و در نتیجه روی جریان پیرامون پایه‌ها داشته‌اند. این امر باعث شده است که عرض حفره در محل پایه دوم بسیار کمتر از عرض حفره در محل پایه اول باشد.

در مقطع C، مؤلفه عرضی سرعت به ویژه برای فاصله یک سانتیمتری از کف بیشتر دارای مقادیر منفی است (از نقطه ۵۰- میلیمتری به بعد) که نشان‌دهنده جریان‌های چرخشی در این فاصله و مقطع می‌باشد که به دلیل کاهش اثر پایه در این مقطع علت آن می‌تواند به وجود چاله آبستگي نسبت داده شود. با مقایسه الگوی تغییرات مؤلفه عرضی سرعت در مدل‌های مورد بررسی مشاهده می‌شود که در فاصله حدود ۵۰ میلیمتری بالادست پایه، مقدار حداکثر موضعی سرعت واقع می‌شود که می‌تواند ناشی از برخورد جریان به پایه باشد.

شکل‌های (الف-ج) تغییرات مؤلفه عمقی سرعت  $V_z$  را در سه مقطع A، B و C و فواصل مختلف برای مدل M2 نشان می‌دهد. در خط مرکزی کانال (مقطع A)، مؤلفه عمقی سرعت  $V_z$  در محل دو پایه دارای مقدار حداقل منفی می‌باشد که نشان‌دهنده جریان‌های روبه‌پایین در این مکان‌ها می‌باشد البته حداقل  $V_z$  برای فاصله یک سانتیمتری بزرگ‌تر و دارای علامت منفی می‌باشد. اما در فاصله بین دو پایه  $V_z$  مثبت است که نشان‌دهنده جریان‌های رو به بالا در این نقاط می‌باشد.

در مقطع B سرعت  $V_z$  از محل ۱۰۰ میلیمتری بالادست پایه اول منفی شده و تا انتهای مقطع تقریباً در تمام نقاط  $V_z$  منفی باقی می‌ماند. مقادیر مطلق  $V_z$  در این مقطع بزرگ‌تر از مقطع A و همچنین در فاصله ۲/۵ سانتیمتری از کف بزرگ‌تر از سایر فواصل می‌باشد. در مقطع C نیز همانند مقطع B در بیشتر نقاط  $V_z$  های منفی غالب بوده که نشان‌دهنده وجود جریان‌های روبه‌پایین قابل توجه (به دلیل وجود حفره) در این راستاها می‌باشد که در

