



## **Experimental Study of the Simultaneous Effect of the Shape and Longitudinal Angle of the Bridge Pier on Scour**

**Peiman Eskafi<sup>1</sup>, Mohammad Mahmoudian Shoushtari<sup>2</sup>, Mohsen Solimani Babarsad<sup>3✉</sup>,  
Mohammad Hosein Pourmohammadi<sup>4</sup>, Behrooz Dahanzade<sup>5</sup>**

1. Department of Civil Engineering, Shoushtar Branch, Islamic Azad University, Shoushtar, Iran, Email:

[Eskafi.Peiman@gmail.com](mailto:Eskafi.Peiman@gmail.com)

2. Department of Water Sciences, Water Science and Environmental Research Center, Shoushtar Branch, Islamic Azad University, Shoushtar, Iran, Email: [M.Mshoushtari@gmail.com](mailto:M.Mshoushtari@gmail.com)
3. Department of Water Sciences, Water Science and Environmental Research Center, Shoushtar Branch, Islamic Azad University, Shoushtar, Iran, Email: [Mohsen.solb@gmail.com](mailto:Mohsen.solb@gmail.com)
4. Corresponding Author, Department of Water Sciences, Water Science and Environmental Research Center, Shoushtar Branch, Islamic Azad University, Shoushtar, Iran, Email: [m.pourmohammadi@gmail.com](mailto:m.pourmohammadi@gmail.com)
5. Department of Water Sciences, Water Science and Environmental Research Center, Shoushtar Branch, Islamic Azad University, Shoushtar, Iran. Email: [b.dahanzadeh@gmail.com](mailto:b.dahanzadeh@gmail.com)

---

---

### **Article Info**

### **ABSTRACT**

**Article type:** Research Article

**Article history:**

**Received:** June. 20, 2022

**Revised:** Aug. 31, 2022

**Accepted:** Sep. 19, 2022

**Published online:** Oct. 23, 2022

**Keywords:**

Scour,  
Bridge pier,  
Scouring Depth,  
Clear Water

Engineers in recent decades have come to the conclusion that the design of bridges should be based not only on structural considerations but also on the impact of flow on bridges due to the long-term experience of building bridges over rivers. In this study, we investigated the effects of the longitudinal development of the pier, the vertical angle of the pier, the pier thickness, and the shape of the base nose for sediment with an average diameter of 1.2 mm. Experiments were performed on piers with angles (45, 60, 75 and 95). The results showed that the angle was different from different points along with the distance between the hole and the pier, and the scour depth was above the maximum depth created. At an angle of 45 degrees without a nose, the scour depth was reduced by 51% for the base with a thickness of 30 mm, 79% for the pier with a thickness of 15 mm, and 89% for the triangular nose with a thickness of 30 mm. Among the triangular and long noses, the triangular nose in all the studied conditions was better reduced by 96.4% scours depth. In addition, as the thickness of the pier decreased, the pressure applied to the pier decreased and, as a result, scouring decreased by 8.3%.

---

Cite this article: Eskafi, P., Mahmoudian Shoushtari, M., Solimani Babarsad, M., & Pourmohammadi, M. H., Dahanzade, B. (2022). Experimental study of the simultaneous effect of the shape and longitudinal angle of the bridge pier on scour. *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 53 (8), 1727-1741.

© The Author(s). Publisher: University of Tehran Press.

DOI: <http://doi.org/10.22059/ijswr.2022.344899.669301>



## مطالعه آزمایشگاهی تأثیر همزمان شکل و زاویه طولی دماغه پایه پل بر آب‌شستگی

پیمان اسکافی<sup>۱</sup>، محمد محمودیان شوشتری<sup>۲</sup>، محسن سلیمانی بابرصاد<sup>۳</sup>، محمدحسین پورمحمدی<sup>۴</sup>، بهروز دهانزاده<sup>۵</sup>۱. گروه عمران، واحد شوشتر، دانشگاه آزاد اسلامی، شوشتر، ایران، ایمیل: [Eskafi.Peiman@gmail.com](mailto:Eskafi.Peiman@gmail.com)۲. گروه مهندسی آب، مرکز تحقیقات علوم آب و محیط‌زیست، واحد شوشتر، دانشگاه آزاد اسلامی، شوشتر، ایران، ایمیل: [M.Mshoushtari@gmail.com](mailto:M.Mshoushtari@gmail.com)۳. نویسنده مسئول، گروه مهندسی آب، مرکز تحقیقات علوم آب و محیط‌زیست، واحد شوشتر، دانشگاه آزاد اسلامی، شوشتر، ایران، ایمیل: [Mohsen.solb@gmail.com](mailto:Mohsen.solb@gmail.com)۴. گروه مهندسی آب، مرکز تحقیقات علوم آب و محیط‌زیست، واحد شوشتر، دانشگاه آزاد اسلامی، شوشتر، ایران، ایمیل: [m.pourmohammadi@gmail.com](mailto:m.pourmohammadi@gmail.com)۵. گروه مهندسی آب، مرکز تحقیقات علوم آب و محیط‌زیست، واحد شوشتر، دانشگاه آزاد اسلامی، شوشتر، ایران، ایمیل: [b.dahhanzadeh@gmail.com](mailto:b.dahhanzadeh@gmail.com)

## چکیده

## اطلاعات مقاله

تجربه طولانی مدت احداث پل بر روی رودخانه‌ها و تخریب آن‌ها و بررسی علل تخریب مهندسان را به این نتیجه رسانده است که در طراحی پل‌ها باید مسائلی مربوط به آبشستگی اطراف پایه را بسیار مورد توجه قرار داد. در تحقیق حاضر اثر توسعه طولی پایه، اثر زاویه عمودی ورودی پایه، اثر ضخامت پایه و شکل دماغه پایه برای رسوب با قطر متوسط ۱/۲ میلی‌متر مورد بررسی قرار گرفت. آزمایش بر روی پایه‌هایی با زوایای (۴۵، ۶۰، ۷۵ و ۹۰) انجام شد. نتایج نشان داد که زاویه دماغه تأثیر زیادی بر ماکزیم عمق ایجاد شده دارد. هر چه زاویه دماغه کمتر در نظر گرفته شد، عمق آبشستگی و ابعاد چاله نیز کاهش یافت و در نهایت مشاهده گردید که در زاویه ۴۵ درجه بدون دماغه تا ۵۱٪ برای پایه با ضخامت ۳۰ میلی‌متر و ۷۹٪ برای پایه ۱۵ میلی‌متری و ۸۹٪ با دماغه مثلثی با ضخامت ۳۰ میلی‌متر کاهش عمق آبشستگی نسبت به شاهد داشته است. از بین دماغه‌های مثلثی و دایره‌ای، دماغه مثلثی در تمامی شرایط مورد بررسی، دارای عملکرد بهتری در محافظت پایه به میزان ۹۶/۴ درصد عمق آب‌شستگی بوده است. همچنین با کاهش ضخامت پایه، مقاومت در برابر جریان و بالطبع آن خلع و کاهش فشار در پشت پایه کاسته شده و در نتیجه آب‌شستگی به میزان ۸/۳ درصد در شرایط مشابه کاهش نشان داده است. کلیه مراحل آزمایشگاهی این تحقیق در آزمایشگاه هیدرولیک دانشگاه صنعتی خاتم الانبیا بهبهان در سال ۱۳۹۹ انجام گردید.

نوع مقاله: مقاله پژوهشی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۴/۲

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۱/۶/۹

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۶/۲۸

تاریخ انتشار: ۱۴۰۱/۸/۱

## واژه‌های کلیدی:

آب‌شستگی،

پایه پل،

عمق آبشستگی،

آب زلال.

استناد: اسکافی، پیمان؛ محمودیان شوشتری، محمد؛ سلیمانی بابرصاد، محسن؛ پورمحمدی، محمدحسین؛ دهانزاده، بهروز. (۱۴۰۱). مطالعه آزمایشگاهی تأثیر همزمان شکل و زاویه طولی دماغه پایه پل بر آب‌شستگی. *مجله تحقیقات آب و خاک ایران*، ۵۳ (۸)، ۱۷۴۱-۱۷۲۷.

DOI: <http://doi.org/10.22059/ijswr.2022.344899.669301>

ناشر: مؤسسه انتشارات دانشگاه تهران. © نویسندگان.

