



سازمان بنادر و دریانوردی به عنوان تنها مرجع حاکمیتی کشور در امور بندری، دریایی و کشتی رانی بازرگانی به منظور ایفای نقش مرجعیت دانشی خود و در راستای تحقق راهبردهای کلان نقشه جامع علمی کشور مبنی بر "حمایت از توسعه شبکه‌های تحقیقاتی و تسهیل انتقال و انتشار دانش و سامان‌دهی علمی" از طریق "استانداردسازی و اصلاح فرایندهای تولید، ثبت، داوری و سنجش و ایجاد بانک‌های اطلاعاتی یکپارچه برای نشریات، اختراعات و اکتشافات پژوهشگران"، اقدام به ارایه این اثر در سایت SID می‌نماید.



سازمان بنادر و دریانوردی





نهمین همایش بین المللی سواحل، بنادر و سازه های دریایی
ICOPMAS 2010
 10-8 آذر ماه (تهران)



توسعه‌ی زمانی آبخستگی اطراف پایه‌های پل مستطیلی همراه با صفحات مستغرق

سید حسین حسینی ، دانشجوی دکتری ، دانشگاه تبریز ، saied9@yahoo.com

علی حسین زاده دلیر، دانشیار، دانشگاه تبریز، ahdalir@Tabrizu.ac.ir

داود فرسادی زاده ، استادیار ، دانشگاه تبریز ، farsadi@tabrizu.ac.ir

چکیده

یکی از پدیده‌های مخرب که همواره مورد توجه مهندسين قرار داشته و آنها سعی کرده‌اند که همواره برداشت دقیقی از نحوه و میزان تخریب آن داشته باشند پدیده‌ی آبخستگی در اطراف پایه‌های پل است. محققین مختلف در سراسر دنیا همواره به بررسی این پدیده پرداخته و راهکارهای مختلفی به منظور کنترل آن و یا کند کردن توسعه‌ی آن در اطراف پایه‌های پل‌ها ارائه داده‌اند. آبخستگی فرآیندی وابسته به زمان بوده و گذشت زمان نقش مهمی را در میزان توسعه و تخریب آن ایفا می‌کند. در این تحقیق به بررسی میزان توسعه‌ی فرآیند آبخستگی در اطراف پایه‌های مستطیلی با دماغه‌ی گرد همراه با صفحات مستغرق پرداخته شد. این صفحات با ایجاد جریان‌ات ثانویه مقدار و جهت تنش برشی بستر را تغییر می‌دهند که منجر به تغییر سرعت، عمق و انتقال رسوب در منطقه‌ی مورد نظر می‌شود. آزمایشات برای پایه با زاویه‌ی 0، 5 و 10 درجه با جهت جریان و صفحات مستغرق با آرایش‌های مختلف انجام شد. در آزمایشات، صفحات مستغرق در دو زاویه‌ی 20 و 30 درجه با جهت جریان و سه ارتفاع 0، 1/25 و 2/5 سانتیمتر روی بستر نصب شدند. نتایج آزمایشات نشان داد که صفحات مستغرق علاوه بر کنترل فرآیند آبخستگی در قسمت جلو پایه، تاثیر خوبی در کنترل توسعه‌ی زمانی فرآیند آبخستگی دارند. حداکثر کاهش عمق آبخستگی برای پایه‌ی 0، 5 و 10 درجه 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.

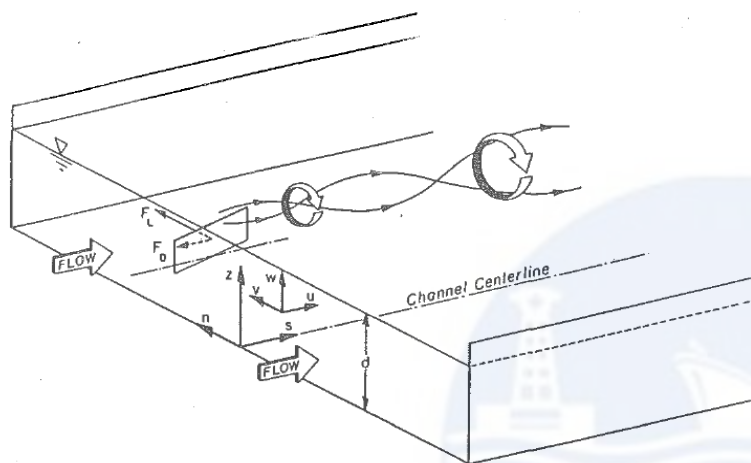
کلید واژه: آبخستگی، پایه‌ی پل، توسعه‌ی زمانی، جریان‌های ثانویه، صفحات مستغرق

