

## Laboratory Study of Cable and Sill Protection on Scouring Pattern Around the Bridge Pier

MOHSEN SOLIMANI BABARSAD<sup>1\*</sup>, ABBAS SAFAEI<sup>1</sup>, ROOZBEH AGHAMAJIDI<sup>2</sup>

1. Department of Water Sciences and Engineering, Water Science and Environmental Research Center, Islamic Azad University, Shoushtar Branch, Shoushtar, Iran.

2. Department of Civil, Islamic Azad University, Sepidan Branch, Sepidan, Iran.

(Received: Sep. 24, 2020- Revised: Jan. 25, 2021- Accepted: Feb. 6, 2021)

### ABSTRACT

Local scouring around the bridge pier is the leading causes of their destruction. Thus, to reduce and control this phenomenon, numerous researches have been done and many solutions have been suggested. These solutions are classified in two parts, direct and indirect protections methods. In this study, by definition different scenarios, both protection methods and their combined effects were investigated. In this research, cable around piers, as an indirect method, and sill as a direct method were used. Different locations of the sill (front and back of the pier) and the cable around the pier with relative pitch equal to 0.33, 0.50 and 0.67 in clean water conditions were investigated. In the best case, the pier with a front sill and a relative cable pitch of 0.33, has the least amount of scouring. This pier has the highest amount of scour depth reduction with 63% among the other scenarios. In this regard, the pier with a back sill and a relative cable pitch of 0.33, showed 45% reduction in scouring. This indicates that under the same conditions, with the sill movement from the back to the front of the pier, scouring depth parameter improved 18 percent.

**Keywords:** Scour, Pier, Sill, Cable, Clear Water.

## بررسی آزمایشگاهی تأثیر کابل و آستانه بر عمق آبشستگی و الگوی جریان پیرامون پایه پل

محسن سلیمانی بابرصاد<sup>۱\*</sup>، عباس صفائی<sup>۱</sup>، روزبه آقامجیدی<sup>۲</sup>

۱. گروه علوم و مهندسی آب، مرکز تحقیقات علوم آب و محیط زیست، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد شوشتر، شوشتر، ایران.

۲. بخش عمران، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد سپیدان، سپیدان، ایران.

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۷/۳ - تاریخ بازنگری: ۱۳۹۹/۱۱/۶ - تاریخ تصویب: ۱۳۹۹/۱۱/۱۸)

### چکیده

آبشستگی موضعی اطراف پایه‌های پل یکی از علل تخریب آنها می‌باشد. از این رو جهت کاهش و کنترل این پدیده، تحقیقات گسترده‌ای صورت گرفته و راهکارهایی در این راستا ارائه گردیده است. این راهکارها شامل دو بخش مستقیم و غیرمستقیم بوده که در این تحقیق با تعریف سناریوهایی، بررسی هر دو روش و تأثیر توامان آنها انجام شد. در این مطالعه، روش استفاده از کابل که باعث تغییر در الگوی جریان اطراف پایه می‌گردد، بعنوان روش غیرمستقیم و آستانه که باعث انحراف خطوط جریان از روی بستر می‌شود، به عنوان روش مستقیم در نظر گرفته شدند. از این رو حالت‌های مختلف از آستانه، در جلوی پایه، پشت پایه و کابل دور پایه با گام‌های نسبی برابر ۰/۳۳، ۰/۵۰ و ۰/۶۷ در شرایط آب زلال مورد بررسی قرار گرفت. در بهترین حالت، پایه دارای آستانه در جلو و گام کابل ۰/۳۳، دارای کمترین مقدار آبشستگی می‌باشد. این پایه با میزان ۶۳٪ بیشترین مقدار کاهش عمق آبشستگی در بین سایر سناریوها را داراست. در همین راستا پایه آستانه در پشت و گام کابل ۰/۳۳، دارای کاهش ۴۵ درصدی می‌باشد که نشان می‌دهد در شرایط یکسان با جابجایی آستانه از پشت پایه به جلو پایه، ۱۸ درصد عمق آبشستگی کاهش می‌یابد.

واژه‌های کلیدی: آبشستگی، پایه پل، آستانه، کابل، آب زلال.

### مقدمه

پل‌ها به عنوان راه‌های ارتباطی وظایف ویژه‌ای را عهده‌دار هستند. صورتی که صدمه دیدن و یا تخریب پایه یک پل بر اثر جریان‌های سیلابی پی در پی، می‌تواند خسارات زیادی را از نظر جانی و مالی بر کشورها تحمیل کند (Lagasse and Richardson, 2001). وجود پایه پل در مسیر رودخانه می‌تواند باعث برخورد جریان به پایه و انحراف خطوط جریان پیرامون پایه به سمت بستر و در نتیجه ایجاد پدیده آبشستگی موضعی شود (Shojaei et al., 2012). برخورد و پدیده جدایش جریان در مجاورت پایه پل، دو عامل اصلی ایجاد این نوع آبشستگی است. بنابراین شناخت فرآیند و تخمین میزان عمق آبشستگی پیرامون پایه و نیز ارائه راهکار مناسب جهت محافظت کردن از پایه‌های پل برای طراحان پل‌ها از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. در اثر برخورد جریان به پایه جریانی با دو بخش بالارونده<sup>۱</sup> و پایین‌رونده<sup>۲</sup> در راستای عمود بر روی پایه شکل می‌گیرد. جریان بالارونده با حرکت به سمت سطح آب باعث ایجاد موج سطحی در جلو پایه می‌گردد. جریان

پایین رونده بر روی سطح بستر رسوبات عمل کرده و باعث شروع آبشستگی و شکل‌گیری یک حفره کوچک در اطراف پایه پل می‌شود. در جلوی پایه پل، نتیجه نهایی ناشی از گردان فشار معکوس بر روی بستر بالادست پایه، گرداب نعل‌اسبی<sup>۳</sup> را شکل می‌دهد (Karimaei Tabarestani, 2020) و پدیده جدایش جریان از پایه، سبب بوجود آمدن گردابی موسوم به گرداب‌های برخاستگی<sup>۴</sup> را می‌نماید. گرداب‌های برخاستگی مانند گرداب‌های کوچک در پشت پایه عمل کرده و باعث انتقال رسوبات اطراف چاله، و تشکیل پشته رسوبی در پایین‌دست پایه می‌شوند (Melville and Sutherland, 1988). تأثیر توأم و همزمان گرداب‌های نعل‌اسبی و برخاستگی، میزان آبشستگی و حجم انتقال رسوب به پایین‌دست را افزایش می‌دهند. از آنجایی که گسترش چاله آبشستگی و ارتباط ما بین عمق آبشستگی و سرعت جریان در نزدیک پایه، با نوع آبشستگی ارتباط مستقیم دارد، لذا شناخت تفاوت‌های میان دو گونه آبشستگی آب زلال<sup>۵</sup> و آبشستگی بستر زنده<sup>۶</sup> از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. آبشستگی در شرایط آب

\* نویسنده مسئول: Mohsen.solb@gmail.com

1 UP Flow  
2 Down Flow  
3 Horse Shoe Vortex  
4 Wake Vortex  
5 Clear Water Scour  
6 Live Bed Scour

عرض پایه کانال بزرگ بوده و شرط نسبت پایه تا دیواره کانال که باید از ۶/۲۵ بزرگتر باشد، رعایت نشده و نتایج آنها تحت تأثیر جداره کانال قرار گرفته است. همچنین در رابطه با تأثیر پیچش کابل بر روی تک پایه، مطالعاتی توسط Khwairakpam and Mazumdar (2009) انجام شد. نتایج حاصل از پژوهش آنها نشان داد که کاربرد کابل، در انحراف جریان‌های رو به پایین و تضعیف قدرت گرداب‌های نعل‌اسبی است. همچنین عمق آبشستگی با افزایش قطر کابل و تعداد گام‌های دور پایه کاهش می‌یابد. در این راستا Aghli and Zomorodian (2013) طی پژوهشی بر روی تأثیر همزمان کابل و طوق بر روی عمق آبشستگی پیرامون گروه پایه‌های پل به این نتیجه رسیدند که با کاهش فاصله بین گام‌های کابل عمق آبشستگی کاهش می‌یابد. در این تحقیق از دو ضخامت کابل ۰/۴D و ۰/۲D و در سه گام متفاوت استفاده شد، که برای کابل‌هایی که نسبت ضخامت به قطر پایه بزرگتر از ۰/۴D باشد، افزایش ضخامت کابل تأثیر چندانی روی کاهش عمق آبشستگی ندارد. (Shahkarami (2018) در بررسی عملکرد طوق، آستانه، و ترکیب آنها در کنترل آبشستگی پایه پل استوانه‌ای در کاهش عمق آبشستگی، بیان کرد که بهترین عملکرد مربوط به ترکیب طوق و آستانه، سپس طوق و بعد از آن آستانه است. در مشاهدات وی درصد کاهش آبشستگی در کل کانال در این شرایط به ترتیب ۷۵، ۶۵ و ۲۰ درصد و کاهش آبشستگی مجاور پل (تا شعاع سه برابر آن) به ترتیب ۱۰۰، ۹۰ و ۲۰ درصد است. در روش آستانه حداکثر آبشستگی در جلو پایه پل، چسبیده به آن، اما در روش طوق و آستانه، تغییرات عرضی در محل آبشستگی را نیز بوجود آورده است. (Davodi et al. (2019) به بررسی تأثیر استفاده از کابل در کنترل آبشستگی اطراف گروه پایه‌های پل در رودخانه، و وجود کابل در سه قطر نسبی ۰/۰۵، ۰/۰۷۵ و ۰/۱ به همراه سه زاویه پرداختند، نتایج حاصل نشان داد در قطر نسبی ۰/۱ نسبت به قطرهای دیگر کابل، بیشترین درصد کاهش عمق آبشستگی ایجاد می‌گردد. (Majediasl et al. (2019) طی تحقیقی بر روی تأثیر اثرات منفی برداشت مصالح بر روی عمق آبشستگی گروه پایه‌های پل با مسلح کردن گروه پایه‌ها با دورپیچ‌های کابلی مشاهده کردند، که بکار بردن کابل دورپیچ شده به دور گروه پایه‌ها قدرت جریان رو به پایین را کاهش می‌دهد و گرداب‌های نعل‌اسبی ضعیف‌تر شده و از شدت آبشستگی و همچنین عمق آبشستگی کاسته شد. همچنین آنها در مشاهدات خود بیان کردند که وجود کابل، زبری پایه را افزایش می‌دهد و باعث به تعویق افتادن جدایی جریان در پشت پایه می‌شود. که در نتیجه راندمان کابل در کاهش آبشستگی در پشت پایه بیشتر از جلوی پایه مشاهده شد. (Asgharipari and Shafaibejstan (2018) طی

