

## تأثیر توأم صفحات مستغرق و طوق در کاهش آبشستگی پایه‌های مستطیلی با دماغه‌ی گرد

سید حسین حسینی<sup>1\*</sup>، علی حسین‌زاده دلیر<sup>2</sup>، داود فرسادی‌زاده<sup>3</sup>، هادی ارونقی<sup>4</sup>، محمد علی قربانی<sup>3</sup>

تاریخ دریافت: 88/12/10 تاریخ پذیرش: 89/12/22

<sup>1</sup> دانشجوی دکتری سازه‌های آبی، گروه مهندسی آب دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز

<sup>2</sup> استاد گروه مهندسی آب دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز

<sup>3</sup> دانشیار گروه مهندسی آب دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز

<sup>4</sup> استادیار گروه مهندسی آب دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز

\* مسئول مکاتبه: [sayyedhossein.hosseini@gmail.com](mailto:sayyedhossein.hosseini@gmail.com)

### چکیده

در این تحقیق تأثیر توأم صفحات مستغرق و طوق در کاهش آبشستگی اطراف پایه‌های مستطیلی با دماغه‌ی گرد بررسی شد. صفحات مستغرق سازه‌هایی هستند که غالباً برای کاربردهای مختلفی از قبیل، حمایت از سواحل در برابر فرسایش، خروج رسوبات از دهانه‌ی آبگیرها و افزایش عمق کشتیرانی استفاده می‌شوند. این صفحات با تغییر در رژیم حرکت بار بستر این امکان را فراهم می‌سازند تا محل رسوب گذاری و فرسایش قابل کنترل باشد. طوق نیز مانع از برخورد جریان پایین‌رونده با بستر شده و عمق آبشستگی را کاهش می‌دهد. آزمایشات مختلفی بر روی پایه با زوایای مختلف انجام شد. همچنین عملکرد صفحات مستغرق در ارتفاع‌های مختلف روی بستر و زوایای مختلف با جهت جریان بررسی گردید. طوق مورد استفاده نیز دارای عرضی سه برابر عرض پایه بوده و در روی بستر نصب شد. نتایج نشان داد که با افزایش زاویه‌ی پایه با جهت جریان از تأثیر صفحات مستغرق در کاهش آبشستگی کاسته می‌شود. حداکثر کاهش آبشستگی برای پایه‌ی 0، 5 و 10 درجه با جهت جریان با صفحات مستغرق با ارتفاع 2/5 سانتیمتر در روی بستر و زاویه‌ی 30 درجه با جهت جریان به ترتیب در حدود 45/57، 39/76 و 27/78 درصد بود. آزمایشات با طوق نشان دادند که با افزایش زاویه‌ی پایه با جهت جریان از عملکرد طوق کاسته می‌شود. حداکثر کاهش آبشستگی در آزمایشات با صفحات مستغرق و طوق برای پایه‌ی 0، 5 و 10 درجه با طوق به ترتیب برابر با 69/62، 49/4 و 7/78 درصد بود.

واژه‌های کلیدی: آبشستگی، پایه پل، جریان‌های ثانویه، جریان پایین‌رونده، صفحات مستغرق، طوق، گرداب

## Simultaneous effects of submerged vanes and collar on scour reduction around rectangular piers with rounded nose

SH Hosseini<sup>1\*</sup>, A Hosseinzadeh dalir<sup>2</sup>, D Farsadizadeh<sup>3</sup>, H Arvanaghi<sup>4</sup>, MA Ghorbani<sup>3</sup>

Received: 1 March 2010 Accepted: 13 March 2011

<sup>1</sup>Phd candidate of Water Structures, Dept. of Water Eng., Faculty of Agric., Univ. of Tabriz, Iran,

<sup>2</sup> Prof., Dept. of Water Eng., Univ. of Tabriz, Tabriz, Iran.

<sup>3</sup> Assos., Dept. of Water Eng., Univ. of Tabriz, Tabriz, Iran

<sup>4</sup> Assist. Prof., Dept. of Water Eng., Faculty of Agric., Univ. of Tabriz, Iran,

\*Corresponding Author: [Sayyedhossein.hosseini@gmail.com](mailto:Sayyedhossein.hosseini@gmail.com)

### Abstract

In this research, the influences of submerged vanes and collar on scour reduction around rectangular bridge piers with circular nose were investigated. Vanes are used as protective structures against bank erosion, exclusion of sediment from water intake structures and increasing navigational depth. Vanes change the regime of bed load movement that lead to control place of deposition and erosion. Collar prevents the direct impact of down flow with the bed that leads to decreasing the scour depth. Experiments were carried out with different piers and submerged vanes at various arrangements. The width of the collar was three times greater than the pier width and was installed on the bed. It was found that effectiveness of submerged vanes reduces by increasing the skewness of the pier. Maximum reductions of scouring were 45.57, 39.76 and 27.78% for submerged vanes with 2.5cm heights on the bed and skewed at 30° to the flow when the angle of pier was 0° and skewed at 5° and 10° to the flow, respectively. Results showed that the performance of collar decreased with increasing of pier angle with flow direction. Also maximum reductions of scouring were 69.62%, 49.4% and 7.78% for pier with submerged vanes and collar when were aligned and skewed at 5° and 10° to the flow, respectively.

**Keywords:** Bridge pier, Collar, Down flow, Scouring, Secondary circulation, Submerged vanes, Vortex

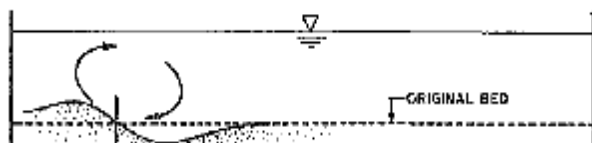
شود (جانسون وداک 1998). این تخریب‌ها و خسارات وارده علاوه بر تلفات جانی و ضررهای مالی، سبب قطع راه‌های ارتباطی شده که بدین ترتیب حمل و نقل را نیز مختل می‌کند (زرراتی و عزیز 1380). با کنترل و محافظت از پایه‌های پل در برابر آبشستگی و ارائه‌ی

### مقدمه

اهمیت پل‌ها در برقراری راه‌های ارتباطی بر کسی پوشیده نیست. همه ساله هزاران پل در سراسر جهان در اثر آبشستگی<sup>1</sup> در اطراف پایه‌های آنها تخریب می-

<sup>1</sup> Scouring

شکل 1- جریان القایی در اطراف صفحات مستغرق (ادگارد و وانگ 1991)



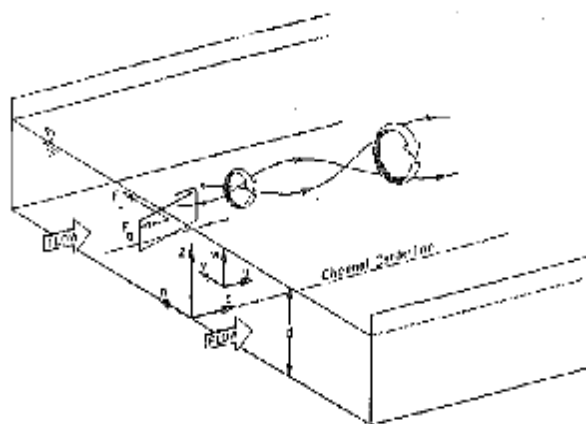
شکل 2- تغییر پروفیل بستر توسط صفحات مستغرق (ادگارد و وانگ 1991)