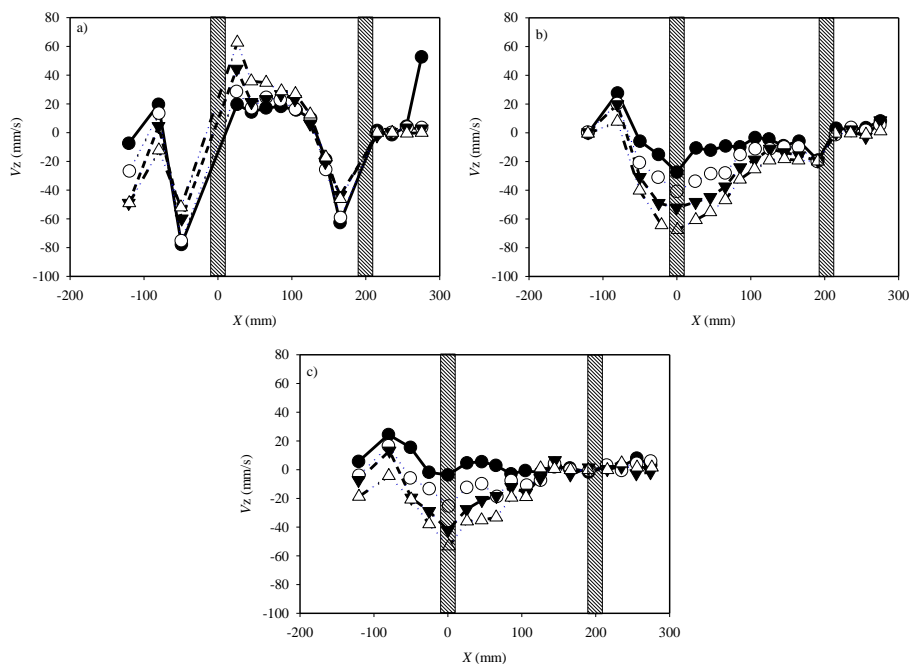
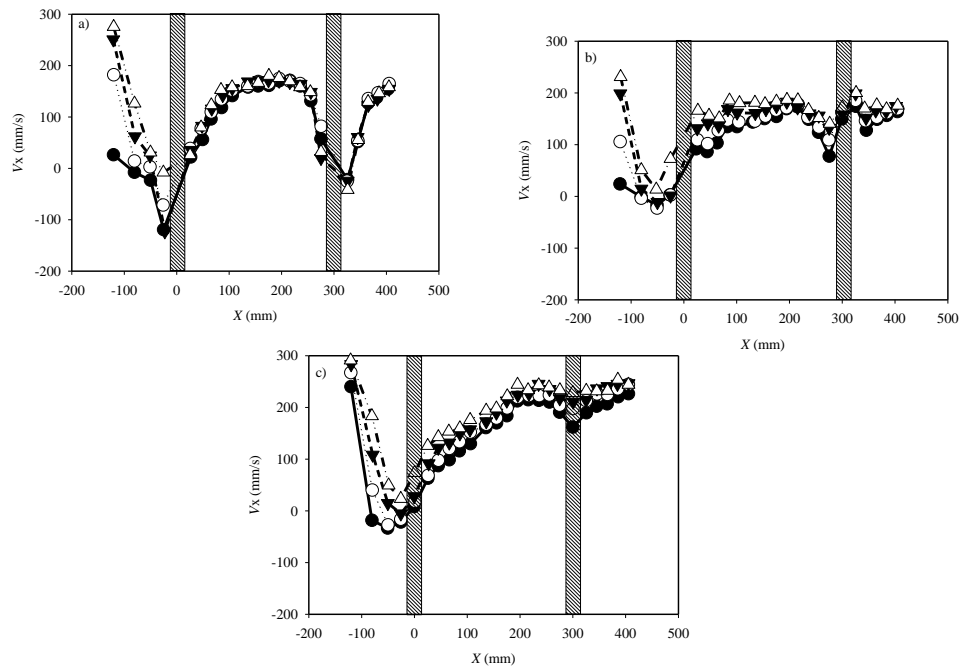


Fig. 7- The vertical component of the mean velocity at various distances in the M2 model (a) section A, B) section B, and C) section C (●10, ○ 15, ▼ 20, and Δ 25 mm distance).

شکل ۷- مؤلفه عمقی سرعت در فواصل مختلف در مدل M2 (الف) مقطع A، (ب) مقطع B و (ج) مقطع C



**Fig. 8- The longitudinal component of the mean velocity at various distances in the M3 model (a) section A, B) section B, and C) section C (●10, ○ 15, ▼ 20, and Δ 25 mm distance).**

شکل ۸- مؤلفه طولی سرعت در فواصل مختلف در مدل M3 الف) مقطع A، ب) مقطع B و ج) مقطع C (● فاصله ۱۰، ○ فاصله ۱۵، ▼ فاصله ۲۰ و Δ فاصله ۲۵ میلیمتر).

و ناچیزی روی یکدیگر داشته‌اند اما در دو مقطع B و C حتی در پایین دست پایه‌ها نیز  $V_z$  های منفی در بسیاری از نقاط این راستاها دیده شده و تنها در فاصله کوچکی بین دو پایه  $V_z$  حدود صفر خواهد شد. لازم به ذکر است که مقادیر  $V_z$  در مقطع B بزرگتر می‌باشد که این نشان-دهنده جریان‌های گردابی روبه‌پایین به ویژه در مقطع B می‌باشد. به طور کلی در هر سه مقطع در مجاورت پایه‌ها  $V_z$  افت شدیدی پیدا کرده و مقادیرشان حداقل می‌گردد.