زالال هنگامی به وقوع می‌پیوندد که سرعت جریان از سرعت آستانه حرکت رسوبات کمتر باشد. ( $\frac{U}{U_c} < 1$ ) (Breusers et al., 1977). بدلیل پیچیدگی‌های خاص الگوی آبشستگی و توزیع جریان سه بعدی اطراف پایه پل، بسیاری از پژوهشگران نظیر (Wang et al., 2020)، (Guan et al., 2019)، (Adib et al., 2019)، (Karimaeitabarestani, 2020)، (Safaei et al., 2015) و (Akhlaghi et al., 2020) به بررسی آبشستگی موضعی اطراف پایه‌های پل، به صورت آزمایشگاهی و مدل‌سازی عددی پرداخته‌اند و در پژوهش‌های آنها جنبه‌های مختلفی از پارامترهای تأثیرگذار بر عمق آبشستگی مورد بررسی قرار گرفته است. همچنین نتایج آنان سبب تفسیر میدان جریان و الگوی آبشستگی پیرامون پایه‌های پل شده است که در نتیجه منجر به تقسیم راهکارهای کاهش عمق آبشستگی به دو دسته کلی ۱- بالا بردن مقاومت بستر ۲- کاهش قدرت عوامل اصلی فرسایش بستر، نظیر کاهش قدرت گرداب‌های پیرامون پایه پل شده است. از جمله روش‌های بالا بردن مقاومت بستر می‌توان به استفاده از گابیون، طوق و سنگچین اشاره کرد، و از راهکارهای کاهش قدرت گرداب‌های پیرامون پایه‌های پل می‌توان به استفاده از کابل، صفحات مستغرق، شکاف و آستانه اشاره نمود. از آنجا که پارامترهای بسیاری در شکل‌گیری پدیده آبشستگی مؤثر هستند، مدل‌سازی عددی آن بعلت پیچیدگی این پدیده بسیار دشوار است. از این رو، در حال حاضر بصورت عمومی، بررسی این پدیده در آزمایشگاه و با استفاده از مدل‌های آزمایشگاهی انجام می‌گیرد. پژوهش‌های کاملی در سالیان متمادی توسط محققین داخلی و خارج از کشور در زمینه کاهش عمق آبشستگی با استفاده از کابل و آستانه صورت گرفته است، که می‌توان به برخی از این تحقیقات اشاره کرد. استفاده از پیچش کابل به دور پایه برای اولین بار توسط (Dey et al., 2006) به عنوان یک روش اقتصادی، ساده و قابل اجرا در کاهش و کنترل آبشستگی بصورت پیشنهاد ارائه گردید. در این روش کابل‌های پیچیده شده به دور پایه منجر به تضعیف جریان‌های رو به پایین و گرداب‌های نعل‌اسبی می‌گردید. آنها شرایط استفاده از پایه‌های کابل‌دار را در دو حالت از جریان موج‌دار و جریان پایدار مورد پژوهش قرار دادند. نتایج آن‌ها نشان داد با افزایش قطر کابل و تعداد کابل‌های پیچیده شده بصورت مارپیچ به دور پایه و همچنین کاهش زاویه کابل‌ها میزان عمق آبشستگی کاهش می‌یابد. در تحقیقی (Tafarjnoruz et al. (2012) به بررسی پژوهش‌های پیشین پرداختند و نواقص برخی از پژوهش‌های صورت گرفته را بیان کردند، آنها بیان کردند که نتایج مورد مطالعه (Dey et al., 2006) قابل اعتماد نبوده چرا که میزان قطر انتخاب شده از طرف آنها به

$$f_1(d, D_s, d_s, d_{smax}, y, L, w, c, U, U_c, g, \rho, \mu, b, b_0, T, t, h) = 0$$

که در این رابطه:  $d$  قطر پایه استوانه‌ای،  $D_s$  قطر ذرات رسوبی،  $d_s$  عمق آبشستگی،  $d_{smax}$  عمق آبشستگی پایه شاهد،  $y$  عمق جریان،  $L$  طول آستانه،  $w$  ضخامت آستانه،  $c$  قطر کابل،  $U$  سرعت جریان،  $U_c$  سرعت آستانه حرکت رسوبات بستر،  $g$  شتاب ثقل،  $\rho$  جرم مخصوص سیال،  $\mu$  لزجت آب،  $b$  عرض فلوم،  $b_0$  قطر کابل،  $T$  زمان تعادل،  $t$  مدت زمان انجام آزمایش و  $h$  فاصله گام‌های قرارگیری کابل‌ها به دور پایه می‌باشند. با اعمال تحلیل ابعادی به روش باکینگهام و با در نظر گرفتن  $\rho, U, d$  بعنوان متغیرهای تکراری، رابطه بالا را می‌توان به صورت تابع بدون بعد زیر نوشت:

(رابطه ۲)

$$f_2(Re, Re_c, Fr, Fr_c, \frac{d_s}{d_{smax}}, \frac{U}{U_c}, \frac{y}{d}, \frac{L}{d}, \frac{d}{d_{50}}, \frac{b}{d}, \frac{b_0}{d}, \frac{h}{d}, \frac{t}{T}, \frac{w}{d}, \frac{c}{d}) = 0$$

در رابطه فوق  $(Re)$  عدد رینولدز، طبق مطالعه (Rajaratnam and Ahmed, 1998) با توجه به اینکه در تمامی آزمایش‌ها جریان کاملاً مغشوش و عدد رینولدز بیشتر از ۳۰۰۰ بود از عدد رینولدز در محاسبات صرفنظر گردید. همچنین  $Fr_c = \frac{U_c}{\sqrt{gy}}$  و  $Re_c = \frac{\rho y U_c}{\mu}$  به ترتیب فرود و رینولدز جریان در آستانه حرکت می‌باشند که به دلیل اینکه کلیه آزمایش‌ها در کمتر از آستانه حرکت صورت گرفتند حذف گردیدند. لازم به ذکر است جهت بررسی آبشستگی پایه‌ها در شرایط یکسان هیدرولیکی از پارامتر سرعت نسبی  $(\frac{U}{U_c})$  که بطور ثابت در آزمایش‌ها ۰/۹۶ در نظر گرفته شده بود استفاده شد با توجه به اینکه  $d, D_s, b, b_0, y, L, w, c$  و  $\frac{U}{U_c}$  در تمام آزمایش‌های انجام گرفته ثابت می‌باشند، لذا می‌توان از تأثیر این پارامترها در سناریوهای تعریف شده صرف‌نظر کرده و رابطه ۳ را به صورت زیر نوشت:

$$f_3\left(\frac{d_s}{d_{smax}}, \frac{h}{d}, \frac{t}{T}\right) = 0 \quad (\text{رابطه ۳})$$

و یا

$$\frac{d_s}{d_{smax}} = f_4\left(\frac{h}{d}, \frac{t}{T}\right) \quad (\text{رابطه ۴})$$

که در رابطه (۳ و ۴)، پارامترهای  $\frac{d_s}{d_{smax}}$  عمق آبشستگی نسبی،  $\frac{h}{d}$  گام نسبی کابل و  $\frac{t}{T}$  پارامتر بی بعد زمان هستند.

### آماده سازی مدل آزمایشگاهی

به منظور بررسی اثر توأم کابل و آستانه، آزمایش‌های این پژوهش، در فلوم تحقیقاتی گانت واقع در آزمایشگاه هیدرولیک مجتمع عالی آموزشی و پژوهشی صنعت آب و برق خوزستان انجام شد. کف این فلوم آزمایشگاهی دارای

پژوهشی با استفاده از روش طوق، شکاف و کابل ماریچ سیمی بعنوان راهکاری ترکیبی، به بررسی عمق آبشستگی اطراف پایه پل پرداختند که طبق نتایج آنها ترکیب ماریچ‌های کابلی شکاف دار توانست درصد عمق آبشستگی را به میزان ۵۱/۵۶ کاهش دهد. در ادامه (Shahsavari et al. (2019 طی تحقیقی تأثیر روش حفاظتی استفاده از کابل در جفت پایه‌های پل را مورد بررسی قرار دادند، آنها در نتایج حاصل شده از پژوهش خود بیان کردند، کابل باعث افزایش راندمان کاهش آبشستگی در پایه پایین دست می‌شود. که این افزایش راندمان در پایه پایین دست با فاصله ۳D و ۵D به ترتیب ۷ و ۲۶ درصد بدست آمد. Izadinia and Heydarpoor (2014) بر روی بررسی و مقایسه عملکرد کابل و شیار در کنترل آبشستگی پایه پل کار کرده، نتایج آنها نشان داد که با افزایش قطر کابل و کاهش زاویه پیچش، میزان عمق آبشستگی کاهش می‌یابد. آنها بیشترین میزان کاهش آبشستگی توسط کابل را برابر ۱۳ درصد و ۱۷ درصد به ترتیب در جلو و پشت پایه مشاهده کردند. (Ahmadi et al. (2015 تأثیر استفاده از آستانه در کاهش آبشستگی اطراف پایه پل استوانه‌ای در شرایط آب زلال در رسوبات چسبنده را مورد بررسی قرار دادند. آنها در پژوهش خود از دو قطر پایه ۶۰ و ۷۵ میلی‌متری جهت مدل‌سازی پایه استفاده کردند، نتایج آنها نشان داد که استفاده از آستانه در کاهش عمق آبشستگی تأثیر مثبت داشته، به صورتی که قرارگیری آستانه درست در پشت پایه حدود ۲۶ درصد عمق و ۶۱ درصد حجم آبشستگی را کاهش داده است. در رابطه با فاصله قرارگیری آستانه با پایه پل نتایج آنها نشان داد که با افزایش فاصله آستانه تا پایه پل، تأثیر محافظتی آن کاسته می‌شود. از این رو با کمک تحقیقات پیشین نسبت به طراحی سناریوهای این تحقیق اقدام گردید. از آنجا که تاکنون تأثیر دو حفاظت مستقیم (آستانه) و غیرمستقیم (کابل) بصورت همزمان، بر روی پایه پل صورت نگرفته است، بر این اساس تأثیر ترکیب هر دو حفاظت کابل و آستانه مورد بررسی قرار گرفته است. در این پژوهش تأثیر ترکیب حفاظت‌ها و میزان اثر هر کدام بصورت مجزا و توأم نسبت به نمونه شاهد مشخص گردید.

### مواد و روش‌ها

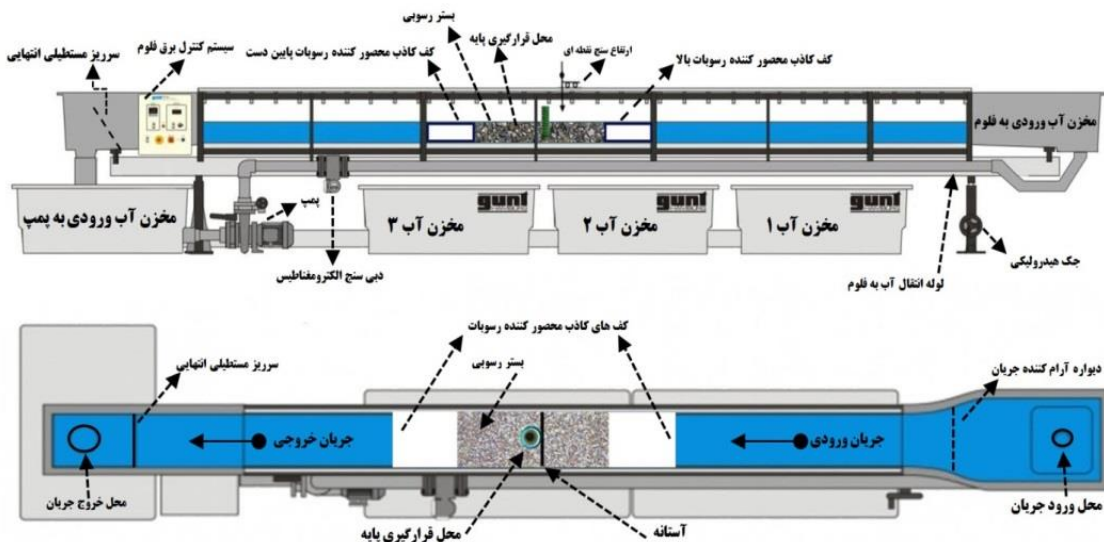
#### تحلیل ابعادی

در این پژوهش، پارامترهای موثر بر پدیده آبشستگی موضعی استخراج و سپس به روش باکینگهام بی‌بعدسازی صورت گرفت. پارامترهای موثر در این تحقیق مطابق رابطه (۱) ارائه شده‌اند.