مقدمه

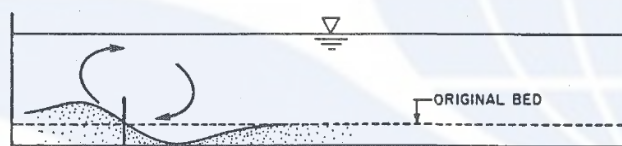
اهمیت پل‌ها در برقراری راه‌های ارتباطی بر کسی پوشیده نیست. همه ساله هزاران پل در سراسر جهان در اثر آبخستگی¹ در اطراف پایه‌های آنها تخریب می‌شود [1]. این تخریب‌ها و خسارات وارده علاوه بر تلفات جانی و ضررهای مالی، سبب قطع راه‌های ارتباطی شده که بدین ترتیب حمل و نقل را نیز مختل می‌کنند. با کنترل و محافظت از پایه‌های پل در برابر آبخستگی و ارائه‌ی روش‌های مناسب پیش‌بینی آبخستگی، می‌توان از وارد آمدن این خسارات پیش‌گیری کرد. تخمین کمتر عمق آبخستگی سبب خرابی پل شده در حالی که تخمین بیشتر عمق آبخستگی سبب صرف هزینه‌های زیادی می‌شود [2]، از این رو مطالعه و تحقیق بر روی این موضوع حائز اهمیت زیادی می‌باشد.

با وجود مطالعات تجربی و عددی فراوانی که در این زمینه توسط محققین مختلف انجام شده است، به دلیل پیچیدگی و اهمیت مسئله هنوز هم محققان زیادی در این زمینه فعالیت می‌کنند. روش‌های مختلفی برای مهار آبخستگی در اطراف پایه‌های پل‌ها ارائه شده است که به دو دسته‌ی مستقیم و غیر مستقیم تقسیم می‌شوند. در روش مستقیم به مقاومت بستر در مقابل تنش افزوده می‌شود. این کار با تعویض مصالح

اطراف پایه با مصالح مقاوم‌تر انجام می‌شود [3]. از جمله‌ی این روش‌ها می‌توان به استفاده از سنگ‌چین^۲ در اطراف پایه‌ها اشاره کرد. در روش غیر مستقیم الگوی جریان در اطراف پایه‌ها را تغییر داده و بدین ترتیب از قدرت نیروهای مخرب کاسته می‌شود [3]، که از آن جمله می‌توان به استفاده از طوق^۳ در اطراف پایه‌ها، شکاف^۴ در روی پایه، شمع‌های حفاظتی^۵ و صفحات مستغرق^۶ 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 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 صفحه بوجود می‌آید (شکل 1 و 2) [4]. هدف از این تحقیق بررسی تاثیر صفحات مستغرق در کاهش آبستگي پایه‌های مستطیلی با دماغه‌ی گرد و در سه زاویه‌ی 0، 5 و 10 درجه با امتداد جریان می‌باشد.



شکل 1) جریان القایی در اطراف صفحات مستغرق [5]



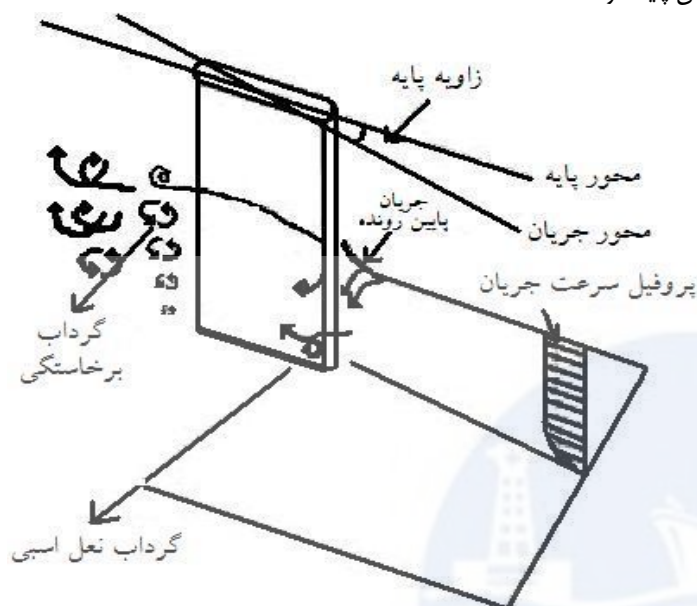
شکل 2) تغییر پروفیل بستر توسط صفحات مستغرق [5]

مکانیزم آبستگي در اطراف پایه‌های پل

براساس تحقیقات انجام شده‌ی قبلی، مکانیزم آبستگي موضعی در اطراف پایه‌ی پل بسیار پیچیده می‌باشد [6] و [7]. 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^۷ 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^۸ 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، ذرات بستر را به سمت بالا مکیده و در معرض جریان قرار می‌دهند [7]. بدین ترتیب گرداب‌های برخاستگی باعث ایجاد حفره در پایین دست پایه می‌شوند (شکل 3).

2. Riprap
3. Collar
4. Slot
5. Sacrificial piles
6. Submerged vanes
7. Horseshoe vortex
8. Wake vortex

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 برخاستگی می‌شود. محل جدایی جریان در طول پایه و تشکیل گرداب‌های برخاستگی بستگی به عدد رینولدز⁹ جریان، شکل پیشانی پایه و نسبت طول به عرض پایه دارد.