## مقدمه

پایه‌های پل و تکیه‌گاه‌های جانبی پل در عرض رودخانه‌ها و آبراهه‌ها سبب کاهش عرض عبوری جریان، برخورد جریان به پایه و انحراف خطوط جریان اطراف پایه به کف بستر و در نهایت ایجاد آب‌شستگی موضعی پایه پل‌ها می‌شوند. در اطراف پایه پل پدیده‌های مختلفی نظیر گرداب نعل اسبی، جریان بالارونده، جریان پایین رونده، موج سطحی و گرداب برخاستگی شناسایی گردیدند، که بسته به شرایط جریان و پایه با شدت‌های مختلف ایجاد می‌شوند (Safaei et al., 2021). جدایی جریانی که به پایه نزدیک می‌شود با عبور از کناره‌های پایه سبب تشکیل گرداب‌های برخاستگی در پشت پایه می‌شود (Safaei et al., 2015). گرداب‌های برخاستگی مانند گرداب‌های کوچکی عمل کرده و رسوبات را از طریق بار بستر و بار معلق به پایین دست منتقل می‌کنند. افزایش مقاومت مواد بستر و کاهش قدرت فرسایش جریان اطراف پایه با استفاده از تغییر دماغه پایه، ایجاد شکاف در پایه، استفاده از طوقه و ماریچ از جمله این روش‌هاست. مطالعات گسترده آزمایشگاهی به منظور شناخت رفتار آب‌شستگی به عنوان یک مساله مهم و قابل توجه توسط محققین نظیر (Safaei et al., 2022)، (Solimani Babarsad et al., 2021b)، (Akhlaghi et al., 2020)، (Guan et al., 2019)، (Yang et al., 2019) صورت گرفته است. در ادامه تلاش شده است با توجه به هدف تحقیق، نتایج محققین در ارتباط با اثر توسعه طولی پایه و زاویه پایه اشاره گردد. دو عامل مهم در فرسایش اطراف پایه بر اساس مطالعات انجام گرفته شامل برخورد جریان به پایه پل و جدا شدن جریان از پایه می‌باشد (Ettema & Voskoboinick et al., 2020). (et al., 2017) در بررسی اثر تک پایه و چند پایه بیان کردند که قرارگیری پایه‌ها در امتداد هم در پایین دست تأثیری بر حفره آب‌شستگی در جلوی پایه ندارد. همچنین نتایج (Masjedi et al., 2013) در بررسی دو شکل پایه با مقطع دایره و مقطع کشیده در قوس نشان داد که در تمامی حالات قرارگیری پایه‌ها، پایه با طول توسعه یافته دارای آب‌شستگی کم‌تر می‌باشد. (Kardan et al., 2020) با بررسی تأثیر فاصله و نحوه قرارگیری دو پایه در کنار هم نشان داد که در هر دو حالت با کم شدن فاصله بین پایه‌ها به علت ایجاد مانع در برابر جریان و همچنین ایجاد جت آبی در بین پایه‌ها، آب‌شستگی افزایش می‌یابد و با افزایش فاصله تا ۴ برابر قطر پایه، آب‌شستگی کاهش می‌یابد و از این فاصله به بعد افزایش فاصله بین پایه‌ها تأثیری بر میزان آب‌شستگی ندارد. برای اثر زاویه پایه می‌توان به تحقیقات (Solimani Babarsad et al., 2021a)، (Eghbalnik et al., 2019)، (Bozkus & Yildiz, 2001)، (Salim & Jones, 1996) اشاره نمود. بررسی آزمایشگاهی اثر کج‌شدگی پایه استوانه‌ای بر عمق آب‌شستگی موضعی در کانال مستقیم توسط (Arvanaghi et al., 2021) برای زاویه‌های صفر، ۵، ۱۰ و ۱۵ درجه نشان داد که با افزایش زاویه قرارگیری پایه در جهت جریان، میزان آب‌شستگی کاهش می‌یابد. (Solimani babarsad & Safaei, 2021) اثر زاویه پیشانی پایه برای زوایای ۹۰، ۸۵، ۸۰، ۷۵، ۷۰ را برای شرایط آب زلال مورد بررسی قرار دادند و اعلام نمودند زاویه ۷۵ عملکرد بهتری در کاهش آب‌شستگی داشته است که به دلیل کم‌تر شدن توان جریان پایین‌رونده و در نتیجه ضعیف شدن جریان گردابی نعل اسبی می‌باشد. نتیجه تحقیق Salimi & Ghodsian (۲۰۰۸) برای بررسی الگوی جریان و آب‌شستگی موضعی برای پایه کج و قائم با مقطع دایره‌ای در شرایط آب زلال برای سه زاویه ۷، ۱۴ و ۲۱ درجه نشان داد که با کج شدن پایه در جهت جریان، عمق آب‌شستگی نسبت به حالت قائم کاهش می‌یابد. نتایج Esmaeili et al (۲۰۱۵) در بررسی تأثیر عوامل هندسی و هیدرولیکی بر مشخصات آب‌شستگی پیرامون گروه پایه کج و پی نشان داد که تغییرات سرعت جریان در مقایسه با عمق تأثیر زیادی در حداکثر عمق آب‌شستگی دارد. علاوه بر سرعت جریان، عمق نسبی (نسبت عمق جریان) نیز تأثیر معنی‌داری بر عمق آب‌شستگی دارد. (Nobakht et al., 2020). برای پارامترهای مختلف در میزان فرآب نظیر زاویه پایه‌ی پل به سمت بالادست، پایین دست و دیواره‌ی کانال بیان نمودند که نتایج برای اعداد فرود کم‌تر از ۳/۰، تأثیر کمی بر میزان فرآب دارد؛ در حالی که برای مقادیر بالاتر از این مقدار با افزایش عدد فرود، نسبت فرآب افزایش می‌یابد. همچنین میزان فرآب با افزایش زاویه پایه‌ی کج‌شدگی به سمت بالادست کاهش می‌یابد و اثر کج‌شدگی زاویه در این حالت نسبت به کج‌شدگی به سمت پایین دست و دیواره کمتر است. میزان افزایش فرآب برای کج‌شدگی به سمت بالادست دارای بیش‌ترین مقدار می‌باشد. نتایج محققین بطور کلی نشان می‌دهد که توسعه طولی پایه و تغییر زاویه هر یک به تنهایی نتایج مثبت در کاهش آب‌شستگی را نشان دادند. از این رو ترکیب همزمان این دو متغیر و همچنین استفاده از دماغه با شکل‌های مختلف می‌تواند الگوهای جریان متفاوتی را در اطراف پایه پل ایجاد کند، که به تبع آن آب‌شستگی تحت تأثیر قرار خواهد گرفت که هدف تحقیق حاضر می‌باشد.

## مواد و روش‌ها

### الف- آنالیز ابعادی

پارامترهای متعددی در آبشستگی موثر هستند، که به دلیل پیچیده بودن پدیده آبشستگی، اعمال کردن تمام پارامترهای تأثیرگذار در آبشستگی مشکل می‌باشد. از این رو با انجام آنالیز ابعادی و بی‌بعد کردن پارامترها از تعداد متغیرها کاسته شد. عمق آبشستگی ( $d_s$ ) تابعی است از چگالی سیال ( $\rho$ )، لزجت سینماتیکی سیال ( $\nu$ )، سرعت متوسط جریان ( $V$ )، سرعت بحرانی آستانه حرکت ذره ( $V_c$ )، عمق جریان ( $y$ )، شتاب گرانش ( $g$ )، قطر میانگین رسوبات بستر ( $d_{50}$ )، انحراف معیار ذرات رسوبی ( $\sigma_g$ )، چگالی ذرات رسوب ( $\rho_s$ )، عرض کانال ( $B$ )، عرض پایه ( $b$ ) یا ( $D$ )، طول پایه ( $L$ )، ضریب شکل پایه ( $CD$ )، زاویه کج شدگی در راستای جریان ( $\theta$ )، جهت قرارگیری پایه نسبت به جریان ( $\beta$ ) و زمان تعادل ( $t$ ) می‌باشد (رابطه ۱).

$$d_s = f(\rho, \nu, V, V_c, y, g, d_{50}, \sigma_g, \rho_s, B, D, C_D, L, \beta, \theta, t) = 0 \quad \text{رابطه ۱}$$

پس از انجام آنالیز ابعادی به روش باکینگهام، متغیرهای مسئله بی‌بعد گردیدند و برخی از متغیرها با یکدیگر ترکیب تا به صورت رابطه ۲ تبدیل شود. زمان تمامی آزمایش‌های تحقیق با توجه به آزمایش‌های شاهد و در راستای اطمینان از به تعادل رسیدن تمامی شرایط جدید موانع، ۲۴ ساعت در نظر گرفته شد. از این رو پارامتر زمان از روابط حذف گردید. با توجه به ثابت بودن متغیرهای  $B, \rho, \beta, \rho_s$  ذرات رسوبی در تمام آزمایش‌ها، رابطه بدون بعد به صورت زیر قابل ارائه است:

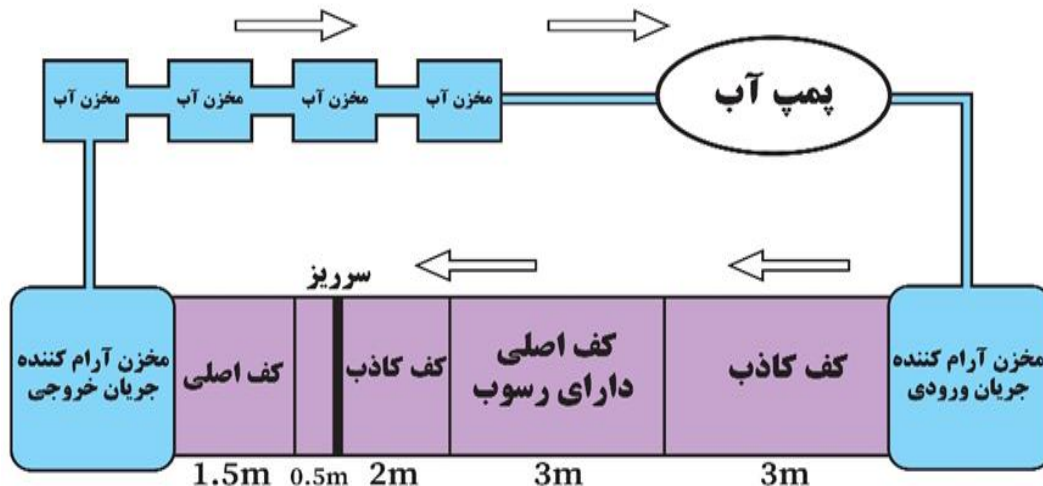
$$\frac{d_s}{D} = f(Re, Fr, d_{50}, \theta, \frac{CD}{y}, \frac{L}{D}, \frac{V}{V_c}) \quad \text{رابطه ۲}$$

در رابطه (۲) پارامترهای سمت راست بیان گر عدد رینولدز، عدد فرود، قطر متوسط ذرات، زاویه کج شدگی پایه در راستای جریان، اثر شکل دماغه، اثر طول به ضخامت و اثر شدت جریان می‌باشند. لازم به ذکر است که در تمامی آزمایش‌ها عدد رینولدز برابر با ۲۶۶۲۵ می‌باشد. ملویل (۲۰۰۸) تأثیر مستقیم عدد رینولدز به عنوان نشان دهنده اثر ویسکوزیته در آبشستگی را کم دانسته است (Melville, 2008)، بنابراین اثر عدد رینولدز حذف می‌گردد. از طرفی ملویل برابری شدت جریان نسبی ( $V/V_c$ ) در نمونه میدانی و مدل را لازمه ساخت تشابه در شرایط آستانه حرکت دانسته است. از این رو در ادامه تغییرات سرعت جریان تنها به صورت تغییرات شدت جریان نسبی بررسی می‌گردد. بنابراین رابطه (۲) به شکل رابطه (۳) تبدیل می‌شود.