(رابطه ۱)

فراهم می‌ساخت. به این منظور آب از سه مخزن بهم پیوسته تعبیه شده در زیر فلوم، هر کدام به ظرفیت ۱۰۰۰ لیتر توسط پمپی با حداکثر دبی ۵۱ لیتر بر ثانیه انتقال می‌یافت و کنترل دبی توسط شیر کنارگذر و یک دبی‌سنج الکترومغناطیس با دقت  $\pm 0.1$  لیتر بر ثانیه انجام می‌گرفت. جهت مسطح کردن مصالح بستر از یک ارابه تسطیح استفاده گردید و با متر لیزری از تراز بودن سطح اطمینان حاصل شد. تنظیم عمق آب نیز در آزمایش‌ها توسط یک سرریز مستطیلی که در پایین دست فلوم تعبیه شده بود، انجام می‌گرفت. شکل ۱ مشخصات شماتیک فلوم مورد استفاده را نشان می‌دهد.

جنس فولادی به عرض ۳۱ سانتی متر و طول ۱۰ متر به ارتفاع ۵۰ سانتی متر با مقطع مستطیلی و قابلیت تغییر شیب می‌باشد. جداره کانال از جنس شیشه بوده که امکان مشاهده جریان و پدیده‌ها در کانال را فراهم می‌سازد. به منظور جلوگیری از تلاطم جریان ورودی به کانال از یک توری مشبک پس از محل ورودی آب به کانال استفاده گردید، همچنین توسعه یافتگی جریان ورودی به کانال با شیب کف صفر، با برداشت پروفیل‌های سرعت از ابتدای کانال تعیین، و پس از آن محل انجام آزمایش‌ها در یک مقطع مستطیلی در فاصله ۳ متری از ابتدای ورودی کانال و به طول ۲ متر در نظر گرفته شد. سیستم تأمین کننده آب به صورت گردشی بوده که امکان تداوم آزمایش‌ها را برای مدت زمان طولانی



شکل ۱- پلان و نمای جانبی فلوم و تجهیزات آزمایشگاهی

با قطر ۳ سانتی‌متر استفاده شد. جهت ثابت ماندن پایه درون رسوبات، مدل پایه بر روی صفحه افقی از جنس پی وی سی متصل گردید، و در فاصله ۱ متری از ابتدای محدوده ۲ متری رسوبات قرار داده شد.

#### ب- رعایت معیار یکنواختی و اندازه رسوبات

قطرات ذرات باید به گونه‌ای باشد که عمق آبشستگی تعادلی تحت تأثیر اندازه ذرات رسوبی قرار نگیرد (Melville, 1997)، تا حداکثر مقدار عمق آبشستگی نیز ایجاد شود. برای این موضوع شرط  $\frac{d}{d_{50}} > 25$  قطر پایه و  $d_{50}$  اندازه متوسط ذرات رسوبی توسط ملویل مطرح شد، (Raudkivi and Ettema, 1983) برای این موضوع شرط  $\left(\frac{d}{d_{50}} > 20 \sim 25\right)$  را مطرح کرده‌اند. در این تحقیق این نسبت برابر است با  $31/58$  که معیارهای فوق را پوشش می‌دهد. جهت جلوگیری از تشکیل شکل بستر<sup>۱</sup> (ریپل) طبق توصیه (Raudkivi and Ettema, 1983) اندازه متوسط ذرات

#### مدلسازی با اعمال محدودیت‌های لازم

##### الف- انتخاب قطر پایه

از آنجا که گام نخست برای رسیدن به عمق ماکزیمم آبشستگی تعیین مقادیر پارامترهای مجاز و مؤثر بر عمق آبشستگی می‌باشد، لذا پارامترهای مؤثر با در نظر گرفتن معیارهای متعددی که توسط محققین پیشین ارائه شده است، برای دستیابی به شرایطی که حداکثر عمق آبشستگی موضعی در آن شرایط تشکیل گردد به شرح زیر انتخاب شدند.

برای انتخاب قطر پایه باید اثر جانبی دیواره‌های کانال بر روی آبشستگی موضعی اطراف پایه در نظر گرفته شود، مطابق نظر (Chiew and Melville, 1987) قطر پایه نباید از ۱۰ درصد عرض کانال بیشتر باشد  $\frac{d}{b} \geq 10$  و بر اساس نظر (Raudkivi and Ettema, 1983) نسبت عرض کانال به قطر پایه باید بزرگتر از  $6/25$  باشد. با توجه به این معیارها، مدل پایه از جنس تفلون و

چند مرحله و چندین تکرار محاسبه گردید. (Melville (1997) برای تعیین سرعت برشی بحرانی به ازای اندازه متوسط دانه‌های بستر از جنس کوارتز و دمای آب ۲۰ درجه سلسیوس روابط زیر را ارائه نمود، که تخمین خوبی برای منحنی شیلدز می‌باشد. (رابطه ۵)

$$FOR \rightarrow 0.1mm < d_{50} < 1mm$$

$$U_{*c} = 0.0115 + 0.0125d_{50}^{1.4}$$

(رابطه ۵)

و برای سرعت بحرانی از رابطه توزیع لگاریتمی سرعت استفاده نمود:

$$U_c = 5.75 \log(5.53 \frac{y}{d_{50}}) \times U_{*c}$$

(رابطه ۷)

با استفاده از روابط فوق سرعت آستانه حرکت برای رسوبات برابر با ۰/۱۸۳ متر بر ثانیه محاسبه شد. اما مشاهدات آزمایشگاهی در بازه‌ای از عمق‌ها و سرعت‌های مختلف این مقدار را ۰/۲۲ متر بر ثانیه نشان داد. بنابراین در کلیه آزمایش‌ها، این سرعت به عنوان مبنای سرعت آستانه

حرکت ذرات در نظر گرفته شد. در نتیجه با توجه به معیارهای فوق و محاسبه سرعت آستانه حرکت ذرات رسوبی، با  $\frac{U}{U_c} = 0.96$  در نظر گرفتن عمق جریان برابر با ۱۰ سانتیمتر، شرط امکان مقایسه تمامی سناریوها در شرایط یکسان و نزدیک به آستانه حرکت رسوبات بستر وجود دارد. جدول (۱) شرایط جریان حاکم بر آزمایش‌ها را نشان می‌دهد.

**د-مدت زمان انجام آزمایش‌ها**

برای تعیین زمان تعادل آزمایش‌ها، یک آزمایش طولانی به مدت ۱۲ ساعت بر روی پایه شاهد انجام گرفت. با توجه به نمودار شکل (۲) مشاهده شد که در ۴۸۰ دقیقه اول تقریباً ۹۸٪ آبخستگی رخ می‌دهد. بنابراین در کلیه آزمایش‌ها، زمان تعادل ۸ ساعت در نظر گرفته شد.

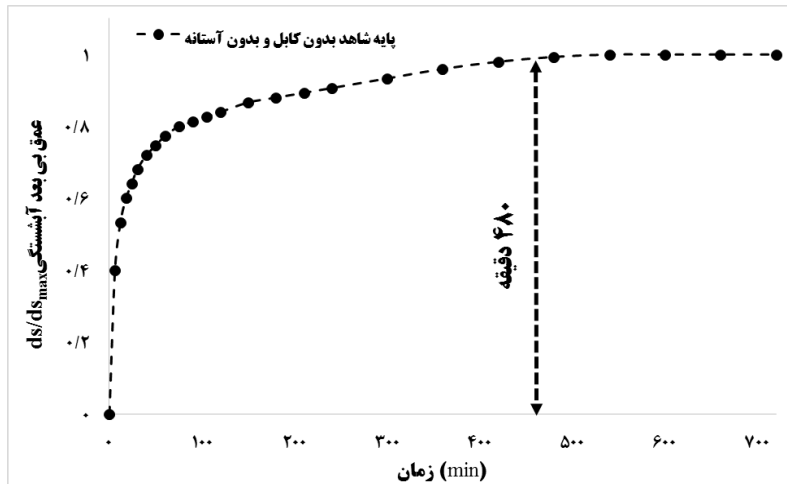
رسوبی بایستی از ۰/۷ میلی متر بیشتر باشد. بنابراین  $d_{50}$  ذرات رسوبی برابر ۰/۹۵ میلی متر انتخاب شد تا حداکثر مقدار آبخستگی بدست آید و هم از ایجاد پشته‌های کوچک جلوگیری شود. از آنجا که غیریکنواختی رسوبات باعث ایجاد پدیده سپری شدن چاله آبخستگی باعث کاهش آبخستگی موضعی نهایی می‌شود، لذا در صورتی که انحراف معیار هندسی رسوبات  $\delta_g = \sqrt{\frac{d_{84}}{d_{16}}}$  کمتر از ۱/۵ باشد شرط یکنواختی ذرات برقرار می‌شود و اثر غیریکنواختی رسوبات بر آبخستگی موضعی از بین می‌رود (Shafai Bejestan et al., 2010). که در این رابطه  $d_{84}$  و  $d_{16}$  به ترتیب قطر ذراتی است که ۸۴ و ۱۶ درصد ذرات از آنها ریزتر است. در این تحقیق از ماسه طبیعی رودخانه با دانه‌بندی یکنواخت ( $\delta_g = 1.36$ ) و چگالی نسبی  $G_s = 2.64$  و در نهایت قطر ذرات رسوبی  $D_s$  برابر قطر متوسط ذرات  $D_{50} = 0.95$  میلی‌متر انتخاب شد، که خصوصیات آن در معیارهای ذکر شده صدق می‌کند.