شکل 3) الگوی جریان در اطراف یک پایه‌ی مستطیلی [8]

در صورتی که 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 آبشستگی بیشتری در این سمت مشاهده می‌گردد [9]. این اختلاف در مجموع عدم تقارن در حفزه‌ی آبشستگی را بوجود می‌آورد (شکل 3).

بررسی منابع

تکنیک استفاده از صفحات مستغرق در اوایل دهه‌ی هشتاد میلادی توسط ادگار و کندی در انیستیتوی هیدرولیک دانشگاه آیووا¹⁰ به منظور حفاظت سواحل خارجی پیچ رودخانه استفاده شد [10]. بارکدل نیز با مدل کردن یک آبگیر به بررسی آزمایشگاهی استفاده از صفحات مستغرق در جلوگیری از ورود رسوبات پرداخت، نتایج آزمایشات او نشان داد که نصب صفحات در قسمت جلو آبگیر میزان رسوبات وارده به آبگیر را 70 تا 80 درصد کاهش داد [11]. لاچلان 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 و صفحات مستغرق نوع II که همانند صفحات مستغرق آیوا نسبت طول صفحه در امتداد جریان به ارتفاع آن بزرگتر از یک بود [12]. جانسون و همکاران تاثیر صفحات مستغرق را در جلوگیری از آبشستگی پایه‌های کناری پل‌ها از طریق مدل آزمایشگاهی بررسی کردند. آنها مشاهده کردند که این صفحات سرعت جریان و تنش برشی را در ساحل کاهش داده و سرعت جریان را در مرکز کانال افزایش می‌دهند [13]. صمیمی بهبهان نیز اثر شکل متفاوت صفحات را بر روی آبشستگی پل‌ها بررسی کرد. او 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 کرد [14]. قربانی و کلز 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 [15].

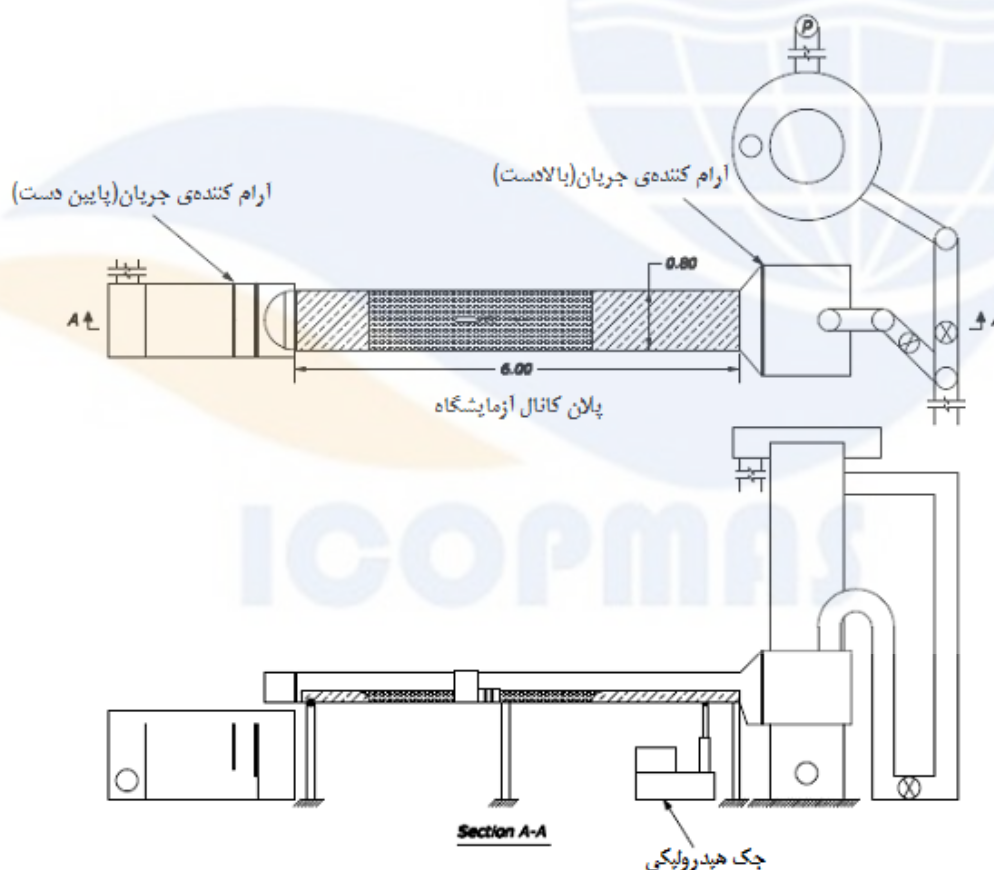
9. Reynolds number

10. Iowa Institute of Hydraulic Research

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 اندازه گیری 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. شکل 4 کانال آزمایشگاه هیدرولیک را نشان می‌دهد. 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 شده است. قسمت ابتدای کانال تا ابتدای بستر متحرک و انتهای بستر متحرک تا انتهای کانال کف کاذب را تشکیل می‌دهد که از سکوه‌های چوبی که روی آنها توسط فایبرگلاس پوشیده، تشکیل شده است. ارتفاع کف کاذب نیز 15 سانتیمتر بود. برای صاف کردن بستر نیز از یک صفحه‌ی پلاستیکی نازک استفاده شد.