پروفیل طولی حفره آبستگي در سه مقطع A، B و C برای هر سه مدل مورد بررسی در شکل‌های (۱۱ الف-ج) آورده شده است. با مقایسه این شکل با شکل‌های مربوط به تغییرات مؤلفه طولی سرعت، ملاحظه می‌شود که شکل کلی پروفیل حفره با الگوی تغییرات  $V_x$  مشابه است. بنابراین در این سه مقطع و در هر چهار فاصله ۱، ۱/۵، ۲ و ۲/۵ سانتیمتری از کف، تغییرات سرعت و تغییرات شکل حفره یک روند را دنبال می‌کند. همان طور که در مقطع A آبستگي به حداکثر خود رسیده است (متناظر با حداقل تراز کف)، موقعیت وقوع آن متناظر با حداقل سرعت در این راستا می‌باشد. همچنین با مقایسه مقدار حداکثر عمق آبستگي در مدل‌های M1، M2 و M3 ملاحظه می‌شود که در حالت دوپایه با فاصله کم (مدل M2) مقدار آبستگي در مجاورت پایه اول و همچنین پایه دوم در مقایسه با حالت تک پایه افزایش یافته است.

شکل (۹ الف-ج) تغییرات مؤلفه عرضی سرعت در سه مقطع A، B و C و فواصل مختلف برای مدل M3 را نشان می‌دهد. طبق این شکل‌ها در هر سه مقطع و در تمام فواصل از کف، سرعت  $V_y$  در بالادست و نزدیکی دو پایه کاهش یافته و در دو مقطع A و B مقادیر آن منفی می‌باشد اما در فاصله بین دو پایه و در مقطع C، مقادیر  $V_y$  دارای علامت مثبت می‌باشد و در انتهای مقاطع نیز به سمت صفر میل می‌کنند که این نشان می‌دهد در دو مقطع A و B در بالادست پایه‌ها و مجاورت آن‌ها خطوط از راستای اصلی منحرف شده و تمایل به چرخش حول پایه‌ها دارند در نقاطی که  $V_y$  مثبت می‌باشد مثل مقطع C خطوط جریان در حال دور شدن از محل پایه‌ها و رفتن به سمت دیواره‌ها می‌باشند که همین جریان‌های عرضی باعث گسترش عرض حفره آبستگي می‌شوند.

شکل‌های (۱۰ الف-ج) مربوط به تغییرات مؤلفه عمقی سرعت در سه مقطع A، B و C و فواصل مختلف برای مدل M3 می‌باشد. در شکل ۱۰-الف که مربوط به مقطع A می‌باشد، مقادیر  $V_z$  با علامت منفی در بالادست پایه‌ها ملاحظه می‌شود که در فاصله بین پایه‌ها، مقادیر  $V_z$  به سمت صفر میل می‌کنند که این مسأله بیانگر وجود جریان‌های روبه‌پایین در بالادست پایه‌ها می‌باشد و همچنین  $V_z$  های صفر نشان می‌دهد که جریان در فاصله بین دو پایه به حالت عادی بازگشته و دو پایه اثر متقابل کم