**ج- انتخاب عمق و سرعت جریان**

یکی از پارامترهایی که اگر به درستی انتخاب نشود حداکثر مقدار عمق آبخستگی تحت تأثیر آن قرار خواهد گرفت عمق جریان آب است. طبق نظر Chiew (1995) چنانچه عمق جریان  $y$  از ۳ برابر قطر پایه  $d$  بیشتر باشد، عمق جریان اثری بر میزان آبخستگی نخواهد داشت. در این پژوهش با توجه به عمق ۱۰ سانتی‌متر جریان این نسبت ۳ در نظر گرفته شده است تا عمق آبخستگی تحت تأثیر عمق جریان قرار نگیرد. (Melville and Chiew (1999) عنوان کردند برای تعیین عمق جریان، حداکثر تنش برشی باید در شرایط آب زلال تعیین گردد، زمانی که سرعت جریان در محدوده  $0.3U_c < U < U_c$  باشد آبخستگی در شرایط آب زلال رخ می‌دهد و اگر سرعت متوسط جریان  $U$  بیشتر از سرعت آستانه حرکت  $U_c$  باشد آبخستگی در شرایط بستر زنده اتفاق می‌افتد. در این تحقیق، مدل برای حالت آبخستگی آب زلال طراحی شد. لذا سرعت آستانه حرکت به دو روش محاسباتی و مشاهدات آزمایشگاهی تعیین گردید. به این صورت که سرعت بحرانی جریان با برقراری عمق ثابت و افزایش تدریجی دبی جریان در

جدول ۱- مشخصات هیدرولیکی حاکم بر آزمایش‌ها

عرض فلوم (cm)	قطر پایه (cm)	قطر متوسط ذرات (mm)	عمق جریان (cm)	دبی جریان (m <sup>3</sup> /hr)	سرعت نسبی	رینولدز جریان	فرود جریان
B	d	d <sub>50</sub>	Y	Q	U/U <sub>c</sub>	Re	Fr
۳۰	۳	۰/۹۵	۱۰	۲۹	۰/۹۶	۲۲۰۰۰	۰/۲۵



شکل ۲- نمودار توسعه زمانی آبخستگی پایه شاهد

### انجام آزمایش‌ها

به منظور انجام آزمایش‌ها پس از قرار دادن مدل پایه پل و آستانه (در صورت وجود)، رسوبات بستر توسط یک اربه تسطیح متحرک در جهت طولی و عرضی در سراسر کانال بصورت یکسان مسطح شدند. پیش از راه‌اندازی پمپ، سرریز انتهایی تنظیم و آب به آرامی از ورودی کانال به مدل هدایت شد تا از برهم زدن رسوبات بستر و ایجاد ریپل و ناهمواری در سطح بستر جلوگیری شود. پس از بالا آمدن آب و اطمینان از رطوبت رسوبات بعد از گذشت چند دقیقه، پمپ با دبی کم راه‌اندازی و دبی به میزان موردنظر رسانده شد. در حین انجام آزمایش‌ها، توسط دستگاه عمق‌سنج مکانیکی با دقت میلی‌متر، بیشترین عمق آبخستگی حول پایه در زمان‌های مختلف اندازه‌گیری شد. بعد از اتمام هر آزمایش با قطع دبی ورودی به کانال، شیرهای زهکش تعبیه شده در کف کانال باز شده و آب درون کانال به آرامی زهکشی شده تا تغییری در توپوگرافی اطراف پایه رخ ندهد. سپس توپوگرافی بستر در اطراف پایه، بوسیله متر لیزری با دقت میلیمتر، و یک صفحه مشبک ۱×۱ سانتیمتر برداشت شد.

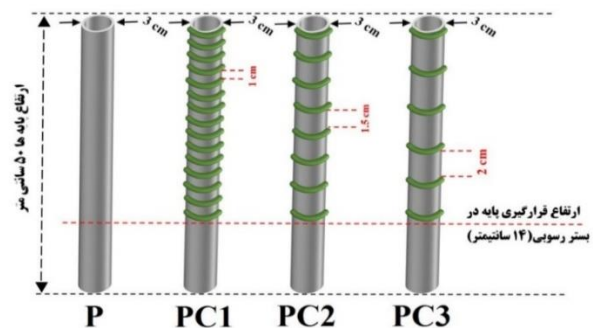
### الف) آزمایش پایه بدون محافظ (شاهد)

در ابتدا آبخستگی پایه پل استوانه‌ای بدون هیچگونه محافظتی به عنوان آزمایش شاهد مورد بررسی قرار گرفت تا مبنایی برای کنترل و مقایسه با حالت‌های بعدی در کاهش میزان آبخستگی و تغییرات بستر باشد.

همچنین جهت تعیین مدت زمان انجام آزمایش‌ها (زمان تعادل)، همانطور که قبلاً اشاره شد یک آزمایش شاهد به مدت ۱۲ ساعت بروی پایه (بدون کابل و آستانه) انجام گرفت و در حین انجام آزمایش تغییرات عمق آبخستگی در واحد زمان ثبت گردید. نتایج آزمایش شاهد نشان داد پس از برخورد جریان آب به پایه

### مشخصات مدل‌های آزمایشگاهی

در این پژوهش از ۴ مدل مختلف پایه از جنس تفلون به قطر ۳ سانتی متر و ارتفاع ۲۰ سانتی متر استفاده شد. یکی از پایه‌ها بعنوان مدل شاهد و از ۳ پایه دیگر جهت پیش‌کش کابل با گام‌های (۰/۶۷، ۰/۵۰، ۰/۳۳) استفاده شد. مشخصات مدل‌ها در شکل (۳) نشان داده شده است.



شکل ۳- تصویر گرافیکی مدل پایه‌های بکار برده شده در سناریوی آزمایش‌ها

براساس سناریوهای آزمایشات طبق جدول (۲) و شکل (۳) پایه‌ها با علامت اختصاری نام‌گذاری گردیده‌اند، در این نام‌گذاری P بعنوان پایه، C نماد کابل، S آستانه، SF آستانه در جلو پایه، SB آستانه در پشت پایه و اعداد ۱، ۲ و ۳ به ترتیب نمادهای بدون بعد گام نسبی کابل ۰/۳۳، ۰/۵۰ و ۰/۶۷ می‌باشد.

ضمناً به منظور بررسی تأثیر آستانه و کابل بر میزان آبخستگی، از درصد کاهش عمق آبخستگی مطابق رابطه ۸ استفاده گردید. که در این رابطه  $d_s$  و  $d_{smax}$  به ترتیب عمق آبخستگی و عمق آبخستگی تعادلی می‌باشد

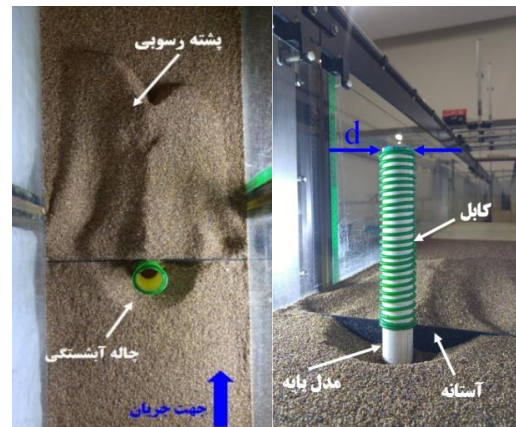
$$R\% = \left( \frac{d_{smax} - d_s}{d_{smax}} \right) \times 100 \quad (\text{رابطه ۸})$$

دست آمده از تحقیقات مرور شده مرتبط، در استفاده از آستانه، بلافاصله در پایین دست پایه پل، مماس بر آن آستانه ای برابر با کل عرض کانال به ضخامت ۳ میلی متر قرار گرفت. ارتفاع آن نیز از کف تا تراز رسوبات قرار داشت. در راهکار پل با دورپیچ کابل نیز جهت استفاده از بیشترین محافظت طبق توصیه‌های منتج از پژوهش‌های مرور شده، از دورپیچ کابل با زاویه ۹۰ درجه استفاده شد. در روش ترکیب پایه با دورپیچ کابل و آستانه نیز مجدداً آستانه با عرضی برابر عرض کانال درست مماس بر پایه با دورپیچ کابل به نحوی قرار گرفت که کابل‌های پایه هم تراز رسوبات و مماس با آستانه قرار گیرد. شکل (۵) پایان مرحله زهکشی آزمایش‌های مربوط به کنترل آبشستگی انجام شده در این تحقیق را نشان داده است.

### نتایج و بحث

جهت بررسی دقیق تر اصلاحات انجام شده بر روی پایه‌ها و تأثیر آنها بر کاهش عمق آبشستگی نمودارهایی استخراج گردید. ابتکار عمل این نمودارها بدین صورت است که، آبشستگی اطراف پایه را متأثر از زمان و بصورت دینامیک بررسی می‌کنند. این نمودارها علاوه بر نشان دادن عمق نهایی آبشستگی مسیری را که در طول آزمایش طی شده و تا آبشستگی نهایی رسیده است را نشان می‌دهد. این شکل‌ها دارای سه محور می‌باشند، محور افقی پارامتر بی‌بعد زمان آبشستگی به زمان تعادل ( $\frac{t}{T}$ ) به درصد را نشان می‌دهد، که با زمان‌های استخراج شده برای میزان ۲۵، ۵۰، ۷۵ و ۹۵ درصد زمان آبشستگی پایه‌ها، نسبت به زمان آبشستگی تعادلی (آبشستگی تعادلی: عمق آبشستگی پایه بدون کابل و آستانه در مدت ۱۲ ساعت) متناظر است. محور قائم پارامتر بی‌بعد آبشستگی  $\frac{d_s}{d_{smax}}$  که میزان آبشستگی در بازه‌هایی از زمان را به آبشستگی حالت تعادلی نشان می‌دهد. و محور سوم که بر روی گراف‌ها قرار گرفته میزان ۲۵، ۵۰، ۷۵ و ۹۵ درصد آبشستگی از زمان تعادلی می‌باشند. شکل (۵) نمودار پایه‌های کابلی بدون آستانه را مشخص کرده، با توجه به شکل، گراف نمونه شاهد P بالاتر بوده و نمونه‌های PC در پایین قرار گرفته‌اند که به ترتیب بیشترین و کمترین حجم آبشستگی را نسبت به زمان نشان می‌دهند. همچنین شکل‌های ۶ و ۷ (تأثیر حفاظت پایه با کابل و آستانه در عقب و پایه با کابل و آستانه در جلو را بر روی پایه نمایش می‌دهند، و نشان می‌دهند که پایه شاهد دارای آبشستگی بیشتر در زمان کمتر و با نرخ متفاوتی صورت می‌گیرد.