تکنیک استفاده از صفحات مستغرق در اوایل دهه‌ی هشتاد میلادی توسط ادگارد و کندی (1983) در انیستیتوی هیدرولیک دانشگاه آیووا<sup>3</sup> به منظور حفاظت سواحل خارجی پیچ رودخانه استفاده شد. بارکدل و همکاران (1999) نیز با مدل کردن یک آبگیر به بررسی آزمایشگاهی استفاده از صفحات مستغرق در جلوگیری از ورود رسوبات به درون آبگیر پرداختند. نتایج آزمایشات آنها نشان داد که نصب صفحات در قسمت جلو آبگیر میزان رسوبات وارده به آبگیر را 70 تا 80 درصد کاهش می‌دهد. لاپلان (1999) به بررسی اثر صفحات مستغرق در کاهش آبشستگی پایه‌ی پل استوانه‌ای در هر دو حالت جریان آب زلال و بستر زنده پرداخت. او از دو سری صفحات مستغرق متفاوت استفاده کرد. صفحات مستغرق نوع I که نسبت طول صفحه در امتداد جریان به ارتفاع آن کمتر از یک بود ( $L/H < 1$ ) و صفحات مستغرق نوع II که همانند صفحات مستغرق آیوا نسبت طول صفحه در امتداد جریان به ارتفاع آن بزرگتر از یک بود ( $L/H > 1$ ). او آزمایشات را برای سه زاویه‌ی 15، 25 و 35 درجه با جهت جریان انجام داد و نتیجه گرفت با افزایش زاویه صفحات مستغرق عملکرد آنها افزایش می‌یابد. جانسون و همکاران (2001) تأثیر صفحات مستغرق را در جلوگیری از آبشستگی پایه‌های کناری پل‌ها از طریق مدل آزمایشگاهی بررسی کردند. آنها مشاهده کردند که

روش‌های مناسب پیش‌بینی آبشستگی می‌توان از وارد آمدن این خسارات پیش‌گیری کرد.

با وجود مطالعات تجربی و عددی فراوانی که در زمینه آبشستگی توسط محققان انجام شده است به دلیل پیچیدگی و اهمیت مسئله هنوز هم محققان زیادی در این زمینه فعالیت می‌کنند. روش‌های مختلفی برای مهار آبشستگی در اطراف پایه‌های پل‌ها ارائه شده است که از آن جمله می‌توان به استفاده از طوق<sup>1</sup> در اطراف پایه‌ها، و صفحات مستغرق<sup>2</sup> اشاره کرد. صفحات مستغرق سازه‌هایی هستند که از جنس فلز، چوب یا بتن ساخته می‌شوند و بسته به زاویه‌ی قرارگیری و الگوی جریان، با ایجاد گرداب ثانویه در جریان اطراف خود باعث تغییر در مقدار و جهت تنش برشی و الگوی توزیع جریان و به تبع آن تغییر روند انتقال رسوب می‌شوند. به علت اختلاف فشار موجود در دو طرف صفحه، جریان از سمت پر فشار به طرف بالای آن و از سمت کم فشار به طرف پایین آن حرکت می‌نماید و در نتیجه گرداب و گردش القایی در اطراف پره بوجود می‌آید (شکل 1 و 2).

طوق نیز یک صفحه‌ی نازک تخت است که در ترازهای مختلف و به صورت عمود بر پایه نصب می‌شود. هدف از قرار دادن طوق در اطراف پایه حفاظت از بستر در برابر آبشستگی جریان پایین‌رونده و فعالیت گرداب‌ها است.



<sup>1</sup> Collar

<sup>2</sup> Submerged vanes

<sup>3</sup> Iowa Institute of Hydraulic Research

دماغه‌ی گرد و در سه زاویه‌ی 0، 5 و 10 درجه با امتداد جریان بررسی شد.

#### مکانیزم آبشستگی در اطراف پایه‌ی پل

بر اساس تحقیقات انجام شده‌ی قبلی، مکانیزم آبشستگی موضعی در اطراف پایه‌ی پل بسیار پیچیده می‌باشد (ملویل و کلمن 2000 و رادکیوی 1990). این تحقیقات نشان می‌دهند که سیستم گردابی پیچیده‌ای در اطراف پایه بوجود می‌آید که باعث ایجاد حفره در اطراف پایه‌ها می‌شود. برخورد جریان به پایه و جدا شدن آن از پایه‌ی پل، از عوامل مهم در بوجود آمدن سیستم گردابی فوق می‌باشند. برخورد جریان به پایه، جریان رو به پایین و آن هم گرداب نعل اسبی<sup>1</sup> را شکل می‌دهد که عامل اصلی فرسایش بستر رودخانه در اطراف پایه می‌باشد. هنگامی که جریان از کناره‌های پایه‌ی پل عبور می‌کند، در طول جداره از پایه جدا شده و در پشت پایه گرداب‌های برخاستگی<sup>2</sup> را بوجود می‌آورد. محور این گرداب‌ها عمود بر بستر رودخانه بوده و جهت آنها به سمت داخل و در دو طرف خلاف جهت یکدیگر می‌باشند. این گرداب‌ها با محوری عمودی و مرکزی کم فشار، نرات بستر را به سمت بالا مکیده و در معرض جریان قرار می‌دهند (رادکیوی 1990). بدین ترتیب گرداب‌های برخاستگی باعث ایجاد حفره در پایین دست پایه می‌شوند (شکل 3).

الگوی جریان در اطراف پایه‌ی مستطیلی در مقایسه با پایه‌ی دایره‌ای اندکی متفاوت می‌باشد. در این مورد نیز گرداب‌های نعل اسبی و گرداب‌های برخاستگی دو عامل فرسایش بستر در اطراف پایه می‌باشند و در صورتی که پایه طوری نصب شود که محور طولی پایه با راستای عمومی جریان زاویه نداشته باشد، گرداب نعل اسبی مانند پایه‌ی دایره‌ای تشکیل می‌شود. همچنین جریان از پایه جدا شده و باعث تشکیل گرداب‌های

این صفحات سرعت جریان و تنش برشی را در ساحل کاهش و در مرکز کانال افزایش می‌دهند. صمیمی بهبهان و همکاران (1385) نیز اثر شکل متفاوت صفحات را بر روی آبشستگی پل‌ها بررسی کردند. آنها عملکرد صفحات مستغرق را که نیمه اول آنها با جریان زاویه‌ی 10 درجه و نیمه‌ی دوم آنها با جریان زاویه‌ی 30 درجه می‌سازد را در کاهش آبشستگی پایه‌ی پل‌ها بررسی کردند. قربانی و کلز (2008) نیز تاثیر صفحات مستغرق منفرد و دابل را در کاهش آبشستگی پایه‌های پل از طریق مطالعه‌ی آزمایشگاهی بررسی کردند، آنها نتیجه گرفتند که استفاده از دو صفحه‌ی مستغرق نسبت به یک صفحه در کاهش عمق آبشستگی موثرتر است. مطالعات متعددی توسط محققان به منظور کاهش آبشستگی توسط طوق صورت گرفته است. کومار و همکاران (1999) رابطه‌ای برای کاهش عمق آبشستگی در حضور طوق در پایه‌ی استوانه‌ای ارائه دادند. با توجه به این تحقیقات طوق کوچکتر در تراز بالاتر اثر حفاظتی کمتری خواهد داشت. زراتی و عزیز (1380) تاثیر نیم طوق را با دو عرض متفاوت  $2D$  و  $3D$  ( $D$  عرض پایه) که در ترازهای مختلف در اطراف پایه نصب شده بودند را در کاهش آبشستگی پایه‌ی مستطیلی با دماغه‌ی گرد بررسی کردند. زراتی و همکاران (2004) آزمایشات متعددی را بر روی کاربرد طوق در مهار آبشستگی در پایه‌های مستطیلی زاویه‌دار انجام دادند. مدل پایه‌ی مورد استفاده در سه حالت هم-راستا با جریان، با زاویه‌ی 5 درجه و 10 درجه نسبت به جهت جریان مورد استفاده قرار گرفت. همچنین طوق‌ها دارای ابعاد مختلف بوده و در ارتفاعات مختلف نصب شدند. نتایج آزمایشات حاکی از آن بود که طوق‌های بزرگتر در ارتفاعات پایین‌تر موثرتر بوده و کارایی طوق‌ها با افزایش زاویه‌ی پایه نسبت به جریان کاهش می‌یابد. در این تحقیق تاثیر توأم صفحات مستغرق و طوق در کاهش آبشستگی اطراف پایه‌های مستطیلی با

<sup>1</sup> Horseshoe vortex

<sup>2</sup> Wake vortex

مجموع عدم تقارن در حفره‌ی آبستنگی را بوجود می‌آورد (شکل 3).