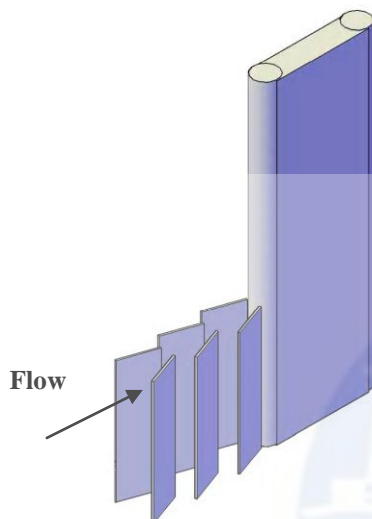
با توجه به اینکه حداکثر عمق آبستگی در شرایط آبستگی آب زلال رخ می‌دهد، آزمایشات در شرایط آب زلال ($\frac{U_*}{U_{*c}} = 0.9$) انجام شد. برای از بین بردن تاثیر دیواره‌های کانال بر آبستگی موضعی، قطر پایه نباید از 10 درصد عرض کانال بیشتر باشد. با توجه به این نکته، مدل پایه از جنس پلکسی گلاس به عرض 5 سانتیمتر و طول 25 سانتیمتر ساخته شد که از دو 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 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.



شکل 4) کانال آزمایشگاه هیدرولیک

با انجام آزمایش دانه بندی و رسم منحنی دانه بندی ذرات، d_{50} ذرات برابر 0/43 میلیمتر به دست آمد. طبق مطالعات چپو چنانچه $\frac{y}{D} > 3$ باشد (عمق جریان و D عرض پایه)، عمق جریان تاثیری بر روی عمق آبستگی ندارد [16]. در نتیجه با توجه به معیارهای فوق و محاسبه‌ی سرعت برشی و دبی جریان و در نظر گرفتن $y = 15/3$ سانتیمتر و دبی 31 لیتر بر ثانیه شرط $\frac{U_*}{U_{*c}} = 0.9$ در آزمایشات برقرار شد.

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 این صفحات $\frac{H}{L}$ برابر سه مقدار 0، $\frac{1}{6}$ و $\frac{1}{3}$ در نظر گرفته شد. تعداد صفحات مورد استفاده در آزمایشات با توجه به مطالعات لاچلان 6 عدد در نظر گرفته شد [12]. سایر پارامترها از قبیل فاصله‌ی صفحات در جهت عمود بر جهت جریان، فاصله‌ی صفحات در جهت جریان نیز با توجه به مطالعات لاچلان انتخاب شد.



شکل 5) شکل پایه‌ی مورد استفاده در آزمایشات همراه با صفحات مستغرق

آزمایشات

آزمایشات در دو سری پایه‌ی بدون حمایت و پایه همراه با صفحات مستغرق انجام شدند که آزمایشات با پایه‌ی بدون حمایت با علامت اختصاری P نشان داده می‌شوند که اندیس آن نشان دهنده‌ی زاویه‌ی پایه با امتداد جریان است و آزمایشات با پایه‌ی همراه با صفحات مستغرق با علامت اختصاری PV نشان داده می‌شوند که اندیس اول V مربوط به زاویه‌ی صفحات با امتداد جریان و اندیس دوم مربوط به ارتفاع صفحات در روی بستر است.

نتایج و بحث

آزمایش‌های مربوط به پایه‌ی بدون حمایت

پایه‌ی هم‌راستا با جریان

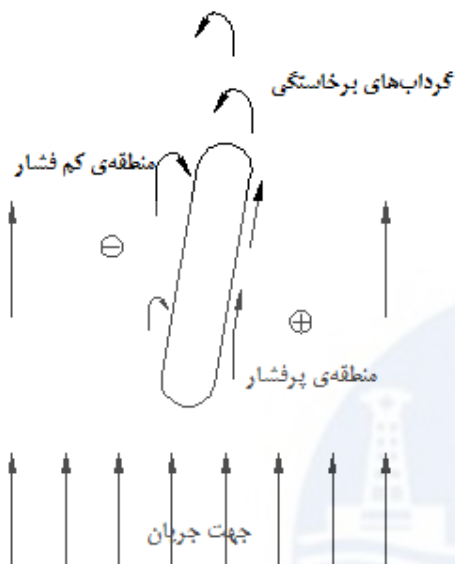
با شروع آزمایش جابه‌جایی رسوبات ابتدا در قسمت جلوی پایه و در یک ناحیه با زاویه‌ی 45 درجه نسبت به محور پایه و به مرکز نیم دایره‌ی جلو پایه دیده می‌شود. هم‌زمان با جابه‌جایی رسوبات در این منطقه در قسمت انتهایی پایه نیز گرداب‌های برخاستگی شروع به فعالیت کرده که سبب کنده شدن رسوبات از این قسمت و جابه‌جایی 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. با ادامه‌ی این فرآیند ارتفاع رسوبات در طرفین پایه و قسمت پشت پایه افزایش یافته و بالاتر از تراز بستر قرار می‌گیرد. با توسعه‌ی حفره در قسمت جلو پایه گرداب‌های نعل اسبی در جلو پایه شروع به فعالیت کرده، که با گذشت زمان بر قدرت آنها 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 به طوری که عمق 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.