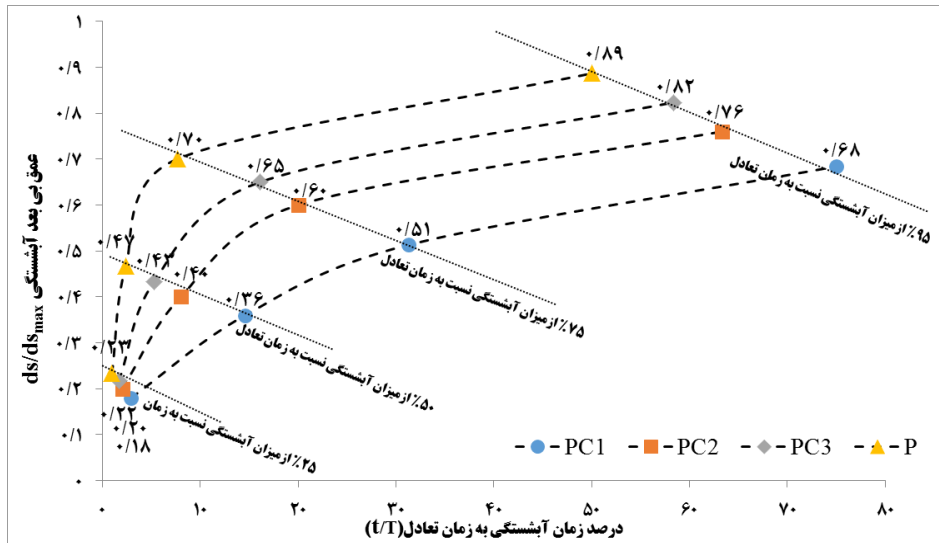
بلافاصله در اطراف پایه استوانه‌ای گردابه‌هایی بعلت وجود جریان‌های پایین رونده تشکیل و فرآیند آبشستگی با سرعت بسیار بالا آغاز شد و پس از آنکه عمق چاله بیشتر شد گرداب‌های نعل‌اسبی در اطراف پایه آغاز به فعالیت کردند. با تشکیل حفره آبشستگی رسوب‌های برخاسته از حفره به سمت پایین دست پایه منتقل شدند و بصورت پشته‌ای رسوبی و در دو سمت به صورت نسبتاً متقارن در پشت پایه امتداد یافته و انباشته شدند. پس از مدتی از شروع آزمایش، رسوبات برخاسته از حفره آبشستگی به حدی رسیدند که تأثیر پایه استوانه‌ای بر آن محدوده کاهش یافته و تأثیر گردابه‌های پشت پایه ناچیز شد. در این وضعیت رسوبات انتقالی از حفره آبشستگی تحت تأثیر جریان ثانویه به سمت پایین دست انتقال می‌یافتند. سرانجام با گذشت حدود ۸ ساعت از شروع آزمایش، نرخ آبشستگی بطور قابل توجهی کاهش یافت. همچنین مشاهده شد که عمق آبشستگی در جلو پایه مقدار حداکثر را داشته و با دور شدن از پایه مقدار آن در اطراف پایه کاهش می‌یابد. در شکل (۴) تصویر تشکیل حفره و پشته رسوبی آبشستگی در مدل PCSB1 بعنوان نمونه نشان داده شده است. در ادامه نیز پروفیل عرضی و طولی تراز بستر جهت مقایسه با یکدیگر ترسیم گردیده‌اند. با توجه به شکل‌ها و پروفیل‌های بستر، تغییر فواصل گام‌های کابل و استفاده از آستانه باعث می‌گردد الگوی جریان اطراف پایه تغییر یابد.



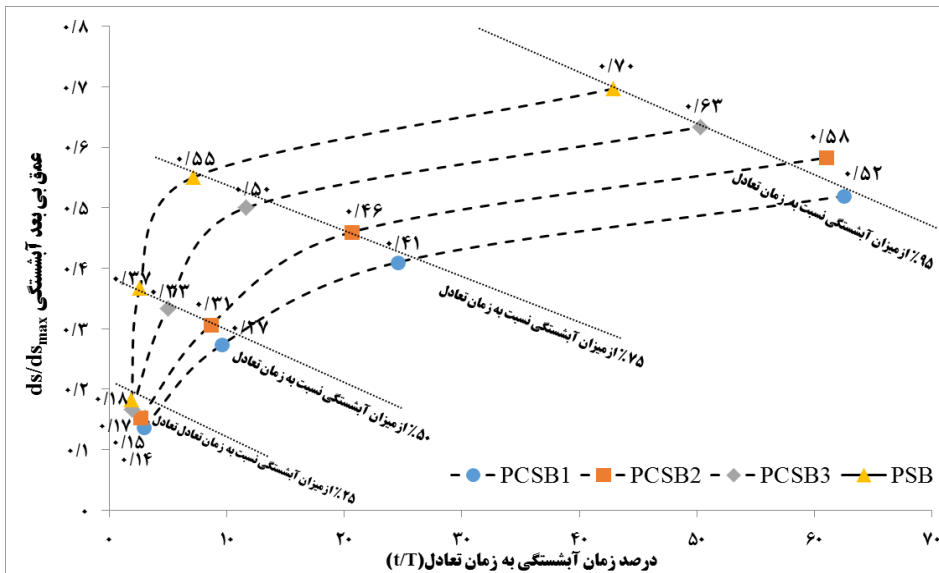
شکل ۴- تصویر توسعه آبشستگی پیرامون یکی از پایه‌های بکار رفته

(ب) آزمایش پایه پل با راهکارهای حفاظتی (کابل و آستانه) به منظور بررسی راهکارهای کنترل آبشستگی پایه پل، یکسری آزمایش‌ها، پایه با دورپیچ کابل و بار دیگر پایه به همراه آستانه (در بالادست و پایین دست پایه) و در نهایت با ترکیب دو روش قبل یعنی پایه با دورپیچ کابل همراه با آستانه (در بالادست و پایین دست پایه)، بصورت همزمان انجام گردید. براساس نتایج به

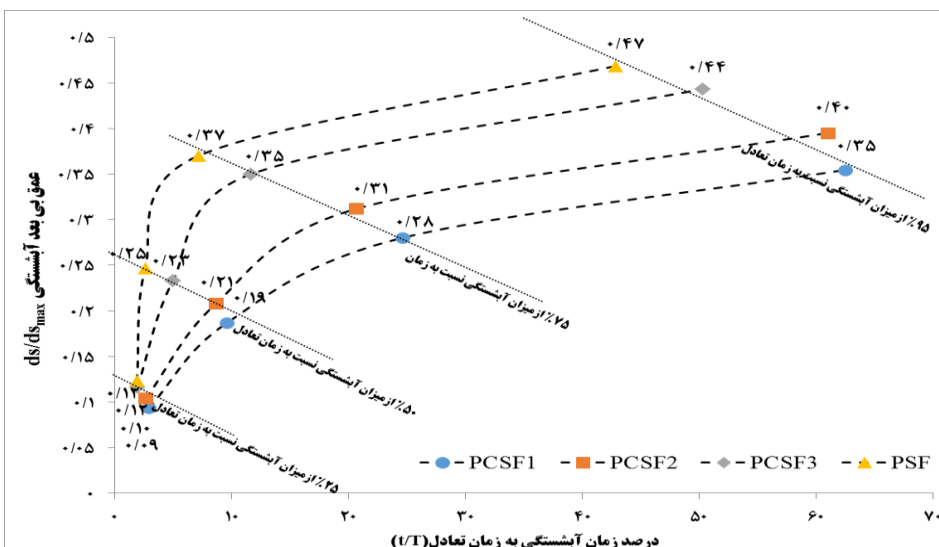




شکل ۵- نمودار توسعه آیشستگی نسبت به درصدی از زمان (t/T) برای پایه با کابل بدون آستانه



شکل ۶- نمودار توسعه آیشستگی نسبت به درصدی از زمان (t/T) برای پایه با کابل و آستانه در عقب

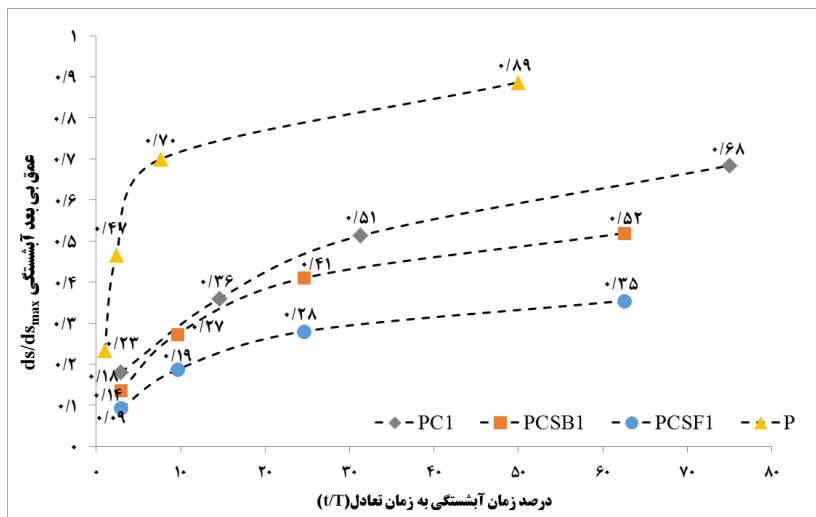


شکل ۷- نمودار توسعه آیشستگی نسبت به درصدی از زمان (t/T) برای پایه با کابل و آستانه در جلو

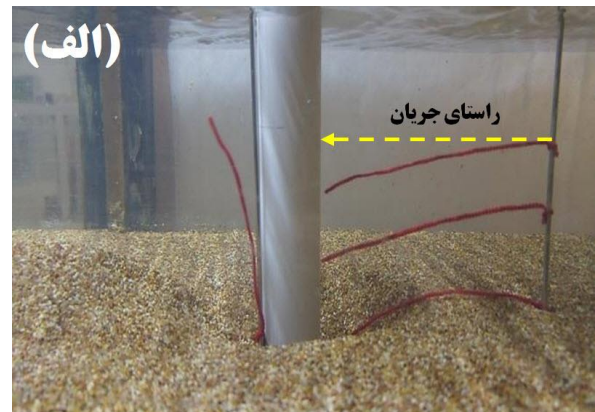
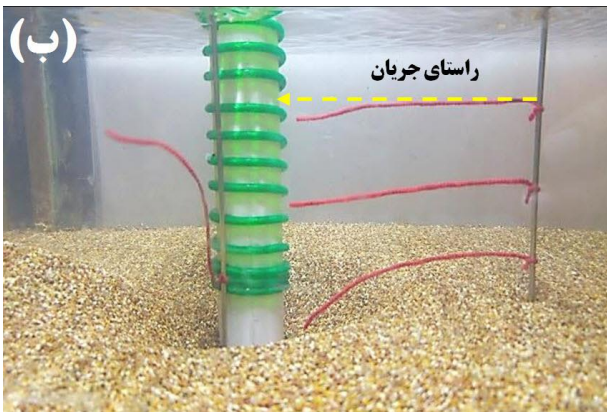
حالت دارد. با توجه به موازی بودن گراف پایه‌های PCSB1 و PCSF1 نشان می‌دهند شرایط اطراف پایه‌ها یکسان است اما تأثیر آستانه در جلو باعث کاهش بیشتر عمق آبستگی و بهبود شرایط شده است.

در ادامه جهت مشخص شدن تأثیر کابل و مرئی سازی الگوی خطوط جریان، در اطراف پایه اقدام به نصب ریسمان به عنوان نشانگر گردید. شکل (۹-الف)، ریسمان انحراف خطوط جریان در نزدیکی پایه شاهد به سمت بستر، نسبت به خط افق را نشان می‌دهد و شکل (۹-ب) نشان می‌دهد در پایه محافظت شده، جریان انحراف کمتری به سوی بستر دارد. همچنین در پشت پایه به دلیل کاهش قدرت جریان‌های برخاستگی، دنباله نشانگر به سمت پایین دست منحرف شده و به خوبی گویای این مساله می‌باشد. این پدیده برای تمامی پایه‌ها مشاهده گردید و شکل (۹) یکی از حالات مشاهده‌ای می‌باشد.