### مواد و روش‌ها

#### مدل فیزیکی و مراحل مختلف انجام آزمایشات

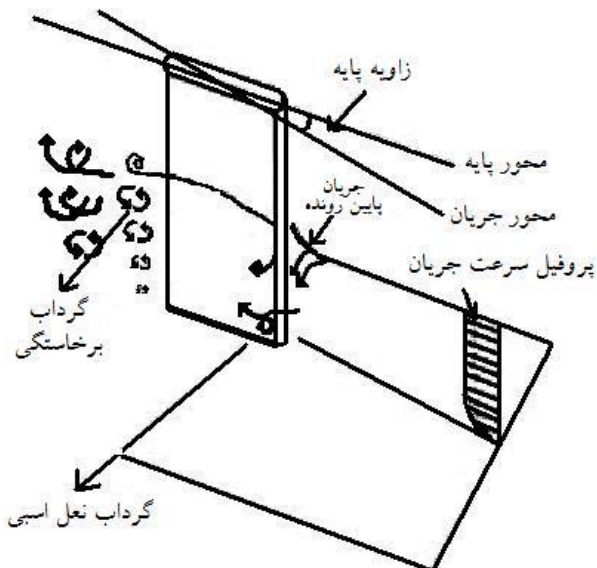
آزمایشات در آزمایشگاه هیدرولیک گروه مهندسی آب دانشگاه تبریز و در کانال مستطیلی فلزی - شیشه‌ای به طول 6 متر، عرض 80 سانتیمتر و ارتفاع 50 سانتیمتر انجام شد. شیب کانال آزمایشگاهی قابل تغییر بوده و برای انجام آزمایشات در روی شیب صفر تنظیم شد. کانال در قسمت ابتدایی و انتهایی دارای مخزن است که در مخزن انتهایی یک سرریز مستطیلی تعبیه شده است که برای اندازه‌گیری دبی از آن استفاده می‌شود.

آب مورد نیاز کانال بوسیله‌ی یک پمپ با قدرت 100 اسب بخار از مخزن اصلی به کانال منتقل می‌شود و توسط یک دریچه‌ی کشویی در انتهای کانال عمق آب در کانال تنظیم می‌شود.

کانال آزمایشگاهی به دو قسمت بستر متحرک و کف کاذب تقسیم شد. بستر متحرک از فاصله‌ی 2 متری از ابتدای کانال شروع شده و دارای طول 3 متر است که ارتفاع رسوبات در این قسمت 15 سانتیمتر بوده و توسط رسوبات غیر چسبنده پر شد. قسمت ابتدای کانال تا ابتدای بستر متحرک و انتهای بستر متحرک تا انتهای کانال را کف کاذب تشکیل می‌دهد که از سکوه‌های چوبی پوشیده شده توسط فایبرگلاس، تشکیل شده است. ارتفاع کف کاذب نیز 15 سانتیمتر بود (شکل 4). برای صاف کردن بستر نیز از یک صفحه‌ی پلاستیکی نازک استفاده شد.

با توجه به اینکه حداکثر عمق آبستنگی در شرایط آبستنگی آب زلال رخ می‌دهد، آزمایشات در شرایط آب زلال ( $\frac{U_*}{U_{*c}} = 0.9$ ) انجام شد. برای از بین بردن تأثیر دیواره‌های کانال بر آبستنگی موضعی، قطر پایه نباید

برخاستگی می‌شود. محل جدایی جریان در طول پایه و تشکیل گرداب‌های برخاستگی بستگی به عدد رینولدز<sup>1</sup> جریان، شکل پیشانی پایه و نسبت طول به عرض پایه دارد.



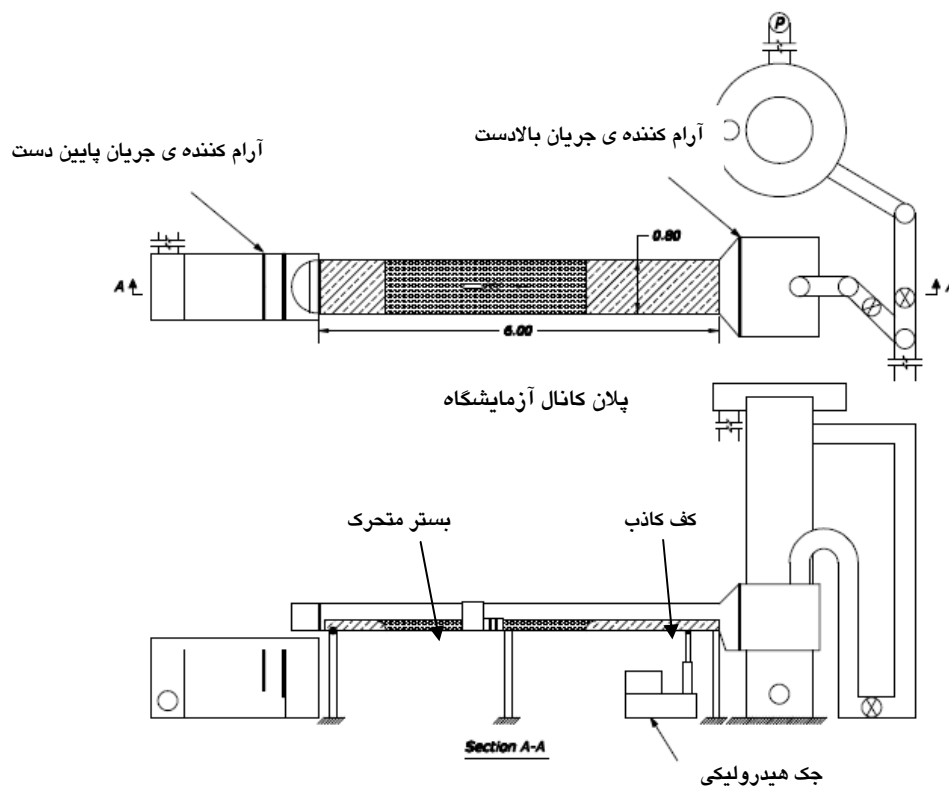
شکل 3- الگوی جریان در اطراف یک پایه‌ی مستطیلی (زراتی و همکاران 2004)

در صورتی‌که محور طولی پایه مستطیلی با راستای عمومی جریان زاویه داشته باشد، طول بیشتری از پایه در برابر جریان قرار گرفته و جریان با آن برخورد می‌کند و در نتیجه عملکرد گرداب نعل اسبی در سمتی از پایه که در تماس مستقیم با جریان است (سمت پرفشار) قوی‌تر می‌باشد. از طرفی عملکرد گرداب‌های برخاستگی کنار دیواره‌ی طولی پایه با افزایش زاویه‌ی محور طولی پایه با راستای عمومی جریان در سمتی از دیواره‌ی پایه که در تماس مستقیم با جریان نیست (سمت کم فشار)، نسبت به حالت بدون زاویه قوی‌تر می‌شود. افزایش زاویه‌ی محور طولی پایه با راستای عمومی جریان، باعث افزایش سطح برخورد جریان در یک طرف پایه شده و آبستنگی بیشتری در این سمت مشاهده می‌گردد (لارسن و توچ 1956). این اختلاف در

<sup>1</sup> Reynolds number

مستطیلی به ضخامت 1 سانتی‌متر قرار دارد. در آزمایشات مدل پایه در فاصله‌ی 1/65 متری از ابتدای بستر متحرک در داخل رسوبات قرار داده شد. شکل 5 مدل پایه‌ی مورد استفاده در آزمایشات به همراه صفحات مستغرق را نشان می‌دهد.