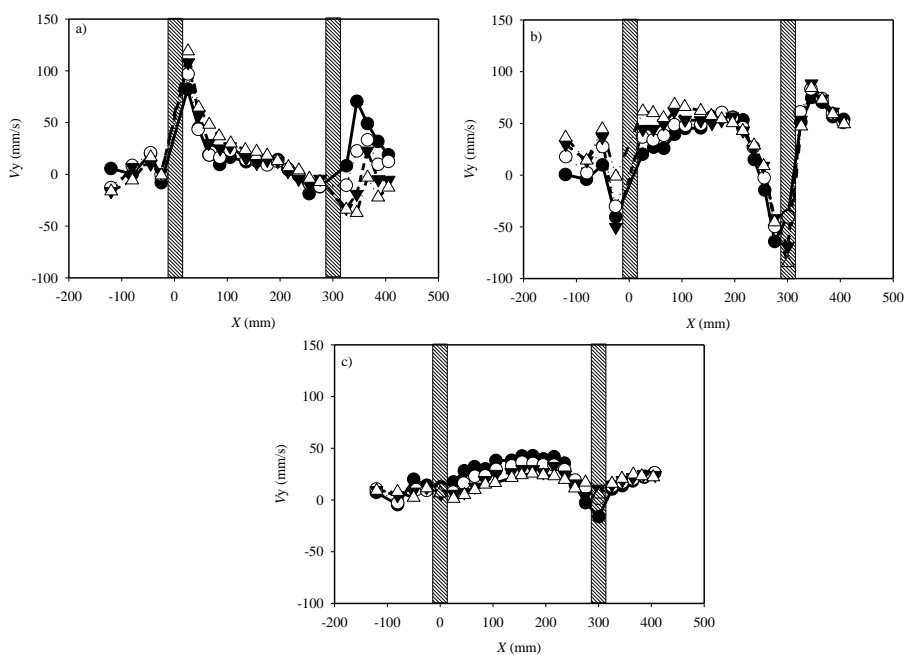


Fig. 9- The lateral component of the mean velocity at various distances in the M3 model (a) section A, B) section B, and C) section C (●10, ○ 15, ▼ 20, and Δ 25 mm distance).

شکل ۹- مؤلفه عرضی سرعت در فواصل مختلف در مدل M3 الف) مقطع A، ب) مقطع B و ج) مقطع C (● فاصله ۱۰، ○ فاصله ۱۵، ▼ فاصله ۲۰ و Δ فاصله ۲۵ میلی‌متر).

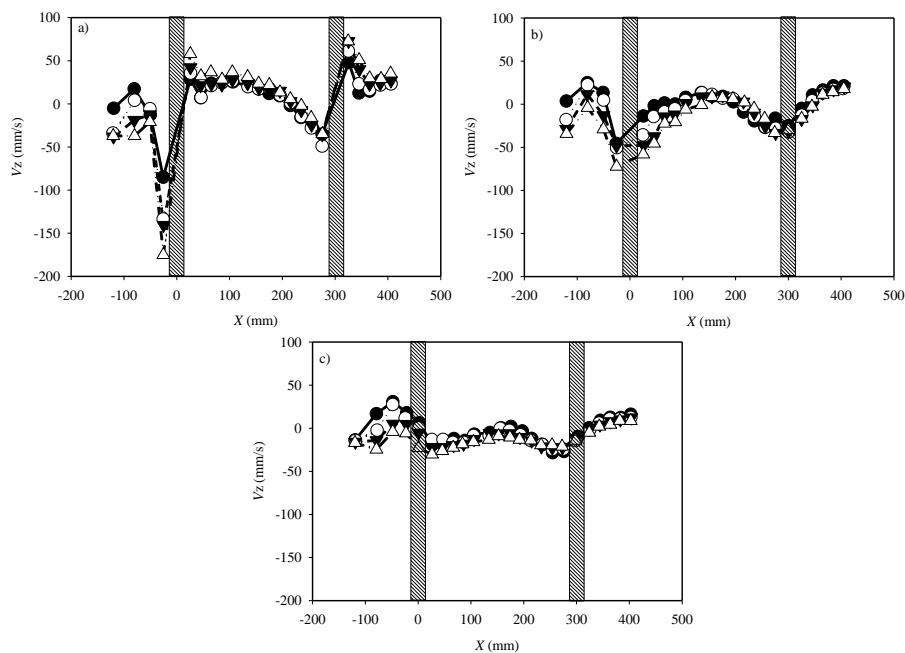


Fig. 10- The vertical component of the mean velocity at various distances in the M3 model (a) section A, B) section B, and C) section C (●10, ○ 15, ▼ 20, and Δ 25 mm distance).

شکل ۱۰- مؤلفه عمقی سرعت در فواصل مختلف در مدل M3 الف) مقطع A، ب) مقطع B و ج) مقطع C (● فاصله ۱۰، ○ فاصله ۱۵، ▼ فاصله ۲۰ و Δ فاصله ۲۵ میلی‌متر).