شکل (۸) تأثیر حفاظت‌های انجام شده بر روی پایه‌ها را بصورت همزمان نشان می‌دهد، در این شکل بهترین حالت حفاظت از هر سناریو در مقابل پایه شاهد نشان داده شده است. با توجه به شکل، پایه PCSF1 که دارای آستانه در جلو و گام نسبی  $\frac{d_s}{d_{smax}} = 0.33$  می‌باشد، کمترین مقدار آبستگی را  $\frac{d_s}{d_{smax}} = 0.35$  نشان می‌دهد. همچنین با مقایسه نمودارهای بستر در اطراف پایه، مشاهده می‌گردد که پایه شاهد P در آغاز آزمایش با یک شیب بسیار تند نسبت به زمان، شروع به کاهش می‌نماید و نشان از انحراف شدید جریان به سمت بستر می‌دهد، اما در پایه‌های اصلاح شده شیب کاهش عمق بستر نسبت به زمان بسیار کمتر بوده است. در پایه PC1 که فاقد آستانه می‌باشد با  $\frac{d_s}{d_{smax}} = 0.68$  عمق آبستگی را نشان می‌دهد، که در نسبت زمانی بیشتری به تعادل رسیده است. و نشان از به تأخیر افتادن آبستگی نهایی در این



شکل ۸- نمودار توسعه آبستگی نسبت به درصدی از زمان (t/T) برای بهترین حفاظت از هر سناریو و نمونه شاهد



شکل ۹- مرئی‌سازی راستای جریان با استفاده از ریسمان

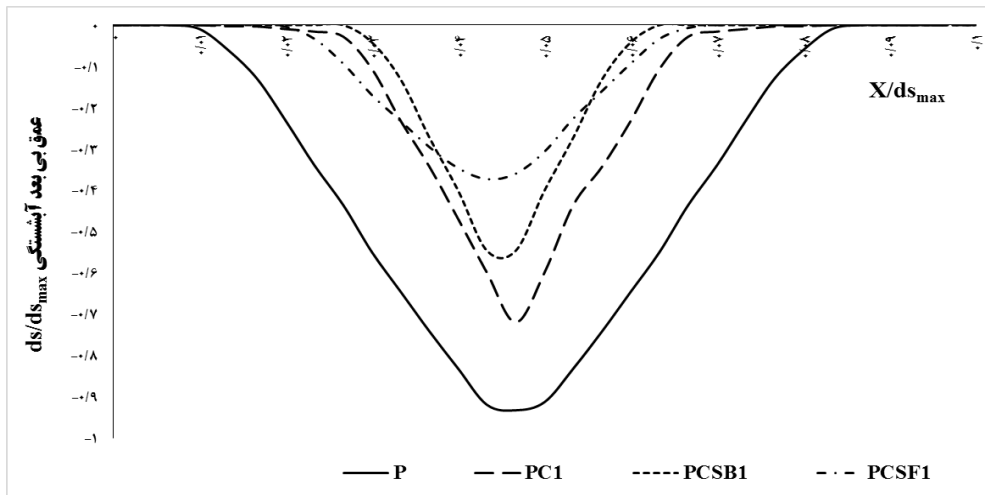
شرایط  $\frac{U}{U_c}$  برابر ۰/۹۶ ترسیم شده‌اند. با توجه به شکل، توسعه عرضی آبستگی برای حالت‌های PCSB1، PCSF1 و PC1 که

شکل (۱۰) توسعه پروفیل عرضی متأثر از آبستگی پایه شاهد، در مقابل بهترین حالت‌های حفاظت از هر سناریو، در

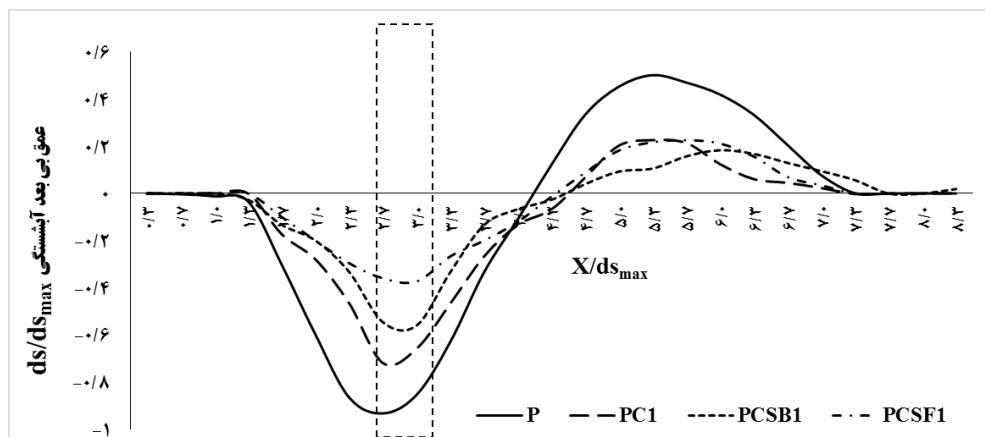
می‌گردد. در نمونه شاهد P به دلایلی که قبلاً به آن پرداخته شده، قدرت جریان‌های پایین رونده، گردابه‌های برخاستگی و گردابه‌های نعل‌اسبی زیاد بوده و حداکثر عمق آبشستگی را ایجاد می‌نمایند، اما در پایه‌های حفاظت شده شرایط متفاوت است. به این صورت که در پایه PC1 جریان پیچشی اطراف پایه، باعث ایجاد میدانی در محیط پایه می‌گردد که باعث جذب شدن جریان برخوردی شده و از انحراف بخشی از جریان به سمت بستر جلوگیری می‌نماید، که نتیجه آن باعث کمتر شدن عمق آبشستگی می‌گردد. در پایه‌ها به همراه آستانه، وجود آستانه باعث می‌گردد که جریان‌های نعل‌اسبی کمتر به سمت پایین دست انتقال یافته، موجب کنترل و کاهش قدرت گردابه‌های برخاستگی گردند.

هر سه دارای محافظت می‌باشند، نسبت به نمونه شاهد P، کاهش یافته‌اند و برای حالت PC1 که پایه کابل پیچ، بدون آستانه است، نسبت به حالات دیگر مرز توسعه بیشتری دارد. از این رو با جابجایی آستانه، از جلو به پشت پایه، تأثیر چندانی بر روی تغییر پروفیل عرضی مشاهده نگردید.

شکل (۱۱) توسعه پروفیل طولی حفره آبشستگی به ازای بهترین گزینه‌های حفاظت و نمونه شاهد نشان داده شده است (تمام آزمایش‌ها در  $U/U_c = 0.96$  انجام شده‌اند). در این شکل‌ها با تغییر نوع حفاظت، پروفیل آبشستگی تغییر می‌نماید. با توجه به اینکه در سناریوهای آزمایش‌ها ترکیب حفاظت‌ها مد نظر قرار گرفته است، لذا تحلیل دلایل کاهش عمق آبشستگی پیچیده



شکل ۱۰- توسعه پروفیل عرضی حفره آبشستگی بهترین حفاظت از هر سناریو و نمونه شاهد



شکل ۱۱- توسعه پروفیل طولی حفره آبشستگی بهترین حفاظت از هر سناریو و نمونه شاهد

با آستانه در پشت ترسیم شده‌اند، لازم به ذکر است تمامی پارامترهای عمق آبشستگی نسبت به  $d_{smax}$  مربوط به پایه شاهد P بدون حفاظت برای زمان تعادل ۸ ساعت، بی بعد گردیده‌اند. با توجه به نمودارها با افزایش گام نسبی یا در حقیقت با افزایش فاصله پیچش کابل عمق آبشستگی افزایش می‌یابد، دلیل این امر

در ادامه جهت بررسی تأثیر گام نسبی کابل، بر روی کاهش عمق آبشستگی شکل (۱۲) ارائه گردیده است. در این شکل عمق بی‌بعد آبشستگی  $\frac{d_s}{d_{smax}}$  در مقابل پارامتر بدون بعد گام نسبی  $\frac{h}{a}$  برای سه سناریو، پایه بدون حضور آستانه، پایه با آستانه در جلو و

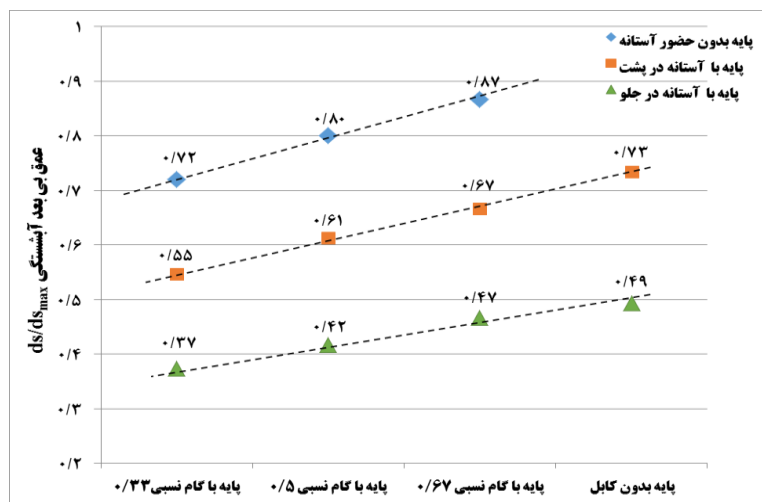
۰/۶۷ و با حذف آستانه میزان آبستگی مجدد تا نسبت ۰/۴۹ افزایش می‌یابد. در همین شرایط پایه با همین گام نسبی، بدون آستانه، طبق شکل دارای نسبت  $\frac{d_s}{d_{smax}} = ۰/۷۲$  می‌باشد، که نشان دهنده تأثیر حضور آستانه است، با دقت به بقیه داده‌های نمودار مشخص است که عدم حضور آستانه برای این حالت افزایش حدود دو برابری عمق آبستگی را به همراه دارد.