از 10 درصد عرض کانال بیشتر باشد. با توجه به این نکته مدل پایه از جنس پلکسی گلاس به عرض 5 سانتی‌متر و طول 25 سانتی‌متر ساخته شد که از یک قسمت مستطیلی به طول 20 سانتی‌متر و دو نیم استوانه به شعاع 2/5 سانتی‌متر که به ابتدا و انتهای آن متصل هستند، تشکیل شده است و بر روی یک صفحه‌ی



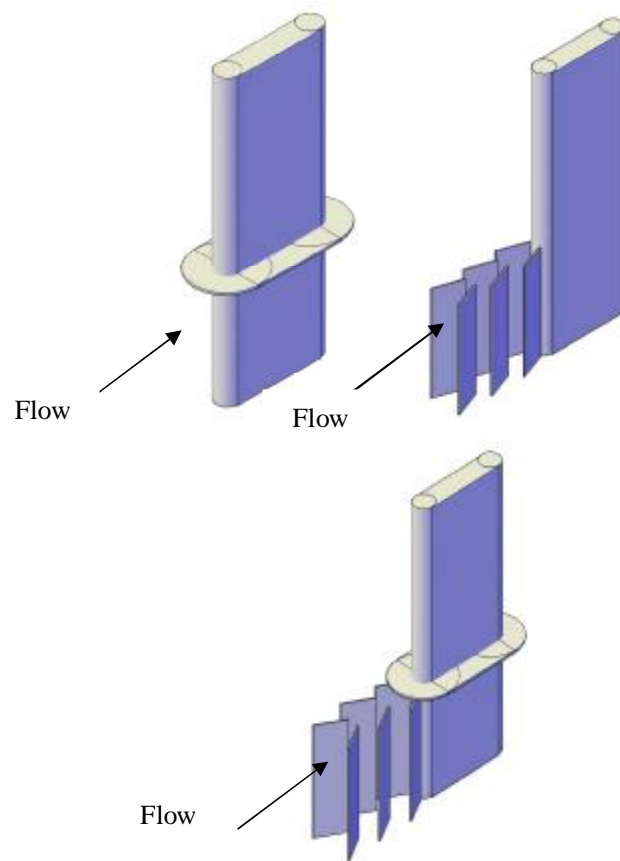
شکل 4- کانال آزمایشگاه هیدرولیک

صفحات مستغرق مورد استفاده در آزمایشات نیز از جنس ورق‌های گالوانیزه به شکل مستطیل و به ضخامت 1 میلی‌متر ساخته شدند که بر روی صفحه‌ای مستطیل شکل سوار بودند که سبب حفظ تعادل آنها می‌شد. طول این صفحات 7/5 سانتی‌متر (1/5 برابر عرض پایه) در نظر گرفته شد. در آزمایشات نسبت ارتفاع صفحات به طول آنها ( $\frac{H}{L}$ ) برابر سه مقدار 0،  $\frac{1}{3}$  و  $\frac{1}{6}$  در نظر گرفته شد. تعداد صفحات مورد استفاده

با انجام آزمایش دانه‌بندی و رسم منحنی دانه‌بندی ذرات،  $d_{50}$  ذرات برابر 0/43 میلی‌متر به دست آمد. طبق مطالعات چپو (1995) چنانچه  $\frac{y}{D} > 3$  باشد (y عمق جریان و D عرض پایه)، عمق جریان تاثیری بر روی عمق آبشستگی ندارد. در نتیجه با توجه به معیارهای فوق و محاسبه‌ی سرعت برشی، دبی جریان، در نظر گرفتن  $y = 15/3$  سانتی‌متر و دبی 31 لیتر بر ثانیه شرط  $\frac{U_*}{U_{*c}} = 0.9$  در آزمایشات برقرار شد.

15 سانتی‌متر و ضخامت 2 میلی‌متر است. مقطع طوق به شکل مستطیلی به طول 20 سانتی‌متر و عرض 15 سانتی‌متر و دو نیم دایره به شعاع 7/5 سانتی‌متر در دو طرف آن می‌باشد. طوق به عرض  $3D$  (3 برابر قطر پایه) در نظر گرفته شده که بیشترین کارایی را دارد و در روی بستر نصب شد. شکل 5 مدل پایه همراه با طوق مورد استفاده در آزمایشات را نشان می‌دهد.

در آزمایشات با توجه به مطالعات لاچلان (1999) 6 عدد در نظر گرفته شد. سایر پارامترها از قبیل فاصله‌ی صفحات در جهت عمود بر جهت جریان، فاصله‌ی صفحات در جهت جریان نیز با توجه به مطالعات مذکور انتخاب شد. طوق مورد استفاده در آزمایشات نیز از جنس پلکسی گلاس بوده که دارای طول 35 سانتی‌متر، عرض



5- شکل پایه‌ی مورد استفاده در آزمایشات همراه با صفحات مستغرق و طوق

#### آزمایشات

اختصاصی  $P_i$  نشان داده شده اند که اندیس  $i$  نشان دهنده‌ی زاویه‌ی پایه با امتداد جریان است. آزمایشات پایه‌ی همراه با صفحات مستغرق با علامت اختصاری  $P_{V_i,y}$  نشان داده شده‌اند که اندیس  $i$  مربوط به زاویه‌ی

آزمایشات در چهار سری پایه‌ی بدون حمایت، پایه همراه با صفحات مستغرق، پایه همراه با طوق و پایه همراه با صفحات مستغرق و طوق انجام شدند. آزمایشات پایه‌ی بدون حمایت با علامت

آبشستگی در طرفین پایه به خوبی نمایان است. با ادامه‌ی این روند از ارتفاع رسوبات انباشته شده در طرفین پایه کاسته شده، سطح رسوبات پایین‌تر از تراز بستر قرار می‌گیرد. تغییرات زمانی عمق آبشستگی در ابتدا زیاد بوده و رفته رفته با گذشت زمان کم می‌شود. نکته‌ای که در مورد پایه‌ی هم‌راستا با جریان باید به آن اشاره کرد این است که در این حالت شکل حفره‌ی آبشستگی در اطراف پایه متقارن بوده و میزان توسعه‌ی حفره در دو طرف پایه یکسان است. همچنین گرداب‌های برخاستگی در انتهای پایه نیز در دو طرف انتهای پایه متقارن هستند.

در حالتی که پایه با جهت جریان دارای زاویه است، با شروع آزمایش، به دلیل تلاطم ناشی از جریان در قسمتی از پایه که در تماس مستقیم با جریان نیست (سمت کم فشار) در میانه‌ی انتهایی پایه گرداب‌هایی در جهت عمود بر سطح بستر قابل رویت هستند که بسیار ضعیف می‌باشند. با گذشت زمان و توسعه‌ی حفره در قسمت جلو پایه، رسوبات جابه‌جا شده از این منطقه به طرفین پایه حرکت کرده و در طرفین پایه جمع می‌شوند. با توجه به سرعت بالای جریان و جابجایی پیوسته‌ی رسوبات، میزان تجمع رسوبات در سمتی که در تماس مستقیم با جریان است (سمت پرفشار) کمتر بوده و برعکس در سمت مقابل (سمت کم فشار) زیاد بوده و سبب می‌شود که سطح رسوبات بالاتر از سطح بستر قرار گیرد (شکل 6). پس از گذشت چند ساعت به تدریج با توسعه‌ی حفره‌ی آبشستگی به طرفین پایه، رسوبات تجمع یافته شسته شده و به پایین دست منتقل می‌شوند. با شروع آزمایش و توسعه‌ی حفره در قسمت جلو پایه به تدریج گرداب‌های نعل اسبی شروع به فعالیت کرده که با گذشت زمان بر قدرت آن افزوده شده و میزان انتقال رسوب را از قسمت جلو پایه افزایش می‌دهند که نتیجه‌ی آن ریزش دیواره‌ی حفره‌ی آبشستگی و توسعه‌ی آن است. پس از مدتی از شروع آزمایش فرآیند آبشستگی به طرفین پایه کشیده شده و عمق

صفحات با امتداد جریان و اندیس  $J$  مربوط به ارتفاع صفحات در روی بستر است. آزمایشات پایه‌ی همراه با طوق با علامت اختصاری PC و آزمایشات پایه‌ی همراه با صفحات مستغرق و طوق با علامت PVC نشان داده شده‌اند.

## نتایج و بحث

### آزمایش‌های مربوط به پایه‌ی بدون حمایت

در شروع کار، آزمایش با پایه‌ی بدون حمایت و در زوایای صفر، 5 و 10 درجه با امتداد جریان به منظور تعیین حداکثر عمق آبشستگی انجام شد.