$$\frac{d_s}{D} = f(\theta, \frac{Cd}{y}, \frac{l}{D}, \frac{V}{V_c}) \quad \text{رابطه ۳}$$

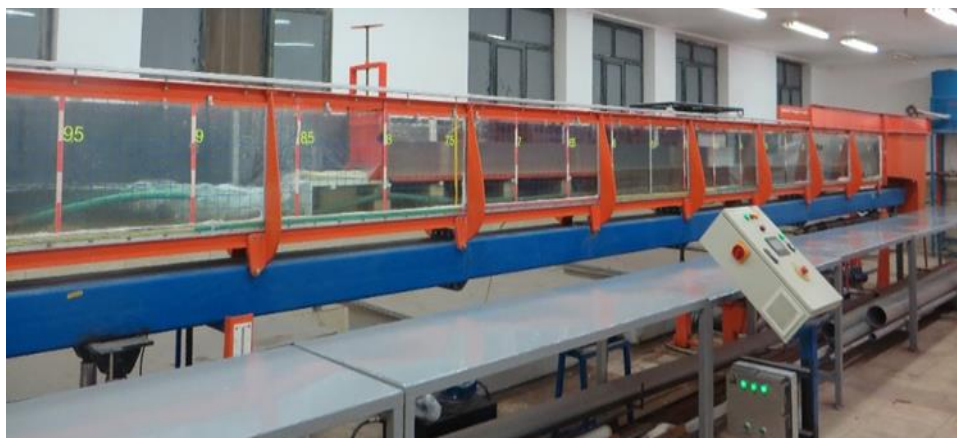
### ب- شرح انجام آزمایش‌ها:

آزمایش‌های تحقیق حاضر در فلوم تحقیقاتی آزمایشگاه هیدرولیک دانشگاه صنعتی خاتم الانبیا بهبهان در سال ۱۳۹۹ انجام گردید. فلوم تحقیق حاضر دارای ۱۰ متر طول، عرض ۳۰ سانتی متر و ارتفاع ۶۰ سانتی متر بوده است (شکل ۱). فلوم مورد استفاده نیز در شکل شماره ۲ نشان داده شده است.



شکل ۱. شماتیکی از فلوم مورد استفاده در کلیه آزمایشات

کف فلوم فلزی بوده و جنس دیواره‌ها از شیشه سکوریت می‌باشد. در خصوص عرض فلوم و پایه و بررسی عدم تداخل با توسعه چاله طبق جدول شماره یک (Raudkivi & Ettema, 1983) و همینطور مشاهده توسعه چاله آبشستگی در آزمایشات، محدودیتی ایجاد نموده است. جریان مورد نیاز با استفاده از یک پمپ به ظرفیت اسمی ۲۴ لیتر بر ثانیه از مخزن اصلی به کانال منتقل گردیده و توسط یک سرریز در انتهای کانال، عمق آب در کانال تنظیم می‌گردد. کانال آزمایشگاهی به دو قسمت بستر متحرک و بستر ثابت (کف کاذب) تقسیم شد. بستر متحرک از فاصله ۳ متری از ابتدای کانال شروع شده و دارای طول ۳ متر بود که ارتفاع رسوبات در این قسمت ۱۵ سانتی‌متر بوده است.



شکل ۲. نمای کلی از فلوم استفاده شده (جهت جریان از راست به چپ)

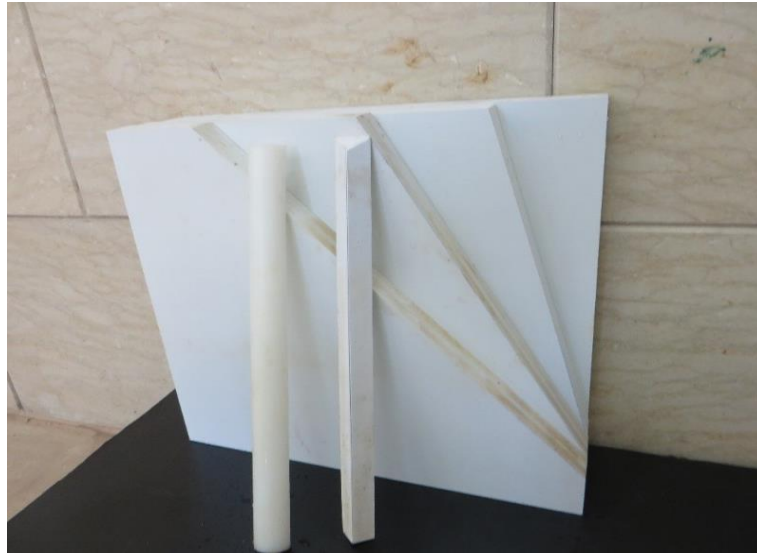
کنترل دبی با شیر کنارگذر انجام گرفته و اندازه‌گیری توسط دبی‌سنج آلتراسونیک صورت پذیرفت. آزمایش‌ها بر اساس آب‌شستگی آب زلال (نسبت سرعت برشی بستر به سرعت برشی آستانه حرکت ذره رسوب  $V/V_c=0.92$ ) انجام شد تا این نسبت به حداکثر آن یعنی ۰.۹۹ یا یک که حداکثر عمق آبشستگی رخ می‌دهد (Chiew, 1984) نزدیک باشد و در همه آزمایشات یکسان در نظر گرفته شد. انحراف معیار هندسی ذرات رسوب برابر  $1/23$  می‌باشد و از این‌رو شرط یکنواختی رسوبات (کم‌تر از  $1/3$ ) تأمین می‌باشد (Shafaei-Bajestan, 2013). چگالی نسبی ذرات رسوبی بستر برابر  $2/64$  بود. در تمام آزمایش‌ها عمق جریان ۱۵ سانتی‌متر و دبی ۱۶ لیتر بر ثانیه در نظر گرفته شد. جهت انتخاب اندازه رسوبات در آزمایش، معیارهای مختلفی وجود دارند که عمده‌ی این معیارها براساس قطر پایه و عرض کانال می‌باشد. معیارهای ارائه شده بدین منظور می‌باشند که رسوبات انتخاب شده در آزمایش دارای تشابه بین مدل آزمایشگاهی و مدل واقعی در طبیعت باشد. از آنجایی که در بسیاری از تحقیقات آزمایشگاهی انجام شده در خصوص آبشستگی از همین حدود اندازه استفاده شده، لذا اندازه  $1/2$  میلی‌متر برای اندازه رسوب در آزمایشات در نظر گرفته شد. در جدول ۱، پارامترهای موثر در انتخاب قطر ذره آورده شده است. در واقع این جدول نشان می‌دهد که اندازه فلوم و ذره رسوب و عرض پایه و عمق جریان با توجه به پارامترهای ذکر شده در جدول متناسب است.

جدول ۱. پارامترهای موثر در انتخاب قطر ذره رسوب (b عرض پایه و B عرض فلوم و y عمق جریان می‌باشد)

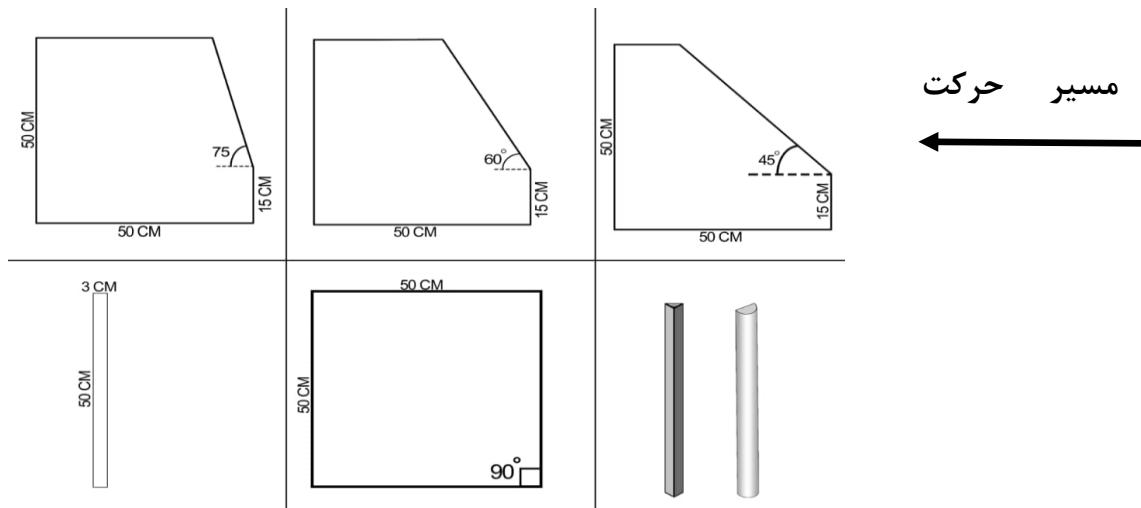
محققین	همکاران (Tafarojnoruz et al., 2010)	رادکیوی و اتما (Raudkivi & Ettema, 1983)	ملویل و چیو (Chiew & Melville, 1987)	ملویل و چیو (Chiew & Melville, 1987)	رادکیوی و اتما (Raudkivi & Ettema, 1983)	اولیتو و هاگر (Oliveto & Hager, 2002)
هدف	عدم تحت تأثیر بودن عمق آبشستگی متعادل بر اندازه ذرات رسوبی	جلوگیری از تشکیل ریبیل در بستر	صرف نظر نمودن اثر $d_{50}$ بر آبشستگی	حذف تأثیر دیواره بر آبشستگی	حذف تأثیر دیواره بر آبشستگی	حذف تأثیر دیواره بر آبشستگی
شرط	$b/d_{50}=130-25$	$0.7 < d_{50}$	$0.03-0.06 < 1.2$	$0.1 > B \geq b$	$B/b \geq 6/25$	$y \geq 2cm$
	25- 12.5	$0.7 < 1.2$	$0.03-0.06 < 1.2$	$3 \geq 1.5-3$	10- 20 $\geq$ 6.25	$15 \geq 2cm$
						$d_{50}=1/2(mm)$