کاهش توان کابل‌های هدایت کننده اطراف پایه، در انحراف جریان پایین رونده به پایین دست است. در این شرایط، کابل باعث می‌گردد، جریانی که از جلو پایه، به سمت پایین دست هدایت می‌شود، با کمک جریان گردابه‌ای اطراف پایه به سمت پایین دست منحرف گردد. و در نهایت، باعث کاهش توان گرداب‌های برخاستگی می‌گردد. با توجه به شکل، پایه با  $\frac{h}{d} = ۰/۳۳$  و آستانه مقدار آبستگی نسبی برابر  $\frac{d_s}{d_{smax}} = ۰/۳۷$  و با افزایش گام تا

جدول ۲- خلاصه نتایج آزمایش‌ها بر روی پایه‌ها در سناریوهای مختلف

ردیف	Model	Model	$S = \frac{h}{d}$	$\frac{d_s}{d_{smax}}$	$\frac{d_s}{d_{smax}} \%$
آزمایش	نام پایه‌ها	نام مدل	گام نسبی	عمق بی بعد آبستگی	درصد کاهش آبستگی
۱	پایه با گام نسبی کابل ۰/۳۳	PC1	۰/۳۳	۰/۷۲	۲۸
۲	پایه با گام نسبی کابل ۰/۵	PC2	۰/۵۰	۰/۸۰	۲۰
۳	پایه با گام نسبی کابل ۰/۶۷	PC3	۰/۶۷	۰/۸۳	۱۳
۴	پایه با گام نسبی کابل ۰/۳۳ آستانه پشت پایه	PCSB1	۰/۳۳	۰/۵۵	۴۵
۵	پایه با گام نسبی کابل ۰/۵ آستانه پشت پایه	PCSB2	۰/۵۰	۰/۶۱	۳۹
۶	پایه با گام نسبی کابل ۰/۶۷ آستانه پشت پایه	PCSB3	۰/۶۷	۰/۶۷	۳۳
۷	پایه با گام نسبی کابل ۰/۳۳ آستانه جلو پایه	PCSF1	۰/۳۳	۰/۳۷	۶۳
۸	پایه با گام نسبی کابل ۰/۵ آستانه جلو پایه	PCSF2	۰/۵۰	۰/۴۲	۵۸
۹	پایه با گام نسبی کابل ۰/۶۷ آستانه جلو پایه	PCSF3	۰/۶۷	۰/۴۷	۵۳
۱۰	پایه بدون کابل با آستانه پشت پایه	PSB	-	۰/۷۳	۲۷
۱۱	پایه بدون کابل با آستانه جلو پایه	PSF	-	۰/۴۹	۵۱
۱۲	پایه شاهد	P*	-	-	-

P\* پایه شاهد، بدون محافظت کابل و آستانه



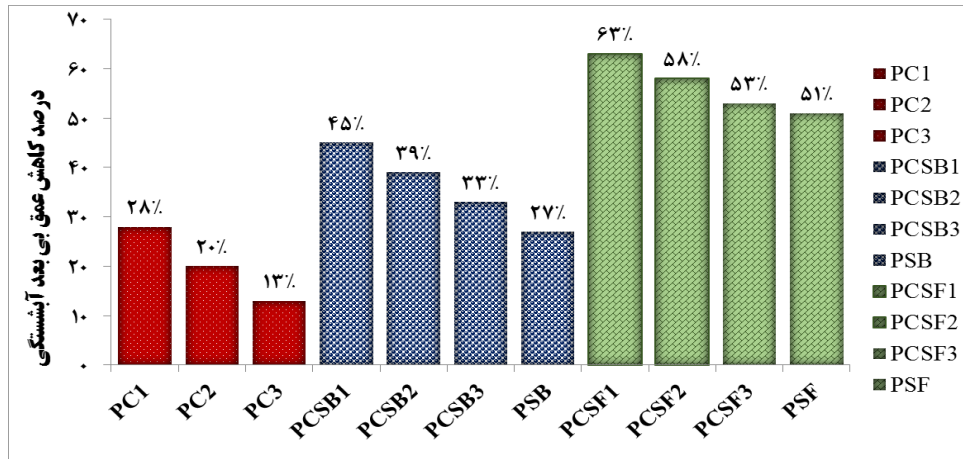
شکل ۱۲- نمودار عمق بی بعد آبستگی در برابر تأثیر گام نسبی و آستانه

بیشترین کاهش عمق آبستگی را دارا بود. این شکل نشان می‌دهد که پایه‌های کابلی با گام نسبی ۰/۳۳ دارای درصد کاهش بیشتر حفره آبستگی می‌باشند و هرچه گام کابل افزایش می‌یابد این نسبت کاهش نموده است. همانطور که در شکل‌های قبل نیز نشان داده شده است، پایه PCSF1 با میزان ۶۳٪ بیشترین مقدار

شکل (۱۳) درصد کاهش عمق آبستگی برای تمام سناریوهای انجام آزمایش‌ها در زمان تعادل را نشان می‌دهد. با توجه به شکل، نمودار دارای سه بخش است، پایه‌های کابلی بدون آستانه، که کمترین درصد کاهش را نشان می‌دهند، پایه‌های با آستانه در پشت و با آستانه در جلو که نصب آستانه در جلو

پایه های متناظر به طور متوسط جابجایی آستانه از پشت پایه به جلوی پایه باعث افزایش ۱۸ تا ۲۰ درصدی کاهش عمق آبشستگی می‌گردد. با توجه به شکل با نصب کابل بر روی پایه ها درصد کاهش عمق آبشستگی برای پایه  $PC_3=13\%$ ،  $PC_2=20\%$  و  $PC_1=28\%$  بوده، که پس از نصب آستانه در جلوی آنها بطور متوسط ۳۶ درصد عمق بی‌بعد آبشستگی کاهش یافته است.

کاهش عمق آبشستگی را در بین سایر سناریوها نشان می‌دهد. در همین راستا پایه PCSB1 متناظر پایه PCSF1 اما با آستانه در پشت، دارای درصد کاهش ۴۵ درصد می‌باشد که نشان می‌دهد در شرایط یکسان با جابجایی آستانه از پشت پایه به جلو پایه، ۱۸ درصد کاهش عمق آبشستگی را افزایش می‌دهد. همچنین برای سایر حفاظت‌های متناظر، این نسبت وجود دارد. با مقایسه سایر



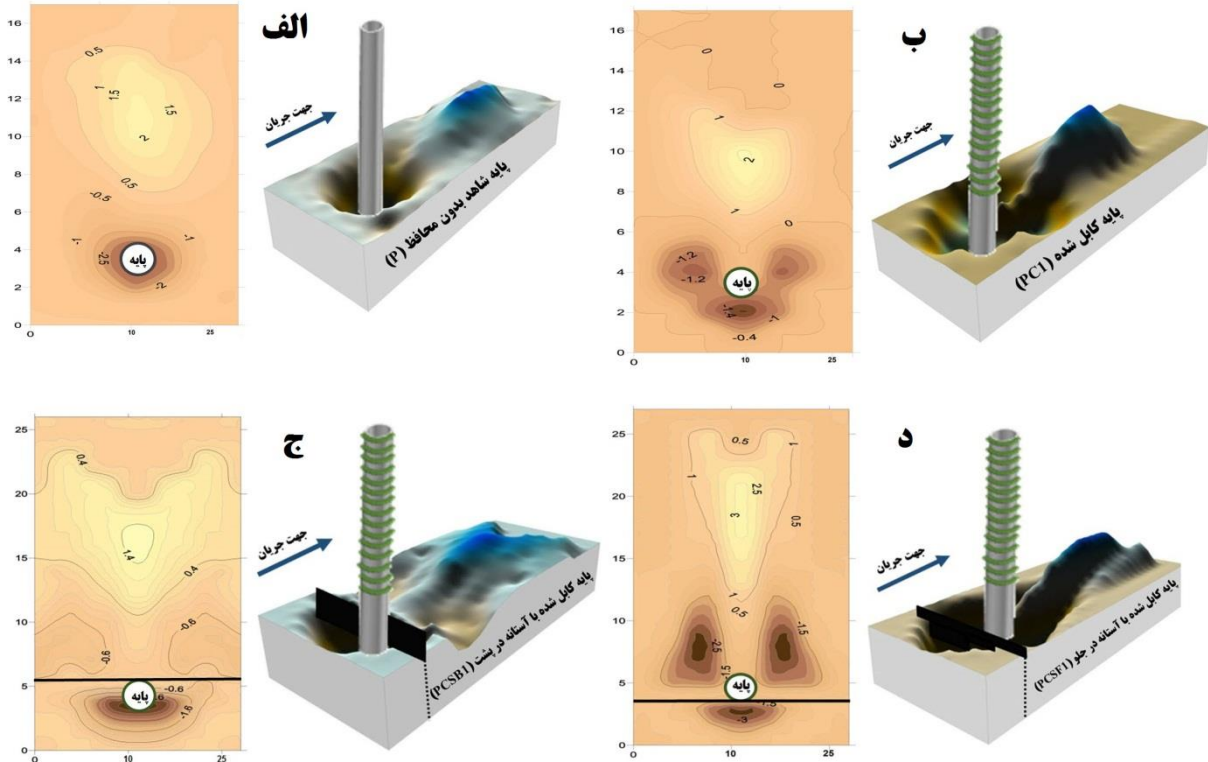
شکل ۱۳- نمودار درصد کاهش عمق آبشستگی در برابر مدل‌های تعریف شده در سناریو آزمایش‌ها

در شکل (۱۴-د) پایه PCSF1 که کمترین میزان آبشستگی را داشته، نسبت به حالت‌های قبلی پخشیدگی جریان اطراف پایه بیشتر بوده و انحراف جریان به اطراف بیشتر گردیده است از این رو به یک پروفیل متقارن رسیده است. همچنین با توجه به شکل (۱۴-د) دلیل کاهش عمق آبشستگی در زمانی که آستانه در جلو پایه، نسبت به حالتی که در پشت پایه قرار دارد این است که، وقتی آستانه در جلو مستقر می‌شود فضای توسعه آبشستگی به پایین دست را کمتر نموده و امکان توسعه پروفیل آبشستگی و به تبع آن پایین افتادن سطح بستر را کنترل می‌نماید.

شکل (۱۴) توپوگرافی بستر با کمک نرم افزار Surfer را نشان می‌دهند. با توجه به شکل (۱۴-الف)، حفره آبشستگی پایه شاهد P در پلان دارای ابعاد کم ولی عمق حفره آبشستگی زیاد، در پایه PC1 شکل (۱۴-ب) حفره آبشستگی به دلیل انحراف جریان اطراف پایه با کمک کابل تنیده شده، عمق چاله آبشستگی کمتر شده اما به طرفین پایه توسعه یافته است. همچنین شکل (۱۴-ج) که ترکیب آستانه در پشت پایه به همراه کابل PCSB1 را نشان می‌دهد توپوگرافی بستر در عین کاهش عمق آبشستگی نسبت به دو حالت قبلی، سطح بستر به یکنواختی رسیده است.

جدول ۳- مقایسه نتایج تأثیر آستانه و کابل تحقیق حاضر با نتایج دیگر پژوهشگران در شرایط آب زلال

نام پژوهشگر	موقعیت قرارگیری آستانه و کابل	درصد کاهش عمق آبشستگی (%)
عقلی و زمردیان (۲۰۱۳)	پایه با کابل و بدون آستانه	۴۹
داودی و همکاران (۲۰۱۹)	پایه با کابل و بدون آستانه	۳۸
شاه‌کرمی (۲۰۱۸)	آستانه در پشت پایه و چسبیده به پایه بدون کابل	۲۰
گریمالدی و همکاران (۲۰۰۹)	آستانه چسبیده به پایه بدون کابل	۲۵/۸
رازی و همکاران (۲۰۱۲)	آستانه چسبیده به پایه بدون کابل	۱۴
تحقیق حاضر	آستانه در پشت پایه و چسبیده به پایه بدون کابل	۲۷
تحقیق حاضر	ترکیب آستانه در پشت و چسبیده به پایه با کابل	۴۵
تحقیق حاضر	آستانه در جلو و چسبیده به پایه بدون کابل	۵۱
تحقیق حاضر	ترکیب آستانه در جلو و چسبیده به پایه با کابل	۶۳



شکل ۱۴- توپوگرافی بستر با کمک نرم افزار Surfer برای پایه‌های منتخب

جدول (۳) نتایج این تحقیق با تحقیق پژوهشگرانی نظیر (Aghli and Zomorodian, 2013)، (Davodi et al., 2019)، (Razi et al., ) (Grimaldi et al., 2009)، (Shahkarami, 2018) (2011) مقایسه گردید، این جدول نشان می‌دهد ترکیب کابل و آستانه در تحقیق حاضر نسبت به حالت حفاظت فقط با آستانه و یا فقط کابل پاسخ مناسب‌تری دارد. همچنین این نتایج در مقایسه با نمونه‌های شاهد در شکل‌های بالا تصدیق شده است.