با شروع آزمایش با توجه به شکل دماغه‌ی پایه، جابه‌جایی رسوبات ابتدا در قسمت جلوی پایه و در یک ناحیه با زاویه‌ی 45 درجه نسبت به محور پایه دیده می‌شود. هم‌زمان با جابه‌جایی رسوبات در این منطقه در قسمت انتهایی پایه نیز گرداب‌های برخاستگی شروع به فعالیت کرده که سبب کننده شدن رسوبات از این قسمت و جابه‌جایی آنها به سمت پایین دست می‌شود. با گذشت زمان ناحیه‌ی شسته شده در قسمت جلو پایه توسعه یافته و شکل یک نیم دایره به خود می‌گیرد. رسوبات جابه‌جا شده از این منطقه به طرفین دیواره‌ی طولی حرکت کرده و در میانه‌ی انتهایی پایه جمع شده و تشکیل یک تل کوچک را در این منطقه می‌دهند که دلیل آن ضعیف‌تر بودن گرداب‌ها و شدت کمتر تلاطم‌های جریان در این منطقه است. ادامه‌ی این فرآیند منجر به افزایش ارتفاع رسوبات در طرفین پایه و قسمت پشت پایه شده و سبب می‌شود سطح رسوبات بالاتر از تراز بستر قرار گیرد. با توسعه‌ی حفره در قسمت جلو پایه گرداب‌های نعل اسبی در جلو پایه شروع به فعالیت کرده که با گذشت زمان بر قدرت آن افزوده شده و میزان انتقال رسوب را از قسمت جلو پایه افزایش می‌دهند که نتیجه‌ی آن ریزش دیواره‌ی حفره‌ی آبشستگی و توسعه‌ی آن است. پس از مدتی از شروع آزمایش فرآیند آبشستگی به طرفین پایه کشیده شده و عمق



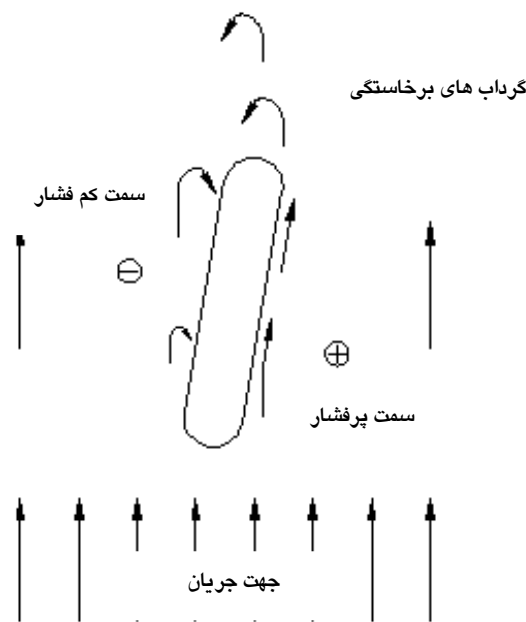
شد. این رسوبات توسط گرداب‌هایی که در لبه‌های صفحات ایجاد می‌شوند به سمت پشت آن‌ها حرکت کرده و با توجه به اینکه این منطقه در تماس با جریان نبوده و سرعت جریان در این منطقه پایین است، مقداری از رسوبات در این منطقه جمع شده و مقداری نیز توسط جریان به پایین دست منتقل می‌شوند. در یک ساعت اول آزمایش رسوبات جابه‌جا شده از قسمت صفحات ردیف اول و دوم در انتهای صفحات ردیف دوم جمع شدند به طوری که سطح رسوبات در این منطقه بالاتر از سطح بستر قرار گرفت که دلیل آن نزدیک بودن صفحات در این منطقه است. این رسوبات به تدریج توسط جریان شسته شده و به قسمت جلو پایه منتقل شدند و بدین ترتیب نرخ آبشستگی را کاهش دادند. در مورد صفحات هم‌تراز بستر ( $H = 0$ )، آبشستگی ابتدا در قسمت جلو پایه مشاهده می‌شود. با گذشت زمان و در اثر فعالیت گرداب‌های نعل اسبی و توسعه‌ی حفره در این قسمت، جابه‌جایی رسوبات از اطراف صفحات ردیف سوم (جلو پایه) آغاز شده و بدین ترتیب صفحات ردیف سوم فعالیت خود را آغاز می‌کنند. با گذشت زمان و نزدیک شدن به انتهای آزمایش و توسعه‌ی حفره، صفحات ردیف دوم و اول نیز فعالیت خود را آغاز می‌کنند.

#### تأثیر ارتفاع صفحات مستغرق روی بستر

در این آزمایشات با توجه به مطالعات قبلی، ارتفاع صفحات روی بستر برابر 0، 1/25 و 2/5 سانتیمتر در نظر گرفته شد. نتایج به دست آمده نشان دادند که حالت 2/5 سانتیمتر روی بستر بهترین عملکرد را دارد و با کاهش ارتفاع صفحات در روی بستر از عملکرد آنها کاسته می‌شود. در حالتی که ارتفاع صفحات در روی بستر 2/5 سانتیمتر است شدت تلاطم، گرداب‌ها و تنش برشی در اطراف صفحات افزایش یافته که نتیجه‌ی آن جابه‌جایی و انتقال رسوبات بیشتر توسط صفحات

دماغه‌ی پایه و سرعت بالای جریان در این منطقه است که نتیجه‌ی آن توسعه‌ی بیشتر ابعاد و عمق حفره در این منطقه، نسبت به سمت دیگر (سمت کم فشار) است (شکل 6). با افزایش زاویه‌ی پایه با جهت جریان بر شدت گرداب‌ها در اطراف پایه افزوده می‌شود.

برای پایه‌ی بدون حمایت یک آزمایش بلند مدت به مدت 45 ساعت به منظور تعیین عمق تعادل آبشستگی انجام شد که در آن 80 درصد آبشستگی در 6 ساعت اول و 90 درصد آبشستگی پس از حدود 12 ساعت از شروع آزمایش اتفاق افتاد. سایر آزمایشات نیز در مدت 12 ساعت انجام شدند.

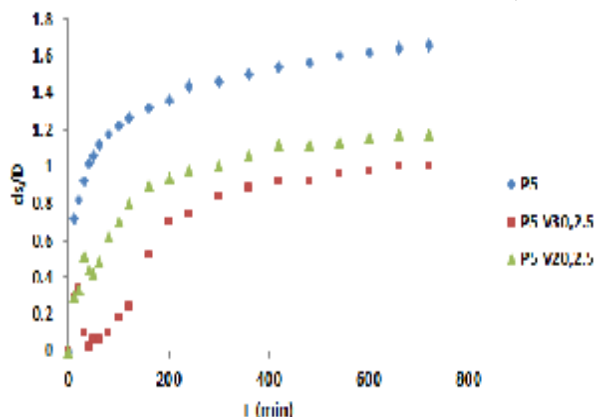


شکل 6 - طرح شماتیک جریان در اطراف پایه

#### آزمایشات با صفحات مستغرق

با شروع آزمایش، ابتدا گرداب‌های برخاستگی در قسمت پشت پایه شروع به فعالیت کردند. در اثر برخورد جریان به صفحات مستغرق فرآیند آبشستگی ابتدا در لبه‌ی جلویی صفحات ردیف اول مشاهده شده و با توسعه‌ی حفره در این منطقه و حرکت آن به سمت داخل صفحات به تدریج بر میزان انتقال رسوب افزوده

امتداد جریان سبب توسعه‌ی عرضی حفره‌ی آبشستگی در جلو پایه نیز می‌شود (شکل 8).