برای بررسی اثر زاویه در پایه با طول توسعه یافته، زوایای ۹۰، ۷۵، ۶۰ و ۴۵ درجه با دماغه‌های نیم‌دایره و مثلثی در راستای جریان

مورد بررسی قرار گرفتند، که در شکل ۲ نمایی از پایه‌های توسعه یافته با ضخامت ۳ سانتی‌متر و طول ۵۰ سانتی‌متر و در شکل شماره ۳ شماتیک دماغه‌ها نشان داده شده است. لازم به ذکر می‌باشد که برای حالت شاهد پایه ۳×۳ سانتی‌متری با دماغه‌های نیم‌دایره و مثلثی مورد بررسی قرار گرفت. زمان تعادل جهت اطمینان از توسعه کامل آبستگي برای تمامی آزمایش‌ها ۲۴ ساعت در نظر گرفته شده است. در مجموع ۲۷ آزمایش در تحقیق حاضر مورد بررسی قرار گرفته است. به منظور مشاهده بهتر وضعیت جریان در اطراف پایه و در سطح از نخ‌های رنگی، ماده رنگی و براده چوب استفاده گردید. در ادامه با تکنیک پردازش تصویر و آنالیز تصاویر در کد نرم‌افزار متلب جریان‌های سطحی آنالیز گردیدند (Thielicke & Stamhuis, 2014).



شکل ۳. پایه توسعه یافته با زوایای مختلف و دماغه‌های نیم‌دایره و مثلثی.



شکل ۴. شماتیک دماغه‌های مورد استفاده در آزمایشات

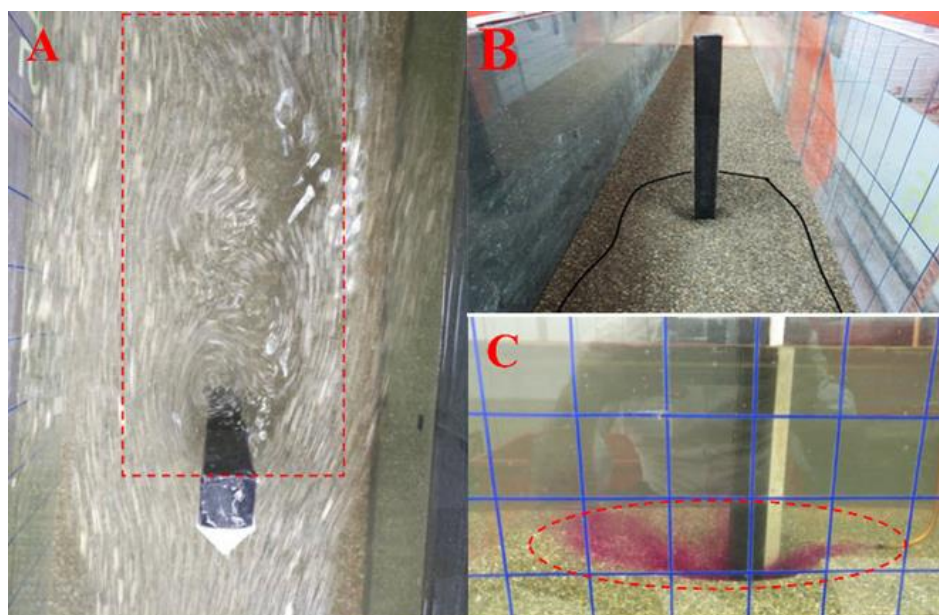
## نتایج و بحث

### مشاهدات آزمایش‌ها

در شرایط قرارگیری پایه مربعی بدون دماغه، در سطح آب، جریان گردابی سطحی در پشت پایه مشاهده گردید که این اثر با توجه به پاشیدن براده چوب در سطح به شکل گردابه‌های کوچک و پیوسته در امتداد جریان شکل گرفت (قسمت A در شکل شماره ۳). طول این گردابه‌ها در پشت پایه در حدود ۲۵ سانتی‌متر بوده و برای دماغه‌های مختلف این طول تقریباً یکسان بوده است. در بررسی خطوط جریان با استفاده از نخ رنگی و تزریق ماده رنگی مشاهده گردید که نخ‌های رنگی در پشت مانع به سمت سطح آب کشیده می‌شوند که نشان از

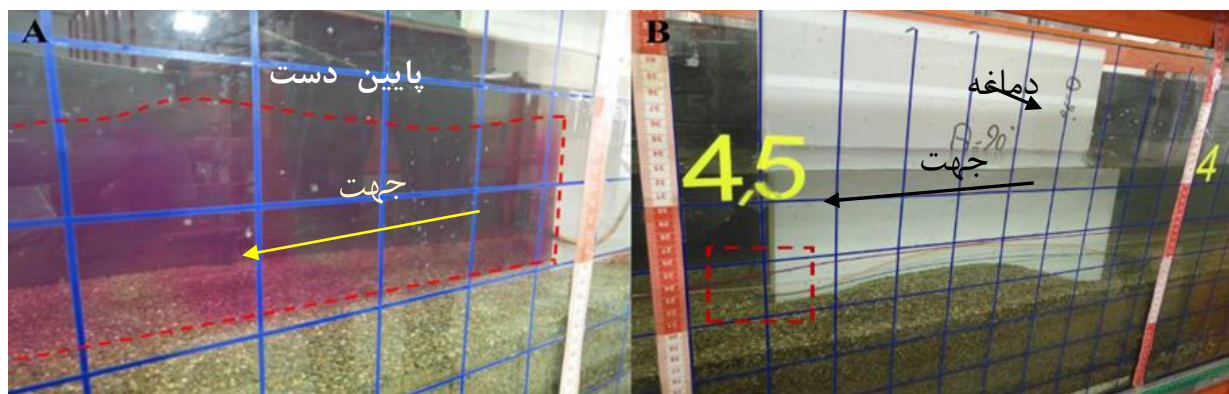


وجود جریان گردابی در عمق می‌باشد که بالارونده می‌باشند (قسمت B در شکل شماره ۳) و این اثر همان گرداب شیاری یا برخاستگی می‌باشد. در نهایت ماده رنگی از بالادست چاله و در مجاورت رسوبات کف تزریق گردید. ماده رنگی پس از رسیدن به چاله آب‌شستگی به سمت کف چاله حرکت کرده و سپس در پشت پایه به سمت سطح جریان حرکت و در کناره‌ها پس از رسیدن به سطح رسوب در کف حرکت نمود (قسمت C در شکل شماره ۳). بر اساس مشاهدات زمان انجام آزمایش، آب‌شستگی برای پایه با مقطع  $3 \times 3$  سانتی‌متر بدون دماغه در لحظات ابتدایی، نسبت به دماغه مثلی و دایره‌ای شدیدتر بوده است. با گذشت زمان از گسترش چاله آب‌شستگی ایجاد شده کاسته شد و پشته رسوبی در ادامه حرکت کرده است.



شکل ۵. پایه  $3 \times 3$  با دماغه مثلی و وضعیت جریان‌های مشاهداتی اطراف پایه.

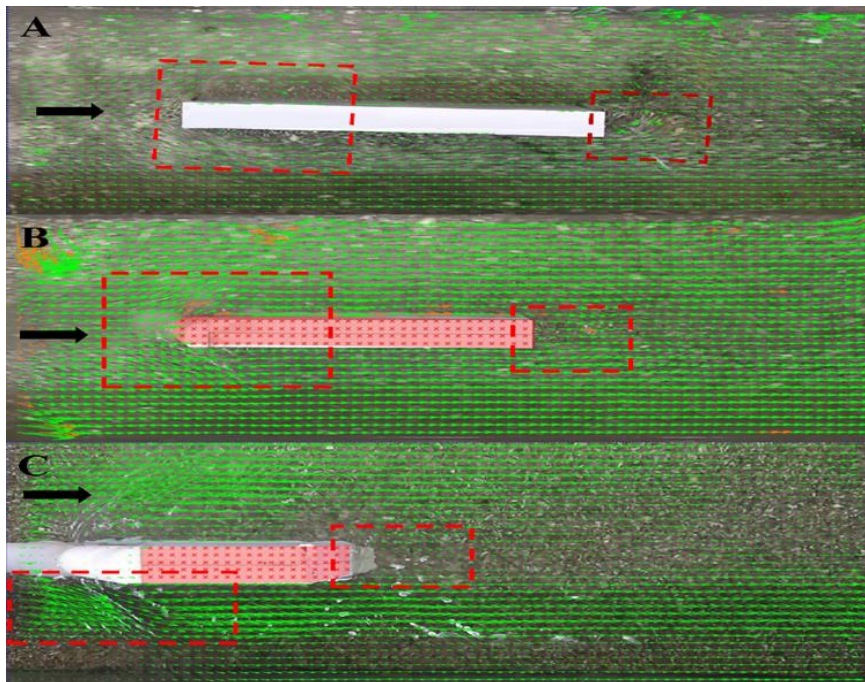
مشاهدات مربوط به تزریق ماده رنگی و قرارگیری نخ‌های رنگی برای پایه با طول ۵۰ سانتی‌متر نشان داد که در تمامی زاویه‌های بررسی شده، نخ و ماده رنگی در مجاورت چاله آب‌شستگی تحت تأثیر جریان شکل گرفته به‌درون چاله منحرف شده و در ادامه پس از عبور از پشته رسوبی تشکیل شده به ارتفاع قبل از چاله می‌رسند. این مسیر پیمایش در مجاورت پایه با توجه به طول پشته متفاوت بوده است ولی به‌طور کلی در زوایای مختلف پایه مشابه بوده است. در انتهای پایه نیز بخشی از نخ به سمت مرکز پایه کشیده شده است (شکل ۶). تزریق ماده رنگی در این ناحیه (پشت پایه) دچار پخشیدگی بالارونده به سمت سطح آب شده است (شکل ۶A). شدت پخشیدگی و بالاروندگی ماده رنگی برای ضخامت  $1/5$  سانتی‌متری کم‌تر بوده است.