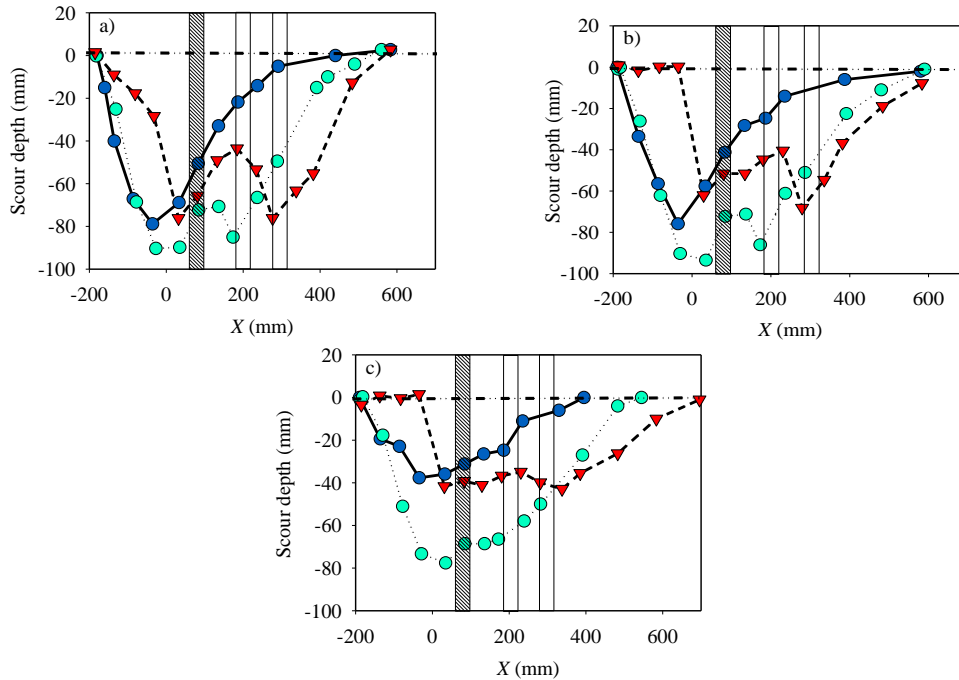


Fig. 11 - Longitudinal profile of the scour hole in different models, (a) cross section A, b) cross section B, and c) cross section C (● M1, ● M2, and ▼ M3).

شکل ۱۱- پروفیل طولی حفره آبستگي در مدل های مختلف، الف) مقطع A، ب) مقطع B و ج) مقطع C (● مدل M1، ● مدل M2 و ▼ مدل M3).

Laursen (1980) برای بستر متحرک، معادله دانشگاه ایالتی کلرادو (CSU) که توسط Richardson et al. (1993) ارائه گردید و معادله Froehlich (1988) در جدول (۱) آورده شده است. در این جدول دقت مدل‌ها بر حسب پارامتر درصد خطا (PE) که به صورت معادله (۱) تعریف می‌شود، ذکر شده است.

$$PE (\%) = \frac{X_{com} - X_{meas}}{X_{meas}} \times 100 \quad (1)$$

که در این رابطه،  $X_{com}$  و  $X_{meas}$  به ترتیب مقدار محاسبه شده و اندازه‌گیری شده حداکثر عمق آبستگي می‌باشد. با توجه به این جدول ملاحظه می‌شود که در حالت تک پایه، مدل Laursen (1980) برای بستر متحرک کمترین میزان خطا در محاسبه حداکثر عمق آبستگي را دارد به گونه‌ای که عمق آبستگي را به میزان ۱۹ درصد بیش از مقدار اندازه‌گیری شده برآورد می‌کند. همچنین در حالت پایه پل دوتایی، به طور میانگین مدل Laursen (1980) برای بستر متحرک و معادله Froehlich (1988) کمترین مقدار خطا را داشته و مقدار حداکثر عمق آبستگي را حدود ۱۳ درصد به ترتیب بیشتر و کمتر از مقدار اندازه‌گیری شده برآورد می‌کنند.