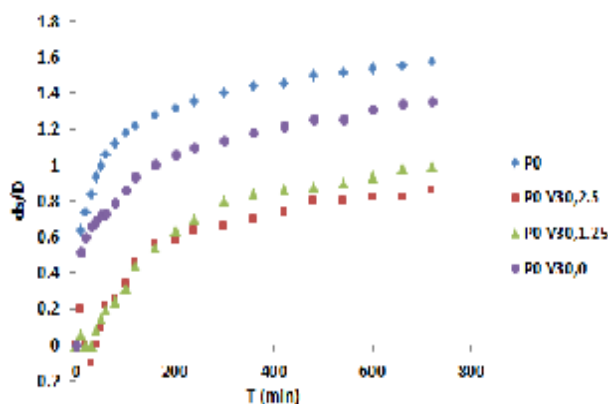
شکل 8- نمودار توسعه‌ی زمانی آبشستگی تحت تاثیر زاویه‌ی صفحات با امتداد جریان (b)

#### پایه‌ی طوق‌دار

آزمایشات با توجه به زاویه‌ی پایه با امتداد جریان به سه دسته تقسیم می‌شوند (آزمایشات سری PC). در این تحقیق طوق مورد استفاده در تراز بستر نصب شد. مکانیسم آبشستگی در اطراف پایه‌ی طوق‌دار با پایه بدون حفاظت متفاوت می‌باشد. زاویه‌ی پایه با امتداد جریان سبب تغییراتی در نحوه‌ی آبشستگی می‌شود. وجود طوق در اطراف پایه مانع از برخورد جریان پایین رونده با بستر شده، در نتیجه شروع آبشستگی در اطراف پایه به تاخیر می‌افتد. با شروع آزمایش ابتدا گرداب‌های برخاستگی در پایین دست پایه و بعد از طوق شروع به فعالیت می‌کنند. این گرداب‌ها به تدریج رسوبات قسمت انتهایی طوق را جابه‌جا نموده و به پایین دست منتقل می‌کنند و این جابه‌جایی رسوبات سبب گود شدن بستر و ایجاد حفره‌ی سطحی در این منطقه می‌شود.

پس از گذشت مدت زمانی از شروع آزمایش جریان‌های شیاری به موازات دیواره‌ی پایه و در لبه‌های طوق نیز مشاهده شد که سبب ایجاد شیاری در این مناطق شده و به تدریج به سمت بالادست پایه

ردیف اول و دوم بوده و همچنین کنترل رسوبات در ابتدای صفحات ردیف دوم نسبت به حالت‌های دیگر (0)، 1/25 سانتیمتر) بهتر صورت می‌گیرد. در نتیجه صفحات با ارتفاع 2/5 سانتیمتر در روی بستر عملکرد بهتری داشته و با کاهش ارتفاع، از عملکرد آنها کاسته می‌شود (شکل 7). ds عمق آبشستگی و D عرض پایه می‌باشد.



شکل 7- نمودار توسعه‌ی زمانی آبشستگی پایه با صفحات مستغرق، تحت تاثیر ارتفاع صفحات (H)

#### تاثیر زاویه‌ی صفحات با امتداد جریان

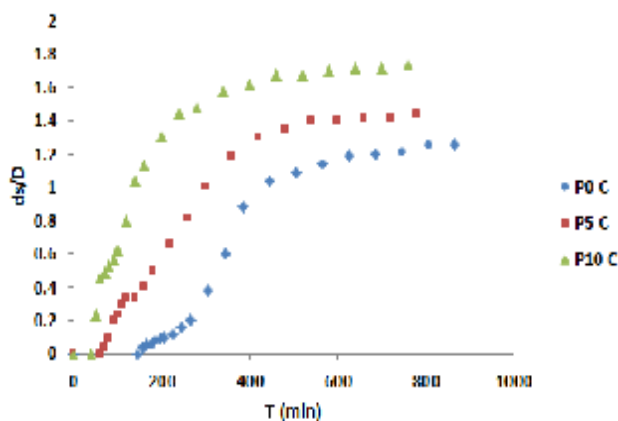
در این تحقیق آزمایشات آبشستگی با صفحات مستغرق تحت دو زاویه 20 و 30 درجه انجام شد. این زوایا با توجه به نتایج سایر محققان (لاچلان 1999؛ جانسون و همکاران 2001) انتخاب شد. نتایج حاصل از آزمایشات نشان داد که زاویه‌ی 30 درجه نسبت به زاویه‌ی 20 درجه دارای عملکرد بهتری بوده و میزان کاهش آبشستگی توسط آن بیشتر است. زیرا با افزایش زاویه‌ی صفحات طول موثر آنها افزایش یافته و در نتیجه ناحیه‌ی عرضی بیشتری را تحت تاثیر قرار می‌دهند که سبب افزایش تلاطم، تنش برشی و شدیدتر شدن گرداب‌ها می‌شود. در نتیجه میزان جابه‌جایی و انتقال رسوبات از قسمت صفحات ردیف اول و دوم و میزان کنترل و نگهداری رسوبات در قسمت داخلی صفحات ردیف سوم افزایش می‌یابد. افزایش زاویه‌ی صفحات با

با شروع آزمایش ابتدا گرداب‌های برخاستگی در قسمت پشت پایه فعالیت خود را آغاز کردند. با گذشت زمان به تدریج در میانه‌ی جلویی دیواره‌ی پایه و در لبه‌ی طوق جریان‌های شیاری دیده شدند که به تدریج به قسمت زیر طوق و پشت صفحات جلو پایه نفوذ کرده و سبب جابه‌جایی رسوبات از این مناطق شدند. پس از حدود 60 دقیقه از شروع آزمایش آبشستگی به منطقه‌ی پشت صفحات جلو پایه رسید و به تدریج قسمت پشت آنها نمایان شدند. تلاطم و گرداب‌های ناشی از جریان در این ناحیه سبب جابجایی رسوبات از ابتدای صفحات جلو پایه می‌شود به طوری‌که پس از حدود 90 دقیقه از شروع آزمایش آبشستگی به ابتدای صفحات جلو پایه رسیده و به تدریج به قسمت داخلی آنها نفوذ کرد. با ورود جریان به فضای بین صفحات جلو پایه و شدیدتر شدن تلاطم در این ناحیه به تدریج رسوبات موجود در فضای بین صفحات و زیر طوق شسته شده و بعد از حدود 210 دقیقه از شروع آزمایش، حفره‌ی آبشستگی به قسمت جلو پایه رسید.

در این آزمایش صفحات ردیف اول تاثیری در جابه‌جایی و انتقال رسوبات نداشتند و اطراف آنها شسته نشد. میزان تاثیر صفحات ردیف دوم نیز کم بوده و مقدار کمی از رسوبات اطراف آنها شسته شد و بیشترین تاثیر در کاهش آبشستگی مربوط به صفحات ردیف سوم (جلو پایه) بود.

در مورد کاربرد توأم صفحات مستغرق و طوق در کاهش آبشستگی پایه‌ی مستطیلی با دماغه‌ی گرد می‌توان به این نکته اشاره کرد که طوق باعث کاهش قدرت جریان‌های پایین رونده در جلوی پایه (دماغه‌ی پایه) شده و همچنین مانع از جابه‌جایی رسوبات جلوی پایه و قسمت داخلی صفحات از روی آنها می‌شود و بدین ترتیب تاثیر بسزایی در کاهش آبشستگی دارد. صفحات مستغرق نیز روند شستشوی رسوبات جلو پایه را کند

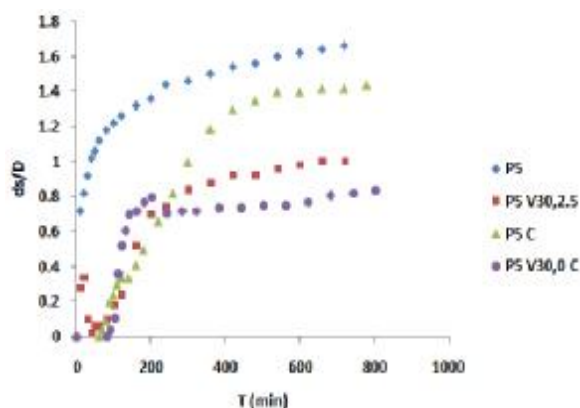
حرکت کردند. با توسعه‌ی این شیارها و نفوذ جریان به زیر طوق به تدریج رسوبات موجود در زیر طوق شسته شده و به پایین دست منتقل شد. بدین ترتیب زیر طوق خالی شده و حفره‌ی آبشستگی به قسمت جلو پایه می‌رسد. با زاویه دار شدن پایه بر شدت گرداب‌ها در اطراف پایه افزوده شده و روند توسعه‌ی حفره در اطراف طوق و پایه افزایش می‌یابد. شکل 9 توسعه‌ی فرآیند آبشستگی در اطراف پایه با زوایای مختلف را نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل مشخص است با افزایش زاویه پایه حفره‌ی آبشستگی در مدت زمان کمتری به قسمت جلو پایه می‌رسد به طوری‌که در پایه همراه با جریان بعد از 145 دقیقه، در پایه‌ی 5 درجه بعد از 59 دقیقه و در پایه‌ی 10 درجه بعد از 40 دقیقه حفره‌ی آبشستگی به قسمت جلو پایه رسید.