شکل ۶. پایه  $3 \times 5$  بدون دماغه با زاویه  $90^\circ$  درجه و وضعیت جریان‌های مشاهداتی اطراف پایه.

با افزایش طول پایه مکانیسم‌های جریان عبوری تحت تأثیر قرار گرفته، که در نهایت منجر به تغییر شکل آب‌شستگی در اطراف پایه

می‌گردد. خطوط جریان عبوری در سطح برای حالت پایه با طول افزایش یافته‌ی بدون دماغه در راستای طولی و تا فاصله حدود تا ۲۰ سانتی‌متری از مانع دارای نوسان بوده است و در عرض‌های مانده تا انتهای فلوام دارای خطوط جریان صاف بوده است و دلیل آن می‌تواند وجود دنباله پایه باشد که مانع از تداخل جریان نعل اسبی اولیه و گرداب‌های برخاستگی پشت پایه باشد. قرارگیری دماغه مثلثی و دایره‌ای سبب شد تا خطوط جریان به مانع نزدیک‌تر شوند و این بخش از نوسانات ابتدای مانع حذف گردد. بخشی از جریان در برخورد با دماغه پایه به کناره منحرف می‌شود و در ادامه خطوط جریان کاملاً در راستای جریان می‌باشند؛ این در حالی است که برای آرایش ۳×۳ سانتی‌متری، نوسانات خطوط جریان در کناره طولی پایه حدود ۷ برابر طولی ضخامت پایه بوده است. در پشت پایه نیز یک گردابه ضعیف در سطح شکل می‌گیرد که در امتداد عمودی جریان بالارونده انتهای پایه می‌باشد (شکل A۵). با کاهش زاویه از ۹۰ به ۴۵ درجه، انحراف خطوط جریان برخوردی کاهش می‌یابد و گردابه ایجاد شده در پشت مانع، کوچک‌تر می‌گردد. و در مجموع ابعاد گردابه‌های شکل گرفته از زاویه ۹۰ به ۴۵ کاهش می‌یابد. اثر گردابه‌های سطحی در شکل ۵ نشان داده شده است.



شکل ۷. گردابه و جریان سطحی پایه ۳×۵۰ برای زوایای ۹۰، ۷۵ و ۴۵ درجه.

شکل توپوگرافی بستر در حالت پایه با طول افزایش یافته نسبت به حالت پایه مربعی نیز متفاوت بوده است. به طوری که در هر سه آرایش بدون دماغه و دارای دماغه‌های مثلثی و دایره‌ای یک پشته رسوبی با ارتفاع بین ۲ الی ۳ سانتی‌متر و عرض و طول معادل با عرض پایه (۳ سانتی‌متر) در پشت پایه شکل گرفت (شکل ۶). این پشته رسوبی زمانی شروع به شکل‌گیری نمود که چاله آب‌شستگی کاملاً شکل گرفته بوده و پشته حاصل از چاله در حال پیش‌روی به سمت پایین دست بوده است. در زمان آزمایش مشاهده گردید که رسوباتی که از پشته جدا شده و حالت معلق نزدیک به کف در مجاورت پایه حرکت می‌کرده‌اند به پشت پایه کشیده شده و تشکیل پشته داده‌اند. قسمت انتهایی پشته رسوبی تشکیل شده در این حالت نسبت به حالت پایه مربعی بیش‌تر تحت تأثیر شکل دماغه قرار گرفته است؛ به طوری که دماغه‌های مثلثی و دایره‌ای سبب تشکیل دو زبانه در طرفین شده‌اند که ناشی از هدایت جریان به کناره‌ها توسط دماغه بوده است و این اثر برای دماغه مثلثی به دلیل زاویه انحراف بیش‌تر جریان، بیش‌تر بوده است.

اثر همزمان گرداب‌های نعل اسبی و برخاستگی نرخ آب‌شستگی و پتانسیل انتقال رسوب به پایین دست را افزایش می‌دهند. افزایش طول پایه پل در راستای جریان سبب می‌شود تا محل شکل‌گیری گرداب‌های برخاستگی به نقطه دورتر از گرداب نعل اسبی منتقل گردند. انتقال محل تشکیل گرداب‌های برخاستگی نسبت به محل گرداب نعل اسبی به دلیل افزایش طول، سبب می‌شود که خطوط جریان گردابی که از گرداب نعل اسبی خارج می‌شوند در اثر برخورد با دیواره پایه تحت تأثیر جریان عبوری قرار گرفته و خطوط جریان عبوری به حالت مستقیم نزدیک شوند. ایجاد فاصله بین گرداب نعل اسبی و برخاستگی با افزایش طول پایه پل در راستای جریان سبب می‌شود که از قدرت



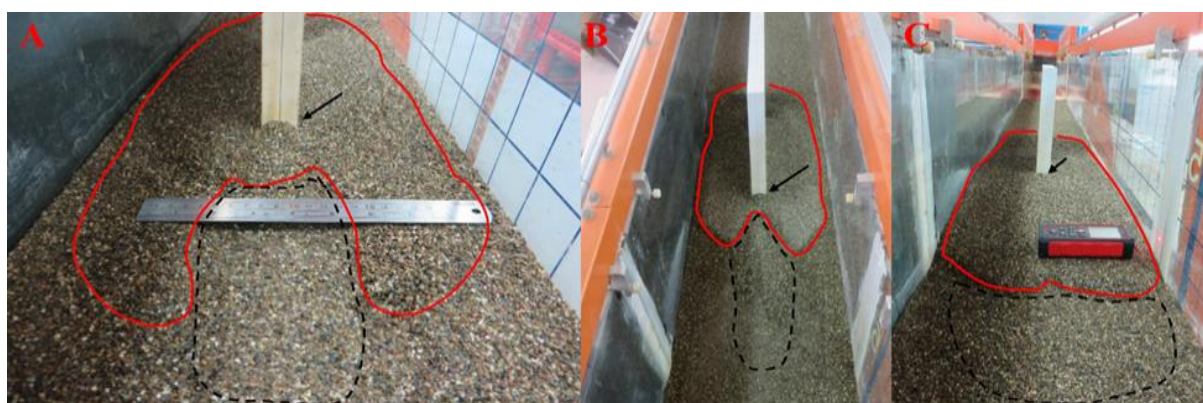
آبشستگی برای عمق حداکثر آبشستگی کاسته شود ولی طول چاله آبشستگی افزایش می‌یابد.



شکل ۸. پشته تشکیل شده در پشت پایه با طول توسعه یافته.

### پروفیل‌های طولی چاله آبشستگی

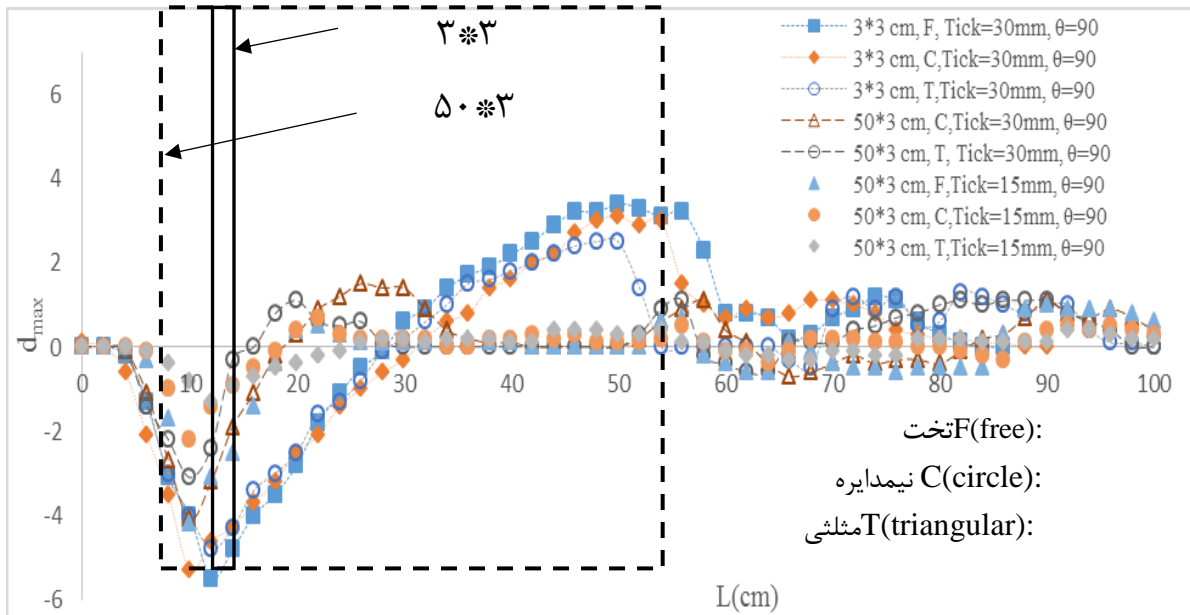
در حالت پایه  $3 \times 3$  سانتی متری، چاله آبشستگی در محدوده اطراف پایه بوده، در حالی که برای پایه با طول توسعه یافته، شکل حفره تغییر یافت. به طوری که ابعاد چاله کم، ارتفاع پشته نیز کاهش یافته ولی طول پشته افزایش یافت. با کاهش ضخامت پایه از ۳ سانتی متر به  $1/5$  سانتی متر تغییراتی در سطح جریان عبوری و وضعیت توپوگرافی بستر شکل گرفت که علت آن را در کاهش سطح برخورد جریان با پایه می‌باشد. با کاهش سطح برخوردی پایه با جریان، میزان بالارفتگی موضعی جریان کاهش یافته (فراآب)، ستون آب تشکیل شده دارای سطح مقطع کم‌تر و در نتیجه فشار پایین رونده کم‌تر و در ادامه گرداب نعل اسبی تحت تأثیر آن دچار کاهش قدرت تخریبی گردید. در پشت پایه نیز قدرت گرداب برخاستگی هم از گرداب جلوی پایه فاصله گرفته و هم کاهش قدرت به دلیل کاهش عرض داشته است. در مجموع با توجه به موارد اشاره شده منجر به کاهش آبشستگی موضعی اطراف پایه گردید. در شکل ۷ وضعیت توپوگرافی چاله برای پایه با  $50 \times 3$  با زاویه  $90^\circ$  درجه نشان داده شده است که تحت تأثیر شکل دماغه شکل‌های متفاوتی ایجاد کرده است.