پایه با زاویه‌ی 5 درجه

در این حالت نیز در شروع آزمایش توسعه‌ی حفره به شکل کمانی از دایره بوده که هم‌زمان با شروع آبشستگی در قسمت جلو پایه گرداب-

های برخاستگی در قسمت پشت پایه نیز شروع به فعالیت می‌کنند. با شروع آزمایش، در قسمتی از پایه که در تماس مستقیم با جریان نیست

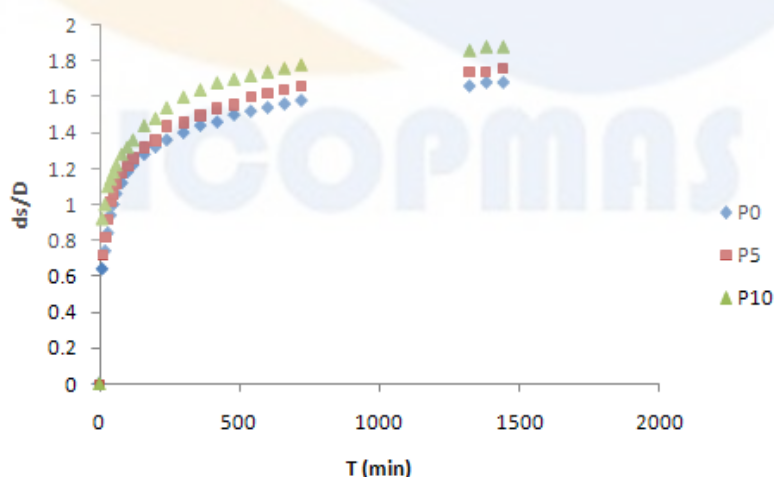
(قسمت کم فشار) در میانه‌ی انتهایی پایه نیز گرداب‌هایی در جهت عمود بر سطح بستر قابل رویت هستند که البته بسیار ضعیف می‌باشد. با گذشت زمان و توسعه‌ی حفره در قسمت جلو پایه، رسوبات جابه‌جا شده از این منطقه به طرفین پایه حرکت کرده و در آنجا تجمع می‌کنند، میزان تجمع رسوبات در سمتی که در تماس مستقیم با جریان است (سمت پرفشار) کمتر بوده و برعکس در سمت مقابل 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 آبستنگی به طرفین پایه، رسوبات تجمع یافته شسته شده و به پایین دست منتقل می‌شوند. البته لازم به ذکر است پس از مدتی از شروع آزمایش و با توسعه‌ی حفره در قسمت جلو پایه به تدریج گرداب‌های نعل اسبی شروع به فعالیت کرده که با گذشت زمان بر قدرت آنها افزوده می‌شود.



شکل 6) طرح شماتیک جریان در اطراف پایه

پایه با زاویه‌ی 10 درجه

در این حالت نیز توسعه‌ی حفره در جلو پایه به شکل کمانی از دایره بوده که هم‌زمان با توسعه‌ی حفره در قسمت جلو پایه گرداب‌های برخاستگی در قسمت انتهایی پایه نیز شروع به فعالیت می‌کنند. قدرت گرداب‌های برخاستگی در میانه‌ی انتهایی دیواره‌ی سمت کم فشار پایه نسبت به پایه با زاویه‌ی 5 درجه بیشتر بود (شکل 6). در این حالت نیز گرداب‌های نعل اسبی نقش مهمی را در توسعه‌ی حفره آبستنگی در اطراف پایه ایفا می‌کنند. در شکل زیر ds عمق آبستنگی، D عرض پایه و T زمان آزمایش را نشان می‌دهند.