شکل 9 - نمودار توسعه‌ی زمانی آبشستگی پایه‌ی طوق- دار با زوایای مختلف نسبت به امتداد جریان

پایه همراه با صفحات مستغرق و طوق این مرحله از تحقیق شامل 3 آزمایش بوده (آزمایشات سری PVC) که هدف از انجام آنها بررسی تاثیر توأم صفحات مستغرق و طوق در کاهش آبشستگی پایه‌ی مستطیلی با دماغه‌ی گرد است. پایه‌ی هم‌راستا با جریان همراه با صفحات مستغرق و طوق

دقیقه از شروع آزمایش، فرآیند آبشستگی به ابتدای صفحات ردیف دوم رسید. با توجه به اینکه در این آزمایش صفحات هم‌تراز بستر هستند در شروع آزمایش تاثیر چندان در جابه‌جایی و انتقال رسوبات ندارند، اما با توسعه‌ی حفره در جلوی پایه به تدریج شروع به فعالیت کرده و سبب جابه‌جایی و انتقال رسوبات به سمت پایین دست می‌شوند. نکته‌ای که در مورد این آزمایش باید به آن اشاره کرد این است که توسعه‌ی عرضی حفره در سمت راست پایه (کم‌فشار) و اطراف صفحات سمت راست پایه نسبت به صفحات سمت چپ بیشتر است که دلیل آن شدیدتر بودن گرداب‌ها در این منطقه است (به دلیل انحراف دهانه‌ی پایه به سمت راست). عملکرد صفحات مستغرق، طوق و صفحات مستغرق همراه با طوق در شکل 11 مورد مقایسه قرار گرفته است. نتایج آزمایشات نشان دادند که در این حالت نیز بیشترین کاهش مربوط به صفحات مستغرق با طوق بوده که در حدود 49/4 درصد عمق آبشستگی را در جلو پایه کاهش داد.

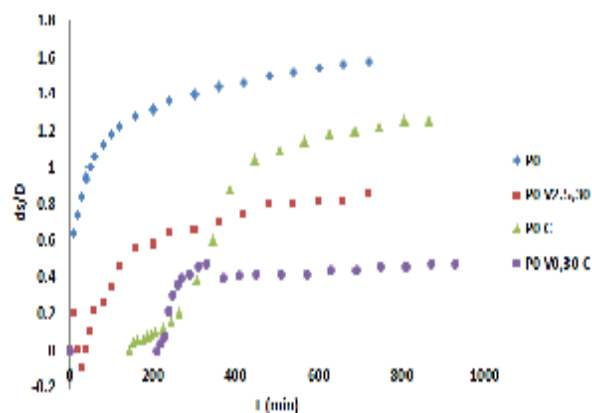


شکل 11- مقایسه‌ی عملکرد صفحات مستغرق، طوق و کاربرد توأم صفحات مستغرق و طوق در پایه با زاویه‌ی 5 درجه  
پایه با زاویه‌ی 10 درجه همراه با صفحات مستغرق و طوق

با شروع آزمایش ابتدا گرداب‌های برخاستگی در انتهای پایه و بعد از طوق مشاهده شد. هم‌زمان با فعالیت این گرداب‌ها، در سمت راست پایه (سمت کم-

کرده و رسوبات جابجا شده از قسمت بالادست را کنترل می‌کنند.

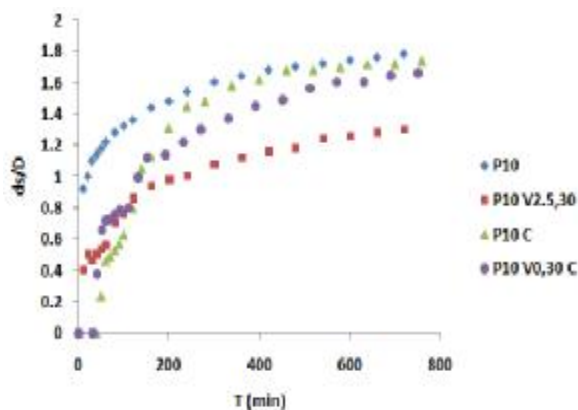
در شکل 10 عملکرد صفحات مستغرق، طوق و کاربرد توأم صفحات مستغرق و طوق برای پایه‌ی هم‌راستا با جریان مقایسه شده است. همان‌طور که در شکل مشخص است بهترین عملکرد مربوط به کاربرد توأم صفحات مستغرق و طوق است که عمق آبشستگی را در قسمت جلو پایه 69/62 درصد کاهش داد.



شکل 10- مقایسه‌ی عملکرد صفحات مستغرق، طوق و کاربرد توأم صفحات مستغرق و طوق در پایه‌ی هم‌راستا با جریان

پایه با زاویه‌ی 5 درجه همراه با صفحات مستغرق و طوق با توجه به اینکه در این آزمایش پایه با امتداد جریان زاویه‌ی 5 درجه دارد، در میانه‌ی ابتدایی دیواره‌ی سمت راست پایه (سمت کم‌فشار) به تدریج جریان‌های شیارری شروع به فعالیت کرده و توسعه پیدا کردند که دلیل آن فعالیت ضعیف گرداب‌های برخاستگی در این ناحیه است. همچنین در قسمت جلو پایه و در لبه‌ی سمت راست طوق (سمت کم‌فشار) نیز جریان‌های شیارری دیده شدند و دلیل آن نیز تلاطم بالای جریان در این منطقه است. در این حالت، آبشستگی در اطراف صفحه‌ی سمت راست جلو پایه نسبت به صفحه‌ی سمت چپ زودتر شروع شده و انتقال و جابه‌جایی رسوبات از اطراف آن سریع‌تر صورت گرفت. پس از حدود 160

ارتفاع آنها کاسته می‌شود. بعد از 140 دقیقه از شروع آزمایش نیز آبشستگی به قسمت جلو صفحات ردیف دوم رسید. در این آزمایش نیز با توجه به اینکه پایه دارای زاویه‌ی 10 درجه با امتداد جریان بود و به دلیل شدیدتر بودن گرداب‌ها در دماغه‌ی پایه، میزان توسعه-ی عرضی حفره در قسمت دیواره‌ی سمت راست (سمت کم‌فشار) و اطراف صفحات سمت راست نسبت به صفحات سمت چپ (سمت پرفشار) بیشتر بود. نکته‌ای که در مورد صفحات در پایه‌های زاویه‌دار باید اشاره کرد این است که وجود آنها باعث می‌شود که از میزان آبشستگی در سمت چپ دیواره‌ی پایه (سمت پرفشار) کاسته شود، زیرا وجود آنها مانع از تماس مستقیم جریان با دیواره‌ی سمت چپ شده که سبب کاهش سرعت جریان شده و نتیجه‌ی آن جابجایی کمتر رسوبات و توسعه‌ی عرضی کمتر حفره در این ناحیه است. در این حالت نیز بهترین عملکرد مربوط به صفحات مستغرق و طوق بود که عمق آبشستگی را در حدود 7/78 درصد در جلو پایه کاهش داد (شکل 12).