شکل ۹. وضعیت توپوگرافی بستر در پایین دست پایه زاویه  $90^\circ$  درجه و ضخامت ۳ سانتی متر، A: دماغه مثلثی، B: دماغه نیم‌دایره و C: بدون دماغه. جهت جریان به سمت بیرون صفحه است

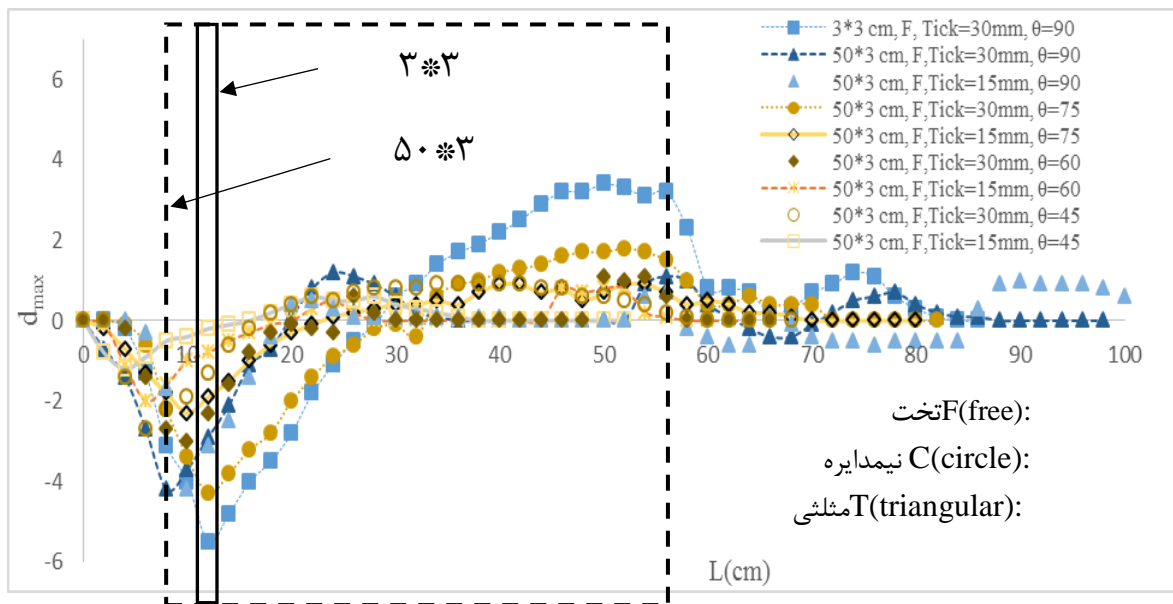
بر اساس نیمرخ طولی (شکل ۸) مشاهده می‌شود که پروفیل طولی چاله آبشستگی پایه  $50 \times 3$  سانتی متری با زاویه  $90^\circ$  درجه نسبت به پایه  $3 \times 3$  دارای کشیدگی بیش‌تری می‌باشد. همچنین محل شکل‌گیری حداکثر عمق چاله از پیشانی پایه به کناره پایه خصوصاً برای دماغه‌های دایره‌ای و مثلثی می‌گردد. در حالت بدون دماغه، افزایش طول پایه سبب می‌شود که گرداب نعل اسبی در جلو و اطراف پایه تحت تأثیر قرار بگیرد. به طوری که گرداب شکل گرفته در حالت پایه مربعی ابتدا جلو و اطراف پایه را در بر می‌گیرد و در ادامه به پشت پایه رسیده و با گردابه برخاستگی تلفیق شده و در نتیجه گرداب قوی‌تر می‌شود. در حالی که طول پایه افزایش یابد، گرداب شکل گرفته در جلوی پایه از گرداب برخاستگی دور می‌گردد و در راستای طولی پایه، خطوط جریان شکل می‌گیرند. این عامل سبب جلوگیری از ادغام

دو گردابه مذکور شده و در نتیجه قدرت آبشستگی جریان کاهش می‌یابد.



شکل ۱۰. پروفیل طولی پایه ۳×۳ و ۵۰×۳ با زاویه ۹۰ درجه و شکل‌های مختلف دماغه.

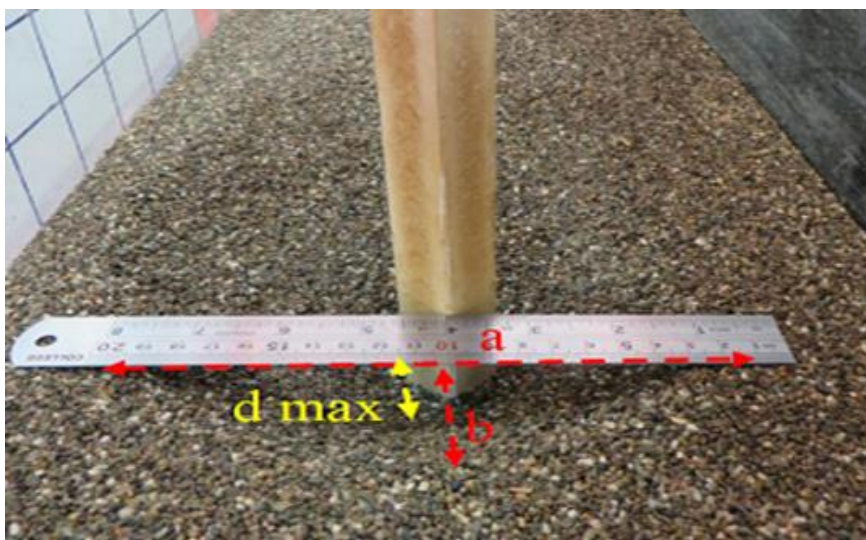
در ادامه برای هر یک از زاویه‌های بررسی شده، حالت بدون دماغه برای دو ضخامت پایه در شکل ۹ آورده شده است. مشاهده می‌شود که برای پایه توسعه یافته شکل کلی پروفیل برای زوایا و ضخامت‌های بررسی شده مشابه می‌باشد و نسبت به یکدیگر فقط عمق چاله و ارتفاع پشته متفاوت دارند. همچنین ضخامت ۱/۵ سانتی‌متری دارای ابعاد کوچک‌تری نسبت به ضخامت ۳ سانتی‌متری می‌باشد.



شکل ۱۱. مقایسه پروفیل طولی برای زوایای مختلف در حالت بدون دماغه F (Free) و طول پایه ۵۰cm

#### ابعاد حفره و راندمان آبشستگی

از جمله روش‌های بررسی پارامترهای مختلف آبشستگی بر توپوگرافی بستر، بررسی پارامترهای حفره بستر پس از آبشستگی می‌باشند که برای این منظور پارامترهای حفره شامل عرض چاله (a)، فاصله پیشانی تا شروع چاله (b) و حداکثر عمق آبشستگی ( $d_{max}$ ) مورد مقایسه قرار گرفتند. پارامترهای ذکر شده در شکل ۱۰ نشان داده شده اند.



شکل ۱۲. پارامترهای آبستگی مورد بررسی

همچنین راندمان آبستگی با استفاده از رابطه (۴) محاسبه گردید.

$$\%R = (d_1 - d_2) / d_1 \times 100$$

رابطه (۴)

در رابطه فوق،  $d_1$  حداکثر عمق آبستگی در آزمایش شاهد و  $d_2$  حداکثر عمق آبستگی در شرایط مختلف طول، زاویه و ضخامت پایه می‌باشد. در تحقیق حاضر کلیه پارامترها شامل تغییرات ابعاد چاله و راندمان بر اساس پایه  $3 \times 3$  بدون دماغه بوده است که به‌عنوان آزمایش شاهد می‌باشد. با توجه به نتایج جدول ۲ مشاهده می‌گردد که ابعاد و پارامترهای چاله آبستگی در تمامی زاویه‌های بررسی شده نسبت به پایه شاهد  $3 \times 3$  سانتی‌متری بدون دماغه، کاهش داشته‌اند. به‌طور کلی، میزان کاهش حداکثر عمق چاله آبستگی بیش‌تر از دو پارامتر دیگر (عرض چاله و فاصله شروع چاله تا پایه در بالادست) تحت تأثیر شکل دماغه، ضخامت و طول پایه می‌باشد. افزودن دماغه در مجموع سبب کاهش ابعاد چاله آبستگی می‌گردد و از بین دماغه‌های استفاده شده در تحقیق حاضر، دماغه مثلثی عملکرد بهتری داشته است. به‌طور کلی با توجه به نتایج جدول فوق می‌توان بیان داشت که ابعاد چاله آبستگی با افزایش طول پایه کاهش می‌یابد و با کاهش ضخامت پایه در حالت طول توسعه یافته نیز کاهش می‌یابد. در تمامی شرایط جریان نیز اعمال دماغه سبب می‌شود که ابعاد چاله کاهش یابد و این اثر برای دماغه مثلثی بیش‌تر از دایره‌ای می‌باشد. از بین زوایای بررسی شده بیش‌ترین میزان کاهش ابعاد چاله آبستگی به‌ترتیب از زاویه ۴۵، ۶۰، ۷۵ و ۹۰ درجه بوده است. برای مثال برای پایه با دماغه مثلثی و ضخامت ۳ سانتی‌متری میزان کاهش عرض چاله (a) نسبت به شاهد در زاویه ۴۵ درجه برابر با  $83/3\%$ ، در زاویه ۶۰ درجه برابر با  $61/7\%$ ، در زاویه ۷۵ درجه برابر با  $46/7\%$  و در زاویه ۹۰ درجه برابر با  $25\%$  می‌باشد. برای راندمان آبستگی نیز با توجه به نتایج جدول ۲ مشاهده می‌شود که قرارگیری دماغه به‌طور کلی سبب افزایش راندمان آبستگی می‌گردد و بیش‌ترین راندمان مربوط به دماغه مثلثی می‌باشد. در ادامه با تغییر زاویه از ۹۰ به ۴۵ درجه، میزان راندمان افزایش می‌یابد. از طرفی با کاهش ضخامت پایه راندمان افزایش می‌یابد. از این‌رو بیش‌ترین راندمان مربوط به پایه با ضخامت  $1/5$  سانتی‌متر، دماغه مثلثی و زاویه ۴۵ درجه می‌باشد.