شکل 7) نمودار توسعه‌ی زمانی آبستنگی پایه‌ی بدون حفاظت با زوایای مختلف

مکانیزم آبستنگی در اطراف صفحات مستغرق

در مورد صفحات مستغرق اصولاً فرآیند آبستنگی از ابتدای صفحات شروع شده و حفره‌ی کوچکی در ابتدای آنها تشکیل می‌شود که به مرور زمان این حفره بزرگ می‌شود. رسوبات جابه‌جا شده از این مناطق در فضای بین صفحات مستغرق جلو پایه جمع شده، به تدریج شسته

شده و به پایین دست منتقل می‌شوند و یا مستقیماً توسط جریان به پایین دست منتقل می‌شوند. جمع شدن رسوبات در فضای بین صفحات داخلی مستغرق نزدیک پایه باعث می‌شود فرآیند آبشستگی یا به عبارت بهتر توسعه‌ی حفره‌ی آبشستگی در جلو پایه کند شده و بدین ترتیب فرآیند آبشستگی کنترل می‌شود. فرآیند آبشستگی ابتدای صفحات و انتقال رسوبات به قسمت جلو پایه مدت زمان اندکی طول می‌کشد که در این فاصله‌ی زمانی روند توسعه‌ی آبشستگی در جلو پایه همانند پایه‌ی بدون حفاظت ولی با سرعت کمتر می‌باشد که پس از انتقال رسوبات به قسمت جلو پایه تاثیر کنترلی صفحات مستغرق نمایان می‌شود.

در مورد صفحات مستغرق که دارای ارتفاع مشخصی در روی بستر هستند، با شروع آزمایش و در اثر برخورد جریان به ابتدای صفحات، آبشستگی از لبه‌ی ابتدایی صفحات ردیف اول شروع شده و حفره‌های کوچکی در ابتدای آنها تشکیل می‌شود که به مرور زمان این حفره‌ها بزرگ می‌شود. توسعه‌ی حفره‌ی آبشستگی در ابتدای صفحات ردیف دوم همانند صفحات ردیف اول نبوده و کندتر صورت می‌گیرد زیرا مقداری از رسوبات جابجا شده از ابتدای صفحات ردیف اول که در پشت آنها تجمع یافته‌اند توسط جریان به داخل حفره‌ی ابتدای صفحات ردیف دوم منتقل شده و روند توسعه‌ی حفره در ابتدای صفحات ردیف دوم را کند می‌کند. توسعه‌ی حفره‌ی آبشستگی در ابتدای صفحات ردیف سوم (جلو پایه) نیز همانند ابتدای صفحات ردیف اول بوده زیرا با کند شدن توسعه‌ی حفره‌ی آبشستگی در ابتدای صفحات ردیف دوم میزان انتقال رسوبات به این منطقه (ابتدای صفحات ردیف سوم) بسیار کم بوده، در نتیجه روند توسعه‌ی حفره در این قسمت نسبت به ابتدای صفحات مستغرق ردیف دوم سریعتر است.

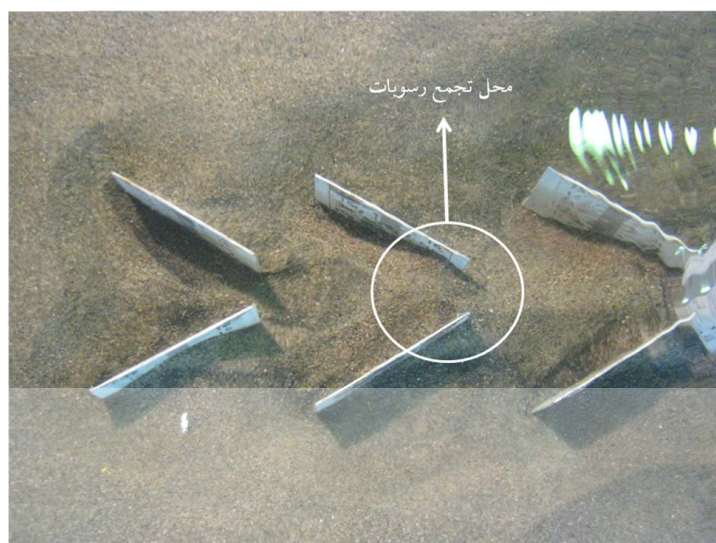
در اثر برخورد جریان آب به قسمت داخلی صفحات این منطقه تبدیل به یک منطقه‌ی پرفشار شده، در نتیجه رسوبات قسمت داخلی صفحات از بستر کنده شده و توسط جریان‌های چرخشی که در قسمت ابتدا و انتهای آنها ایجاد می‌شود به قسمت پشت صفحات که یک منطقه‌ی کم فشار بوده منتقل شده و در آنجا انباشته می‌شوند. البته چنانچه ارتفاع صفحات در روی بستر کم باشد، فشار بالای قسمت داخلی آنها سبب حرکت و جابه‌جایی رسوبات از قسمت روی آنها نیز می‌شود. آنچه که در مورد جریان‌های چرخشی ابتدا و انتهای صفحات می‌توان به آن اشاره کرد این است که جریان‌های چرخشی ابتدای صفحات نسبت به جریان‌های چرخشی انتهایی آنها قوی‌تر بوده و در نتیجه میزان جابه‌جایی رسوبات از این منطقه بیشتر است. در فضای بین دو ردیف صفحه‌ی پشت سرهم نیز جریان‌های چرخشی ابتدای یک صفحه با جریان‌های چرخشی انتهایی صفحه‌ی دیگر ترکیب شده و می‌توان مشاهده کرد که گرداب‌ها در این منطقه قوی‌تر بوده و به طبع آن جابه‌جایی رسوبات از این منطقه بیشتر است. شکل 8 طرح شماتیک جریان در اطراف صفحات مستغرق را نشان می‌دهد.