در مقابل با افزایش فاصله بین پایه‌ها (مدل M3)، مقدار آبستگي کاهش یافته است که این مشاهدات نشان‌دهنده تأثیر قابل توجه فاصله بین پایه‌ها بر میزان آبستگي بستر در مجاروت پایه است و در تحقیق Ranjkesh (2010) نیز مشاهده شده است. در مدل M2 و در مقطع C برخلاف دو مقطع دیگر عمق آبستگي در مقایسه با مدل‌های M1 و M3 همچنان قابل توجه است. از طرفی گسترش طولی حفره آبستگي با افزایش تعداد پایه‌ها افزایش یافته است. بنابراین مشاهدات نشان می‌دهد که حداکثر عمق آبستگي در مدل‌های M1 و M3 تقریباً برابر بوده و مدل M2 بیشترین مقدار عمق آبستگي را نشان می‌دهد.

خطوط هم‌تراز بستر در مدل‌های مختلف در اطراف پایه‌ها نیز در شکل‌های (۱۲ الف-ج) نشان داده شده است. با مقایسه این شکل‌ها ملاحظه می‌شود که افزایش تعداد پایه‌ها منجر به توسعه عرضی حفره آبستگي و در نتیجه افزایش حجم گودال آبستگي شده است. این مسأله در مورد مدل M2 یعنی پایه دوتایی با فاصله کم در مقایسه با مدل‌های دیگر مشهودتر است.

به منظور ارزیابی مدل‌های ارائه شده در برآورد حداکثر عمق آبستگي پایه‌های پل در حالت تکی و دوتایی، دقت برخی مدل‌ها شامل مدل Laursen (1963) برای آب زلال، مدل

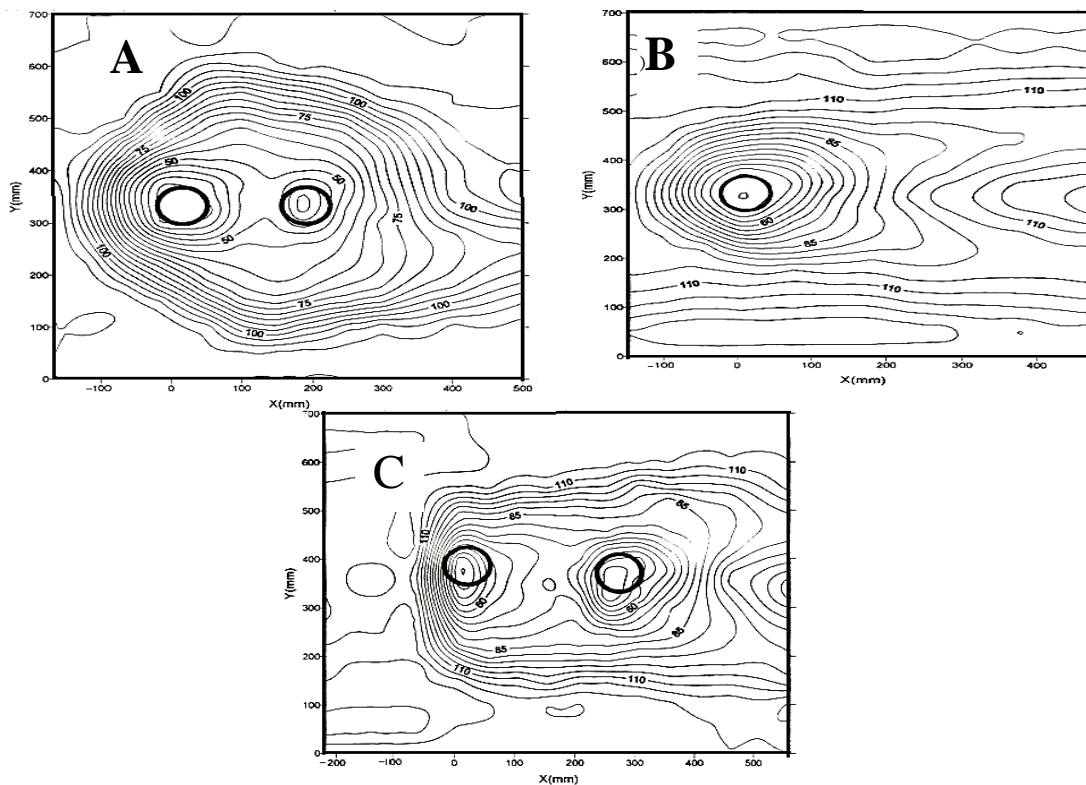


Fig. 12 – Contour lines of a) M1, b) M2, and c) M3 models.  
 شکل ۱۲ - خطوط هم تراز بستر (الف) مدل M1، (ب) مدل M2 و (ج) مدل M3