۳- پایه PCSF1 که دارای آستانه در جلو و گام نسبی کابل  $\frac{h}{d} = 0/33$  می‌باشد دارای کمترین مقدار آبشستگی  $\frac{d_s}{d_{smax}} = 0/37$  می‌باشد. همچنین با مقایسه گراف‌های بستر در اطراف پایه شاهد (P) در آغاز آزمایش، با یک شیب بسیار تند نسبت به زمان، شروع به کاهش می‌نماید و نشان از انحراف شدید جریان به سمت بستر می‌دهد، اما در پایه‌های اصلاح شده شیب کاهش عمق بستر نسبت به زمان بسیار کمتر می‌باشد.

۴- در پایه‌های PCSB1 و PCSF1 که کمترین مقدار آبشستگی را داشته، شرایط اطراف پایه‌ها یکسان است، اما تأثیر آستانه در جلو باعث کاهش بیشتر آبشستگی و بهبود شرایط را دارد.

۵- پایه با گام نسبی  $\frac{h}{d} = 0/33$  و آستانه، مقدار آبشستگی نسبی برابر  $\frac{d_s}{d_{smax}} = 0/37$  و با افزایش تا  $\frac{h}{d} = 0/67$  مقدار آبشستگی نسبی تا  $0/47$  و با حذف کابل تا نسبت  $0/49$

نتیجه‌گیری در این تحقیق، جهت کاهش عمق آبشستگی پایه پل‌ها، از ترکیب دو نوع حفاظت، آستانه و کابل استفاده شد. با کمک این تغییر و اعمال این حفاظت‌ها و تأثیر آنها که تمامی آزمایشات در شرایط  $\frac{U}{U_c}$  برابر  $0/96$  انجام گردیدند، نسبت به پایه شاهد استوانه‌ای شکل که بدون حفاظت بوده نتایج زیر حاصل گردید:

۱- با توجه به شکل توسعه عرضی آبشستگی برای حالت‌های PCSF1، PCSB1 و PC1 که هر سه دارای حفاظت می‌باشند، نسبت به نمونه شاهد P، کاهش یافته‌اند و برای حالت PC1 که پایه کابل پیچ، بدون آستانه است، نسبت به دو حالت دارای آستانه توسعه بیشتری دارد. از این رو جابجایی آستانه، از جلو به پشت پایه، تأثیر چندانی بر روی تغییر پروفیل عرضی ندارد.

۲- پایه PCSF1 که دارای آستانه در جلو و گام نسبی کابل

۱۵ تا ۲۰ درصد عمق آبهستگی کمتری را نتیجه می‌دهد.  
 ۷- نتایج پژوهش حاضر با تحقیقات سایر پژوهشگران، نشان داد، ترکیب کابل و آستانه در جلو پایه (PCSF1) دارای درصد کاهش آبهستگی ۶۳ درصد می‌باشد، که در مطالعه زمردیان و عقلی پایه با کابل و بدون آستانه دارای درصد کاهش ۴۹ و گرمالدی و همکاران، پایه با آستانه و بدون کابل درصد کاهش ۲۵/۸ را دارد. از این رو نتیجه می‌شود که ترکیب حفاظت مستقیم آستانه با حفاظت غیر مستقیم کابل درصد کاهش آبهستگی بهتری دارد.

### سپاس‌گزاری

بدین‌وسیله از مجتمع عالی آموزشی و پژوهشی صنعت آب و برق خوزستان بابت در اختیار قرار دادن تجهیزات آزمایشگاهی جهت انجام این پژوهش تقدیر و تشکر می‌گردد.

"هیچ‌گونه تعارض منافع بین نویسندگان وجود ندارد"

### REFERENCES

- Adib, A., Shiri, V. and Shafai Bejestan, M. (2019). On the Local Scour Around Group Piers in Series by Experimental Tests. *Journal of Rehabilitation in Civil Engineering* 7, 21-34
- Aghli, M. and Zomorodian, S. (2013). Effect of Cable and Collar on Scouring Depth Around Cylindrical Bridge Pier in Meandering River. *Irrigation Sciences and Engineering* 36, 31-40. (In Farsi)
- Ahmadi, M., Hoseynnejad, M. and Rahimpour, M. (2015). Experimental study on effect of downstream bed sill on local scour around bridge piers in cohesive sediment. *Journal of Irrigation and Water Engineering* 5, 1-15. (In Farsi)
- Akhlaghi, E., Solimanibabarsad, M., Derikvand, E. and Abedini, M. (2020). Assessment the Effects of Different Parameters to Rate Scour around Single Piers and Pile Groups: A Review. *Archives of Computational Methods in Engineering* 27, 183-197
- Asgharipari, S. and Shafai Bejestan, M. (2018). Evaluation of pier scour reduction using combination of collars, slots and threading method. *Journal Management System* 11, 41-52. (In Farsi)
- Breusers, H., Nicollet, G. and Shen, H. (1977). Local scour around cylindrical piers. *Journal of Hydraulic Research* 15, 211-252
- Chiew, Y.-M. (1995). Mechanics of riprap failure at bridge piers. *Journal of hydraulic engineering* 121, 635-643
- Chiew, Y.-M. and Melville, B.W. (1987). Local scour around bridge piers. *Journal of hydraulic research* 25, 15-26
- Davodi, H., Masjedi, A.R., Heidarnejad, M., Bordbar, A. and Kamanbedast, A.A. (2019). Investigation of the Effect of Cable on the Control of Scour around the Piles Group in the River. *Journal of Hydrology and Soil Science* 23, 73-86. (In Farsi)
- Dey, S., Sumer, B.M. and Fredsoe, J. (2006). Control of scour at vertical circular piles under waves and current. *Journal of Hydraulic Engineering* 132, 270-279
- Grimaldi, C., Gaudio, R., Calomino, F. and Cardoso, A.H. (2009). Control of scour at bridge piers by a downstream bed sill. *Journal of Hydraulic Engineering* 135, 13-21
- Guan, D., Chiew, Y.-M., Wei, M. and 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
- Izadina, E. and Heydarpoor, M. (2014). Investigation and Comparison of Efficiency of Cable and Groove in Protection Against Scouring. *Irrigation Sciences and Engineering* 37, 23-32. (In Farsi)
- Karimaei Tabarestani, M. (2020). Study on time development of horse-shoe vortex diameter and shear stress at bridge pier. *Jornal Management System* 13, 51-65. (In Farsi)
- Karimaeitabarestani, M. (2020). Study on time development of horse-shoe vortex diameter and shear stress at bridge pier. *Water Engineering* 13, 51-65. (In Farsi)
- Khwaitrakpam, P. and Mazumdar, A. (2009). Local scour around hydraulic structures. *International Journal of Recent Trends in Engineering* 1, 59
- Lagasse, P.F. and Richardson, E.V. (2001). ASCE compendium of stream stability and bridge scour

افزایش می‌یابد. در همین شرایط پایه با همین گام نسبی، بدون آستانه، نسبت  $\frac{d_s}{d_{smax}} = 0.72$  می‌باشد، که نشان دهنده تأثیر آستانه است، از این رو عدم حضور آستانه در جلو پایه افزایش حدود دو برابری عمق آبهستگی را به همراه دارد و با حذف آستانه در پشت پایه، نسبت آبهستگی در حدود ۱/۳ برابر افزایش می‌یابد.

۶- پایه‌های کابلی با گام نسبی ۰/۳۳ دارای درصد کاهش بیشتر حفره آبهستگی می‌باشند و هرچه گام کابل افزایش می‌یابد این نسبت کاهش نموده است. همچنین پایه PCSF1 با میزان ۶۳٪ بیشترین مقدار کاهش عمق آبهستگی را در بین سایر سناریوها دارد. در همین راستا پایه PCSB1 متناظر پایه PCSF1 اما با آستانه در پشت، دارای درصد کاهش ۴۵٪ می‌باشد که نشان می‌دهد در شرایط یکسان با جابجایی آستانه از پشت پایه به جلو پایه، ۱۸ درصد کاهش عمق آبهستگی را افزایش می‌دهد.  
 ۷- با توجه به آزمایش‌های مقایسه‌ای، استفاده از آستانه در جلو نسبت به آستانه در پشت پایه، بطور متوسط در محدوده

- papers. *Journal of Hydraulic Engineering* 127, 531-533
- Majediasl, M., Daneshfaraz, R. and Valizadeh, S. (2019). Experimental Investigation of the River Materials Mining Effect on the Scouring Around Armed Pier Groups. *Iranian Journal of Soil and Water Research* 50, 1363-1380. (In Farsi)
- Melville, B. and Sutherland, A. (1988). Design method for local scour at bridge piers. *Journal of Hydraulic Engineering* 114, 1210-1226
- Melville, B.W. (1997). Pier and abutment scour: integrated approach. *Journal of hydraulic Engineering* 123, 125-136
- Melville, B.W. and Chiew, Y.-M. (1999). Time scale for local scour at bridge piers. *Journal of Hydraulic Engineering* 125, 59-65
- Rajaratnam, N. and Ahmed, F. (1998). Flow around bridge piers. *Journal of Hydraulic Engineering* 124, 288-300
- Raudkivi, A.J. and Ettema, R. (1983). Clear-water scour at cylindrical piers. *Journal of hydraulic engineering* 109, 338-350
- Razi, S., Salmasi, F., Hosseinzadeh Dalir, A. and Farsadizaeh, D. (2011). Application of Bed Sill to Control Scouring Around Cylindrical Bridge Piers. *Journal of Civil Engineering and Urbanism* 2, 115-121. (In Farsi)
- Safaei, A., Choramin, M., Khajavi, S., Parmoon, A. and Arezoo, 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
- Shafai Bejestan, M., Masjedi, A. and Kazemi, H. (2010). Effects of bridge pier position in a 180 degree flume bend on scour hole depth. *JApSc* 10, 670-675
- Shahkarami, N. (2018). Evaluation the Performance of Bed Sill, Collar and Their Combination in Scour Protection of Cylindrical Bridge Pier. *Journal of Civil and Environmental Engineering University of Tabriz* 47, 113-121. (In Farsi)
- Shahsavari, H., Moradi, S. and Khodashenas, S. (2019). Study of different scouring areas relative to flow velocity in Downstream Base in pairs of bases and Impact of cable protection method on these areas. *Quranic Knowledge Research* 19, 137-151. (In Farsi)
- Shojaei, P., Farsadizadeh, D. and Hoseinzadehdalir, A. (2012). Effects of Combined Submerged Vanes and Collar on the Scour Reduction around Cylindrical Bridge Piers. *Journal of Hydrology and Soil Science*, 15, 23-25. (In Farsi)
- Tafarajnoruz, A., Gaudio, R. and Calomino, F. (2012). Evaluation of flow-altering countermeasures against bridge pier scour. *Journal of hydraulic engineering* 138, 297-305
- Wang, L., Melville, B., Shamseldin, A. and Nie, R. (2020). Impacts of Bridge Piers on Scour at Downstream River Training Structures: Submerged Weir as an Example. *Water Resources Research* 56, 20-27