شکل 8) طرح شماتیک جریان در اطراف صفحات مستغرق

مقداری از رسوبات جابه‌جا شده از قسمت داخلی صفحات ردیف اول و دوم در قسمت پشت آنها انباشته شده که به مرور زمان توسط جریان شسته شده و به پایین دست منتقل می‌شوند. مقداری از رسوبات جابه‌جا شده مستقیماً توسط جریان شسته شده و به پایین دست منتقل می‌شوند، اما قسمت اعظم رسوبات جابه‌جا شده از قسمت داخلی صفحات ردیف اول و دوم در حفاصل بین دو لبه‌ی انتهایی صفحات ردیف دوم انباشته شده که سبب افزایش ارتفاع رسوبات در این منطقه می‌شود. این رسوبات، به مرور زمان و به تدریج شسته شده، به قسمت جلو پایه منتقل می‌شوند و روند آبشستگی در جلو پایه را کند می‌کنند (شکل 9). به عبارت بهتر می‌توان گفت که نقش صفحات ردیف اول و دوم در جابه‌جایی و انتقال رسوبات به قسمت جلو پایه بسیار برجسته بوده، درحالی‌که صفحات ردیف سوم (جلو پایه) نقش کنترلی داشته و روند

شستشوی رسوبات قسمت جلو پایه و رسوبات منتقل شده به این قسمت را کند می‌کند و بدین ترتیب فرآیند آبشستگی را تحت کنترل درمی‌آورد.

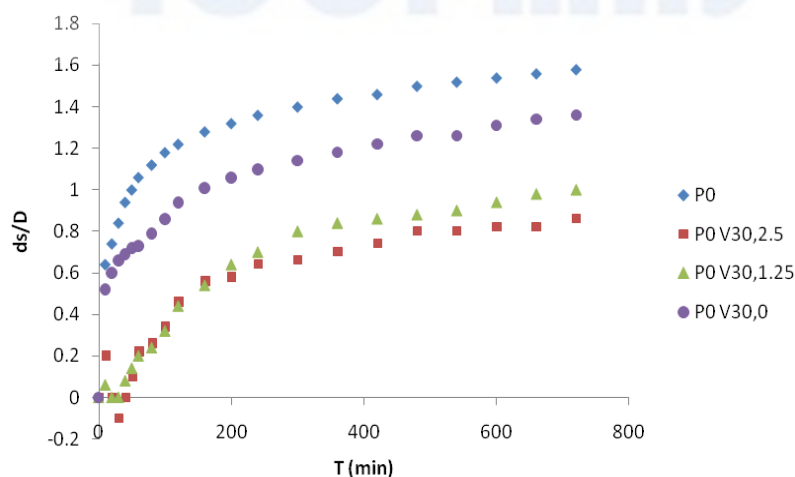


شکل 9) محل تجمع رسوبات در فضای بین صفحات مستغرق

البته در مورد صفحات هم‌تراز بستر ($H = 0$) باید به این نکته توجه کرد آبشستگی ابتدا در قسمت جلو پایه مشاهده شده که با گذشت زمان 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 نزدیک شدن به انتهای آزمایش به تدریج توسعه‌ی حفره به انتهای صفحات ردیف دوم نیز رسیده و این صفحات نیز فعالیت خود را آغاز می‌کنند.