Table 1- Percentage error of different models for prediction of maximum scour depth around single and two column bridge piers

جدول ۱- میزان خطای مدل‌های مختلف در برآورد عمق آبستگي پایه پل تکی و دو تایی

Model	Equation for prediction of scour depth	PE (%)
M1	Laursen (clear water)	-98
	Laursen (live bed)	19
	CSU	113
	Froehlich	-41
M2	Laursen (clear water)	-98
	Laursen (live bed)	12
	CSU	67
	Froehlich	-20
M3	Laursen (clear water)	-98
	Laursen (live bed)	14
	CSU	99
	Froehlich	-7

مالی قابل توجهی در اثر تخریب پل‌ها در اثر وقوع آبستگي وارد می‌شود. یکی از دلایل این اتفاق، عدم شناخت کافی میدان جریان در اطراف پایه و همچنین عدم آگاهی کافی از اندرکنش پایه‌های متوالی بر یکدیگر می‌باشد. در این تحقیق، ساختار جریان متوسط در اطراف پایه‌های پل استوانه‌ای و همچنین اثر فاصله بین دو پایه

### نتیجه گیری

آبستگي موضعی یکی از معضلات مرتبط با پل‌های مورد استفاده در مسیر رودخانه‌ها می‌باشند. علیرغم تحقیقات ارزشمندی که در زمینه برآورد مقدار حداکثر عمق آبستگي در مجاورت پایه‌های پل انجام شده است، هنوز هم سالانه خسارات جانی و

تا فاصله حدود دو برابر قطر پایه وجود پایه بر جریان پیرامون اثرگذار می‌باشد.

- در حالت دوپایه با فاصله کم (مدل M2) مقدار آبستنگی در مجاورت پایه اول و همچنین پایه دوم در مقایسه با حالت تک پایه افزایش یافته است.
- با افزایش فاصله بین پایه‌ها (مدل M3)، مقدار آبستنگی در مقایسه با سایر مدل‌ها کاهش یافته است.
- معادله Laursen (1980) برای بستر متحرک و معادله Froehlich (1988) کمترین مقدار خطا در برآورد حداکثر عمق آبستنگی را دارند.

### تقدیر و تشکر

از کارشناسان آزمایشگاه هیدرولیک رسوب دانشگاه شیراز که در انجام این پژوهش همکاری داشته‌اند، کمال تشکر و قدردانی به عمل می‌آید.

بر آبستنگی و تغییرات مؤلفه‌های سرعت متوسط به صورت آزمایشگاهی بررسی شده است. به طور کلی موارد زیر را می‌توان به عنوان نتایج تحقیق حاضر برشمرد:

- مقدار حداقل مؤلفه طولی سرعت متوسط  $V_x$  در جایی که حفره آبستنگی دارای بیشترین عمق می‌باشد اتفاق می‌افتد.
- تغییرات مؤلفه طولی سرعت  $V_x$  شبیه شکل حفره آبستنگی می‌باشد.
- با فاصله گرفتن از بستر در پایین‌دست پایه، مقادیر منفی مؤلفه‌های عرضی سرعت  $V_y$  کوچک‌تر شده و به صفر نزدیک‌تر می‌شوند.
- حداکثر جریان‌های روبه‌پایین در بالادست پایه و در مقاطع A و B (خط مرکزی حفره که از مرکز پایه نیز عبور می‌کند و مجاور آن) وجود دارد.
- در دامنه تغییرات پارامترهای تحقیق حاضر، وجود پایه تا فاصله حدود دو برابر قطر پایه در بالادست و تا شش برابر قطر پایه در پایین‌دست بر خطوط جریان اثر گذاشته و از کناره‌ها نیز