در جدول شماره ۳ نتایج این تحقیق با سایر محققین که شرایط آزمایشگاهی نزدیکی (آب زلال) داشتند صورت گرفت. همانطور که مشاهده می‌شود در تمامی تحقیق‌های صورت گرفته عمق آبستگی متأثر از تغییر زاویه دماغه کاهش یافته است. و با کاهش زاویه دماغه عمق آبستگی کاهش می‌یابد. همچنین اختلاف بین تحقیق‌ها در زوایای انتخاب شده، نوع پایه‌ها، طول پایه‌ها و شکل هندسی پایه‌ها در شرایط آزمایشگاهی می‌باشد. با توجه به شکل ۱۰ شیب تغییر عمق آبستگی نسبت به زاویه در تمام تحقیق‌های صورت گرفته، نزدیک بوده و نشان از تأثیر یکسان شیب دارد.



جدول ۲. نتایج اندازه‌گیری پارامترهای چاله آبشستگی به همراه راندمان و تغییرات ابعاد نسبت به شاهد

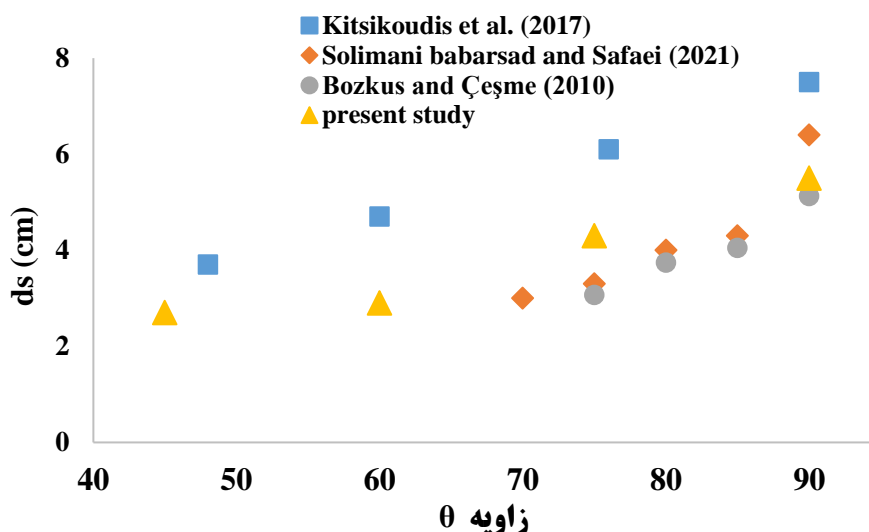
شماره	نام آزمایش	a(cm)	a(%)	b(cm)	b(%)	d <sub>max</sub> (cm)	R%
۱	۳×۳ cm, F, Tick=۳۰mm, θ=۹۰	۲۴	۰	۸/۲	۰	۵/۵	۰
۲	۳×۳ cm, C, Tick=۳۰mm, θ=۹۰	۱۹	۲۰/۸	۷/۵	۸/۵	۴/۸	۱۲/۷
۳	۳×۳ cm, T, Tick=۳۰mm, θ=۹۰	۱۹	۲۰/۸	۷	۱۴/۶	۴/۶	۱۶/۴
۴	۳×۵۰ cm, F, Tick=۳۰mm, θ=۹۰	۲۱/۵	۱۰/۴	۷/۶	۷/۳	۴/۵	۱۸/۲
۵	۳×۵۰ cm, C, Tick=۳۰mm, θ=۹۰	۱۸	۲۵	۶/۸	۱۷/۱	۴/۱	۲۵/۴
۶	۳×۵۰ cm, T, Tick=۳۰mm, θ=۹۰	۱۷	۲۹/۲	۶	۲۶/۸	۳/۱	۴۳/۶
۷	۳×۵۰ cm, F, Tick=۳۰mm, θ=۷۵	۱۵	۳۷/۵	۷	۱۴/۶	۴/۳	۲۱/۸
۸	۳×۵۰ cm, C, Tick=۳۰mm, θ=۷۵	۱۴	۴۱/۷	۶/۵	۲۰/۷	۳/۶	۳۴/۵
۹	۳×۵۰ cm, T, Tick=۳۰mm, θ=۷۵	۱۲/۸	۴۶/۷	۵/۸	۲۹/۳	۱/۷	۶۹
۱۰	۳×۵۰ cm, F, Tick=۳۰mm, θ=۶۰	۱۲	۵۰	۴/۴	۴۶/۳	۲/۹	۴۷/۳
۱۱	۳×۵۰ cm, C, Tick=۳۰mm, θ=۶۰	۹	۶۲/۵	۳/۱	۶۲/۲	۲/۱	۶۱/۸
۱۲	۳×۵۰ cm, T, Tick=۳۰mm, θ=۶۰	۹/۲	۶۱/۷	۳	۶۳/۴	۱/۳	۷۶/۴
۱۳	۳×۵۰ cm, F, Tick=۳۰mm, θ=۴۵	۱۱/۱	۵۳/۸	۴/۱	۵۰	۲/۷	۵۱
۱۴	۳×۵۰ cm, C, Tick=۳۰mm, θ=۴۵	۴/۲	۸۲/۵	۲/۷	۶۷/۱	۰/۸	۸۵/۴
۱۵	۳×۵۰ cm, T, Tick=۳۰mm, θ=۴۵	۴	۸۳/۳	۲/۱	۷۴/۴	۰/۶	۸۹
۱۶	۳×۵۰ cm, F, Tick=۱۵mm, θ=۹۰	۱۳/۵	۴۳/۸	۵/۲۵	۳۶	۴/۲	۲۳/۶
۱۷	۳×۵۰ cm, C, Tick=۱۵mm, θ=۹۰	۱۰	۵۸/۳	۴/۵	۴۵/۱	۲/۲	۶۰
۱۸	۳×۵۰ cm, T, Tick=۱۵mm, θ=۹۰	۸	۶۶/۷	۳/۵	۵۷/۳	۱/۳	۷۶/۴
۱۹	۳×۵۰ cm, F, Tick=۱۵mm, θ=۷۵	۱۰/۵	۵۶/۳	۴	۵۱/۲	۲/۳	۵۸/۲
۲۰	۳×۵۰ cm, C, Tick=۱۵mm, θ=۷۵	۸	۶۶/۷	۳/۲	۶۱	۱/۱	۸۰
۲۱	۳×۵۰ cm, T, Tick=۱۵mm, θ=۷۵	۷/۴	۶۹/۲	۳	۶۳/۴	۱/۱	۸۰
۲۲	۳×۵۰ cm, F, Tick=۱۵mm, θ=۶۰	۸	۶۶/۷	۳	۶۳/۴	۲	۶۳/۷
۲۳	۳×۵۰ cm, C, Tick=۱۵mm, θ=۶۰	۶/۴	۷۳/۳	۲/۴	۷۰/۷	۰/۹	۸۳/۷
۲۴	۳×۵۰ cm, T, Tick=۱۵mm, θ=۶۰	۶/۵	۷۲/۹	۲/۸	۶۵/۹	۱	۸۱/۸
۲۵	۳×۵۰ cm, F, Tick=۱۵mm, θ=۴۵	۸/۲	۶۵/۸	۳/۲	۶۱	۱/۲	۷۸/۲
۲۶	۳×۵۰ cm, C, Tick=۱۵mm, θ=۴۵	۲/۴	۹۰	۲	۷۵/۶	۰/۳	۹۴/۵
۲۷	۳×۵۰ cm, T, Tick=۱۵mm, θ=۴۵	۲	۹۱/۷	۱/۸	۷۸	۰/۲	۹۶/۴

در جدول بالا نماد F نشان دهنده دماغه تخت یا بدون دماغه، C معرف دماغه دایره شکل و T معرف دماغه مثلثی شکل می باشد. Tick معرف ضخامت پایه و θ زاویه دماغه می باشد.