شکل 12- مقایسه‌ی عملکرد صفحات مستغرق، طوق و کاربرد توأم صفحات مستغرق و طوق در پایه‌ی 10 درجه

مقایسه با نتایج سایر محققان

نتایج حاصل از این تحقیق در زمینه‌ی زاویه‌ی صفحات با جهت جریان با نتایج لاچلان (1999) و جانسون و همکاران (2001) ( $\frac{U_*}{U_{*c}} = 0.96$ ) و ( $\frac{U_*}{U_{*c}} = 1$ ) هم

فشار) و در میانه‌ی دیواره نیز گرداب‌هایی مشاهده شد که این گرداب‌ها با جریانات شیاری لبه‌ی طوق ترکیب شده، به تدریج سبب جابه‌جایی و انتقال رسوبات به سمت پایین دست می‌شوند. با ایجاد این حفره‌ها و شیارها به تدریج جریان به زیر طوق نفوذ کرده و سبب شستشوی رسوبات به سمت پایین دست می‌شود. بعد از حدود 22 دقیقه از شروع آزمایش، توسعه‌ی حفره به ابتدای صفحه‌ی سمت راست جلو پایه رسیده، به سرعت توسعه پیدا کرد که دلیل آن افزایش تلاطم در قسمت پشت صفحات جلو پایه بود. از این لحظه به بعد، به تدریج رسوبات بین دو صفحه‌ی مستغرق جلوی پایه و زیر طوق به سمت پایین‌دست شسته شدند. پس از 31 دقیقه از شروع آزمایش، آبشستگی به قسمت جلو پایه رسید. بعد از حدود 49 دقیقه از شروع آزمایش، آبشستگی به ابتدای صفحه‌ی مستغرق سمت چپ جلو پایه رسید و به تدریج در این منطقه در حال توسعه بود. با توسعه‌ی حفره در این منطقه میزان جابه‌جایی و انتقال رسوبات از این منطقه و از قسمت زیر طوق بیشتر شد.

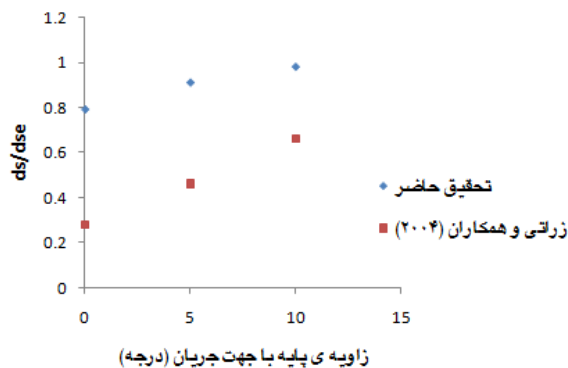
بعد از حدود 61 دقیقه از شروع آزمایش و در نتیجه‌ی توسعه حفره و جابجایی رسوبات از قسمت جلو پایه آبشستگی به قسمت انتهایی صفحه‌ی مستغرق سمت راست (سمت کم‌فشار) ردیف دوم رسید و بعد از حدود 79 دقیقه به انتهایی صفحه‌ی مستغرق سمت چپ (سمت پرفشار) ردیف دوم رسید.

لازم به ذکر است که با شروع آبشستگی در سمت راست دیواره‌ی پایه و توسعه‌ی حفره و کنده شدن رسوبات از این قسمت، مقداری از رسوبات جابه‌جا شده در میانه‌ی انتهایی دیواره‌ی پایه و قسمت انتهایی پایه در روی طوق تجمع کرده به‌طوری‌که ارتفاع رسوبات در این قسمت، از سطح بستر بالاتر قرار می‌گیرد و دلیل آن شدت کم تلاطم‌های ناشی از جریان در این ناحیه است، اما به مرور زمان این رسوبات توسط جریان شسته شده و به پایین دست منتقل می‌شوند و از

### نتیجه گیری کلی

نتایج حاصل از آزمایشات انجام شده نشان می‌دهند که با افزایش زاویه‌ی پایه بر شدت گرداب‌ها در اطراف پایه افزوده شده و عمق آبشستگی افزایش خواهد یافت. همچنین در زمینه‌ی استفاده از صفحات مستغرق نیز صفحات با ارتفاع  $2/5$  سانتیمتر روی بستر بهترین عملکرد را در کاهش آبشستگی داشتند و با کاهش ارتفاع صفحات روی بستر از عملکرد آنها کاسته می‌شود. صفحات با زاویه‌ی  $30$  درجه با جهت جریان نیز نسبت به صفحات با زاویه‌ی  $20$  درجه عملکرد بهتری را از خود نشان دادند. در آزمایشات پایه‌ی طوق‌دار نیز با افزایش زاویه‌ی پایه با جهت جریان از عملکرد طوق‌ها در کاهش عمق آبشستگی کاسته شد. در زمینه‌ی کاربرد توأم صفحات مستغرق و طوق نیز بهترین عملکرد مربوط به پایه‌ی همراستا با جریان بود که عمق آبشستگی را در حدود  $69/62$  درصد در جلو پایه کاهش داد و با افزایش زاویه‌ی پایه با جهت جریان از عملکرد آنها کاسته شد.

خوانی دارد. به طوری که بهترین عملکرد مربوط به صفحات با زاویه‌ی  $30$  درجه با جهت جریان بود. در آزمایشات با طوق نیز نتایج حاصل از این تحقیق با نتایج زراتی و همکاران (2004) ( $\frac{U_*}{U_{*c}} \equiv 1$ ) مطابقت داشت. به طوری که با افزایش زاویه‌ی پایه از عملکرد طوق کاسته شد (شکل 13).



شکل 13 - مقایسه‌ی عملکرد طوق در تحقیق حاضر با نتایج زراتی و همکاران (2004)

### منابع مورد استفاده

- زراتی الف و عزیزی م، 1380. کنترل آبشستگی در اطراف پایه‌های پل. نشریه‌ی دانشکده‌ی فنی دانشگاه تهران، جلد 35، شماره‌ی 1، صفحه‌ی 21 تا 33.
- صمیمی بهبهان ت، بارانی غ، رحیم خانی م و خانجانی م، 1385. بررسی آزمایشگاهی اثر صفحات مستغرق بر آبشستگی پایه‌ی پل‌ها. همایش ملی مدیریت شبکه‌های آبیاری و زهکشی. اردیبهشت 85. دانشکده‌ی علوم و مهندسی آب، دانشگاه شهید چمران اهواز.
- Barckdoll BD, Ettema R and Odgarrd AJ, 1999. Sediment control at lateral diversions: limits and enhancements to vane use. J Hydr Eng, ASCE 125(8): 862-870.
- Chiew YM, 1995. Mechanics of riprap failure at bridge piers. J Hydr Eng, ASCE 121(9): 635-643.
- Ghorbani B, and kells JA, 2008. Effect of submerged vanes on the scour occurring at a cylindrical pier. J Hydr Res 1(1):1-10.
- Johnson PA and Dock DA, 1998. Probabilistic bridge scour estimates. J Hydr Eng, ASCE 124(7): 750-754.
- Johnson PA and Hey RD and Tessier M and Rosgen DL, 2001. Use of vanes for control of scour at vertical wall abutments. J Hydr Eng, ASCE 127(9): 772-778.

- Kumar V, Ranga-Raju KG and Vittal N, 1999. Reduction of local scour around bridge piers using slots and collars. J Hydr Eng, ASCE 125(12):1302-1305.
- Lauchlan CS, 1999. Pier scour countermeasures. PhD Thesis, University of Auckland, New Zealand.
- Laursen EM and Toch A, 1956. Scour around bridge piers and abutments. Bull. No. 4. Iowa Highway Research Board.
- Melville BW and Coleman SE, 2000. Bridge Scour. Water Resources Publications. LLC. Colorado, U.S.A. 550p.
- Odgaard AJ and Kennedy JF, 1983. River- bend bank protection by submerged vanes. J Hydr Eng, ASCE 109: 1116-1173.
- Odgaard AJ and Wang Y, 1991. Sediment management with submerged vanes I: Theory. J Hydr Eng, ASCE 117(3): 267-283.
- Raudkivi Aj, 1990. Loose Boundary Hydraulic. third Edition, Pergamon Press, New York, USA.
- Zarrati AR, Gholami H and Mashahir MB, 2004. Application of collar to control scouring around rectangular bridge piers. J Hydr Res 42(1): 97-103.