### References

- 1- Alamatian A. and Jafarzadeh, M. 2008. Numerical study of flow around a bridge pier. 8<sup>th</sup> international Conference of River engineering, Shahid Chamran University, Ahvaz, Iran. (In Persian)
- 2- Barbhuiya, A. and Dey, S. 2004. Measurement of turbulent flow field at a vertical semicircular cylinder attached to the sidewall of a rectangular channel. *Flow Measurement and Instrumentation*, 15(2), pp. 87-96.
- 3- Baykal, C., Sumer, B.M., Fuhrman, D.R., Jacobsen, N.G. and Fredsøe, J., 2015. Numerical investigation of flow and scour around a vertical circular cylinder. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 373(2033), p.20140104.
- 4- Daneshfaraz, R., Ashrafi, S. and Nezafat, H. 2014. Numerical analysis on the effect of slot on the maximum scour depth around a group of bridge piers. 10<sup>th</sup> International Congress on Civil Engineering, Tabriz University, Tabriz, Iran. (In Persian).
- 5- Esmaeili Varaki, M., Saadati S. and Fazl R. 2015. Experimental investigation of the bed sill effect on the temporal evolution of local scour hole around an inclined pier group on a foundation, *Journal of Hydraulics*, 10(2), pp. 13-25. (In Persian).
- 6- Fenocchi, A. and Natale, L., 2015. Using numerical and physical modeling to evaluate total scour at bridge piers. *Journal of Hydraulic Engineering*, 142(3), p.06015021.
- 7- Froehlich, D.C., 1988. Analysis of onsite measurements of scour at piers. In *Hydraulic Engineering: Proceedings of the 1988 National Conference on Hydraulic Engineering* (pp. 534-539).
- 8- Houshmand, D., Esmaili, K., Keshavarzi, A. and Faridhosseini, A. 2014. Numerical Modeling of Flow around Bridge Piers in Meandering Channel. *Journal of Water and Soil*, 27(5), pp. 973-984. (In Persian).
- 9- 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.
- 10-Laursen, E.M., 1963. An analysis of relief bridge scour. *Journal of the Hydraulics Division*, 89(3), pp.93-118.

- 11-Laursen, , E.M., 1980. Predicting scour at bridge piers and abutments. *General Report*, 3, Arizona Department of Transportation, Phoenix, AZ.
- 12-Mahjoob, B., Mohammadnezhad, B. and Behmanesh, J. 2014. Numerical modeling of local scouring around group bridge piers and compared with experimental results. *Journal of Water and Soil*, 28(2), pp. 267-275. (In Persian).
- 13-Melville, B.W. and Chiew, Y.M., 1999. Time scale for local scour at bridge piers. *Journal of Hydraulic Engineering*, 125(1), pp.59-65.
- 14-Melville, B.W., 1997. Pier and abutment scour: integrated approach. *Journal of Hydraulic Engineering*, 123(2), pp.125-136.
- 15-Melville, B. W., and Raudkivi, A. J. 1977. Flow characteristics in local scour at bridge piers. *Journal of Hydraulic Research*, 15(4), pp.373-380.
- 16-Raeisi, N. and Ghomeshi, M. 2014. Local Scour around the cylindrical bridge pier with two sizes of bed material. *Journal of Irrigation Science and Engineering*, 38(2), pp. 77-89. (In Persian)
- 17-Ranjesh, M. 2010. The effect of flow structure on the scouring around cylindrical bridge piers, M.Sc. thesis, Department of Irrigation and Drainage Engineering, Isfahan University of Technology. (In Persian).
- 18-Raudkivi A, and Ettema R, 1983. Clear-water scour at cylindrical piers. *Journal of Hydraulic Engineering*, 109(3), pp.338-350.
- 19-Richardson, E.V., Harrison, L.J., Richardson, J.R. and Davis, S.R., 1993. *Evaluating scour at bridges* (No. HEC 18 (2nd edition)).
- 20-Richardson, J.E. and Panchang, V.G., 1998. Three-dimensional simulation of scour-inducing flow at bridge piers. *Journal of Hydraulic Engineering*, 124(5), pp.530-540.
- 21-Zarrati, A.R., Nazariha, M. and Mashahir, M.B., 2006. Reduction of local scour in the vicinity of bridge pier groups using collars and riprap. *Journal of Hydraulic Engineering*, 132(2), pp.154-162.