جدول شماره ۳. مقایسه نتایج تحقیق حاضر با نتایج دیگر پژوهشگران در شرایط آب زلال

نام پژوهشگر	زوایای پایه های استفاده شده در تحقیق (θ)	زاویه دماغه پایه مرتبط با کمترین آبشستگی (درجه)	میزان آبشستگی (سانتی متر)
Solimani babarsad & Safaei (۲۰۲۱)	۹۰، ۸۵، ۸۰، ۷۵، ۷۰	۷۰	۳
Kitsikoudis et al (۲۰۱۷)	۹۰، ۷۶، ۶۰، ۴۸	۴۸	۳/۷
Bozkus & Çeşme (۲۰۱۰)	۹۰، ۸۵، ۸۰، ۷۵	۷۵	۳/۰۷
present study	۹۰، ۷۵، ۶۰، ۴۵	۴۵	۲/۷





شکل ۱۳. تأثیر زاویه دماغه بر عمق آبشستگی در تحقیقات پژوهشگران و نتایج این پژوهش

## نتیجه گیری

در تحقیق حاضر به بررسی آزمایشگاهی اثر همزمان توسعه طولی پایه، زاویه پایه در راستای جریان و ضخامت پایه بر آبشستگی و پارامترهای آن در شرایط آب زلال و با رسوبات با قطر متوسط  $1/2$  میلی متر پرداخته شده است. همانطور که در جدول شماره ۳ مشخص گردیده تعداد ۲۷ آزمایش با حالت‌های با و بدون دماغه و با اشکال با دماغه‌های تخت یا بدون دماغه (Free:F) و دماغه گرد یا نیم دایره (Circle:C) و مثلثی شکل (Triangular:T) و با حالت‌های طول پایه 3cm و 50cm در جهت جریان و با ضخامت های پایه 30mm و 15mm در حالت دماغه مایل با زوایای ۴۵ و ۶۰ و ۷۵ و ۹۰ یعنی حالت قائم انجام گردید. نتایج نشان داد که: بطور کلی افزایش طولی پایه (در محدوده پارامترهای بررسی شده در تحقیق حاضر) سبب می‌گردد که گرداب نعل اسبی شکل گرفته در جلوی پایه نتواند به گرداب برخاستگی پشت پایه متصل گردد و در نتیجه قدرت تخریبی گرداب نسبت به حالتی که طول پایه کم بوده است، کاهش می‌یابد.

### تأثیر افزایش طولی پایه در مسیر جریان

افزایش طولی پایه (در محدوده پارامترهای بررسی شده در تحقیق حاضر) سبب می‌گردد که گرداب حلزونی شکل گرفته در جلوی پایه نتواند به گرداب برخاستگی پشت پایه متصل گردد و در نتیجه قدرت تخریبی گرداب نسبت به حالتی که طول پایه کم‌تر بوده است، کاهش می‌یابد.

### تأثیر زاویه

تغییر زاویه پایه در جهت جریان از ۹۰ به ۴۵ درجه سبب می‌گردد که ستون فشار آب شکل گرفته در جلوی پایه کم گردد و از این‌رو جریان شکل گرفته ضعیف گردد و در نهایت باعث کاهش ابعاد چاله آبشستگی تا ۸۰٪ گردد.

### تأثیر شکل دماغه

نتایج تحقیق حاضر نشان داد که در محدوده آزمایش‌های تحقیق حاضر، دماغه مثلثی نسبت به دماغه دایره ای عملکرد بهتری در کاهش ابعاد چاله آبشستگی داشته است. و تا ۱۷٪ توانسته نسبت به حالت تخت در زاویه قائم عمق آبشستگی را کاهش دهد. در حالت دماغه مثلثی خطوط جریان بنحو بهتری به اطراف منحرف شده و آشفتگی کمتری در جریان نسبت به حالت تخت و دایره ای ایجاد می‌گردد. از این‌رو از قدرت اعمال شده به پایه جهت ایجاد آبشستگی می‌کاهد.

### تأثیر ضخامت پایه:

در شرایط مشابه نتایج نشان داد که حداکثر عمق آبشستگی در پایه به ضخامت 15mm کمتر از پایه به ضخامت 30mm می‌باشد و تقریباً هشت تا ده درصد کاهش ضخامت در کاهش میزان آبشستگی مؤثر بوده است. این نتیجه را می‌توان به کاهش اثر پایه در آشفتگی خطوط جریان مرتبط ساخت.



با در نظر گرفتن پارامترهای بررسی شده دماغه مایل با طول 50cm در جهت جریان و با زاویه ۴۵ درجه و شکل مثلثی بهترین تأثیر را در کاهش عمق آبشستگی تا حدود ۹۰٪ در ضخامت 30mm و ۹۶٪ در ضخامت 15mm داشته است.

"هیچ‌گونه تعارض منافع بین نویسندگان وجود ندارد"

## REFERENCES

- Akhlaghi, E., Babarsad, M.S., Derikvand, E. & Abedini, M. (2020). Assessment the effects of different parameters to rate scour around single piers & pile groups: a review. *Archives of Computational Methods in Engineering*, 27, 183-197
- Arvanaghi, H., Jafari, F., Abbaspour, A. & Hosseinzadeh Dalir, A. (2021). Numerical and Experimental Investigation of Local Scour around Inclined Pier Group with Collar and Nanostructures. *Water and Soil Science*, 31, 27-39
- Bozkus, Z. & Çeşme, M. (2010). Reduction of scouring depth by using inclined piers. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 37, 1621-1630
- Bozkus, Z. & Yildiz, O. (2001). Experimental investigation of scouring around inclined bridge piers. *Wetlands Engineering & River Restoration* .
- Bozkus, Z. & Yildiz, O. (2004). Effects of inclination of bridge piers on scouring depth. *Journal of Hydraulic Engineering*, 130, 827-832
- Chiew, Y.-M. & Melville, B.W. (1987). Local scour around bridge piers. *Journal of hydraulic research*, 25, 15-26
- Chiew, Y.M. (1984). Local scour at bridge piers. *Publication of: Auckland University, New Zealand*,
- Eghbalnik, L., Vaghefi, M. and Golbaharhaghighi, M.R. (2019). The Effect of Flow Conditions on Bed Topography in a 180 Degree Bend Containing 6-Inclined-Vertical Pier Groups in a Vane Perpendicular to the Flow. *Modares Civil Engineering journal*, 19, 1-16. (In Farsi)
- Esmaeili, v.m., Sadati, s.s. & Fazloulou, 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, 13-25. (In Farsi)
- Ettema, R., Constantinescu, G. & Melville, B.W. (2017). Flow-field complexity & design estimation of pier-scour depth: Sixty years since Laursen & Toch. *Journal of Hydraulic Engineering*, 143, 03117006
- Guan, D., Chiew, Y.-M., Wei, M. & Hsieh, S.-C. (2019). Characterization of horseshoe vortex in a developing scour hole at a cylindrical bridge pier. *International journal of sediment research*, 34, 118-124
- Kardan, Nazila, Hakimzade, Habib, Hasanzade and Yousef (2020). Simulation of intermittent vortex release & sediment transfer by Flow3D around flow-exposed obstacles. *Civil Engineering, ferdowsi*, 33, 1-20
- Kitsikoudis, V., Kirca, V.O., Yagci, O. & Celik, M.F. (2017). Clear-water scour & flow field alteration around an inclined pile. *Coastal Engineering*, 129, 59-73
- Masjedi, A., Telvari, A. & Kazemi, H. (2013). Laboratory study of the effect of the geometric shape of the bridge base on the control of local scour around it in the river arch. *jwem.areeo.ac.ir*, 4, 208-216
- Melville, B.W. The physics of local scour at bridge piers. (2008) Proceedings 4th International Conference on Scour and Erosion (ICSE-4). November 5-7, 2008, Tokyo, Japan,. 28-40.
- Nobakht, A., Ghodsian, M. and Mehraeen, M. (2020). Experimental investigation on afflux due to inclined circular bridge pier. *Sharif Journal of Civil Engineering*, 36, 123-132. (In Farsi)
- Oliveto, G. & Hager, W.H. (2002). Temporal evolution of clear-water pier & abutment scour. *Journal of Hydraulic Engineering*, 128, 811-820
- Raudkivi, A.J. & Ettema, R. (1983). Clear-water scour at cylindrical piers. *Journal of hydraulic engineering*, 109, 338-350
- Safaei, A., Choramin, M., Khajavi, S., Parmoon, A.A. and Arezoo, A.A. (2015). Analyzing the affective parameters on the amount of bridge scour in the vicinity of the rough collar in laboratory model. *WALIA journal*, 17-21.
- Safaei, A., Solimani Babarsad, M., Aghamajidi, R. and Eftekhari, P. (2021). Experimental Study Effect of the Flexible Collar on Bridge Pier Scouring Depth. *Irrigation Sciences and Engineering*, 44, 53-66
- Safaei, A., Solimani Babarsad, M., Aghamajidi, R. and Hojatkhah, A. (2022). Laboratory Study of Deflector Structure's Shapes on Bridge Pier Scouring. *Journal of Hydraulics*, 17, 15-33. (In Farsi)
- Salim, M. and Jones, J.S. Scour around exposed pile foundations (year?). North American water and environment congress & destructive water, 1996. ASCE, 2202-2211.

- Salimi, S. and Ghodsian, M. 2008. Laboratory study of scour caused by the base of a circular sloping bridge. *Fourth National Congress of Civil Engineering*.
- Shafaei-Bajestan, m. 2013. *Basic theory and practice of sediment transport*, ahwaz, shahid chamran university.
- Solimani Babarsad, M., Hojatkah, A., Safaei, A. and Aghamajidi, R. (2021a). Laboratory investigation of deflector structure effect on bridge pier scouring. *Irrigation Sciences and Engineering*, 43, 91-104
- Solimani Babarsad, M. and Safaei, A. (2021). Experimental Study of Scour Around Pier with Inclined Head. *Water Resources Engineering*, 14, 53-72. (In Farsi)
- Solimani Babarsad, M., Safaei, A. and Aghamajidi, R. (2021b). Laboratory Study of Cable and Sill Protection on Scouring Pattern Around the Bridge Pier. *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 52, 523-538. (In Farsi)
- Tafarajnoruz, A., Gaudio, R. and Dey, S. (2010). Flow-altering countermeasures against scour at bridge piers: a review. *Journal of hydraulic research*, 48, 441-452
- Thielicke, W. and Stamhuis, E.J. (2014). PIVlab-time-resolved digital particle image velocimetry tool for MATLAB. *Published under the BSD license, programmed with MATLAB*, 7, R14
- Voskoboinick, A., Voskoboinick, V., Turick, V., Voskoboinyk, O., Cherny, D. and Tereshchenko, L. (year?) Interaction of Group of Bridge Piers on Scour. International Conference on Computer Science, Engineering and Education Applications, 2020?. Springer, 3-17.
- Yang, Y., Melville, B.W., Macky, G.H. and Shamseldin, A.Y. (2019). Local scour at complex bridge piers in close proximity under clear-water and live-bed flow regime. *Water*, 11, 1530