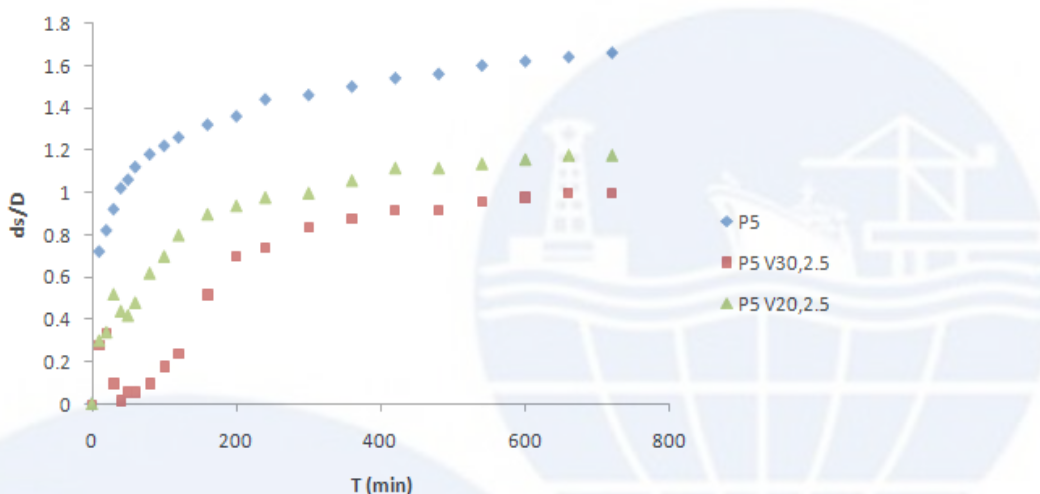
پایه‌ی هم‌راستا با امتداد جریان

در 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 شد. این رسوبات توسط گرداب‌هایی که در لبه‌های صفحات ایجاد می‌شوند به سمت پشت آنها حرکت کرده و با توجه به اینکه این منطقه یک منطقه کم فشار 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. این رسوبات به تدریج توسط جریان شسته شده و به قسمت جلو پایه منتقل شدند و بدین ترتیب روند آبشستگی را در قسمت جلو پایه تحت کنترل در آوردند (شکل 9). در آزمایشات با پایه‌ی هم‌راستا با جریان با توجه به اینکه زاویه‌ی پایه با امتداد جریان صفر است شکل حفره در اطراف صفحات و پایه متقارن است. شکل 10 روند توسعه‌ی فرآیند آبشستگی در قسمت جلوی پایه‌ی هم‌راستا با جریان را تحت شرایط مختلف آرایش صفحات مستغرق نشان می‌دهد.



شکل 10) نمودارهای توسعه‌ی زمانی آبشستگی مربوط به پایه‌ی هم‌راستا با جریان

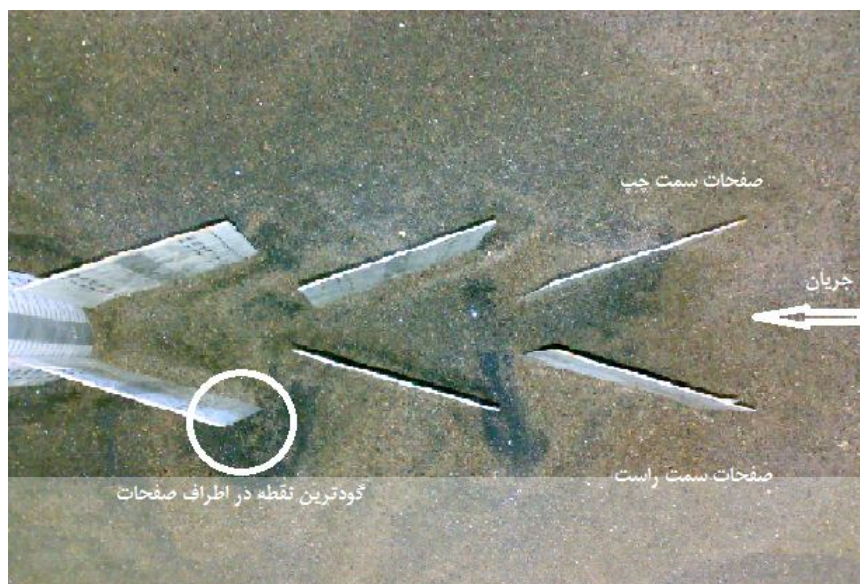
در این حالت نیز به تدریج گرداب‌های برخاستگی در قسمت پشت پایه نمایان شدند و در اثر برخورد جریان به صفحات، آبشستگی از ابتدای صفحات ردیف اول شروع شده و با توسعه‌ی حفره در این قسمت و حرکت آن به سمت داخل آن‌ها این منطقه تبدیل به یک منطقه‌ی پر فشار شده، رسوبات بستر را از این منطقه کنده، از طریق جریان‌های چرخشی ابتدا و انتهای صفحات به قسمت پشت پایه و به پایین دست منتقل می‌کند. همانند آزمایشات مربوط به پایه‌ی هم‌راستا با امتداد جریان در این حالت نیز در یک ساعت اول تجمع رسوبات در ابتدای صفحات ردیف دوم دیده شد (شکل 9) اما با توجه به اینکه در این حالت پایه دارای زاویه است و شدت گرداب‌ها در اطراف پایه در این حالت نسبت به حالت قبل بیشتر است شستشوی رسوبات سریعتر صورت می‌گیرد. با توجه به زاویه‌ی پایه شکل حفره در اطراف صفحات و پایه متقارن نبوده و میزان شستشوی رسوبات از اطراف صفحات سمت راست نسبت به صفحات سمت چپ بیشتر است بطوری که گودترین نقطه در اطراف آنها در قسمت جلو صفحه‌ی سمت راست جلو پایه اتفاق افتاد (شکل 12). همچنین میزان تجمع رسوبات در سمت راست پایه که در سمت جبهه‌ی جریان نبود (سمت کم‌فشار) بیشتر بود (شکل 6). شکل 11 روند توسعه‌ی فرآیند آبشستگی در پایه‌ی هم‌راستا با جریان و تحت شرایط مختلف را نشان می‌دهد.



شکل 11) نمودارهای توسعه‌ی زمانی آبشستگی مربوط به پایه با زاویه 5 درجه با جریان

پایه با زاویه 10 درجه با جهت جریان

با شروع آزمایش به تدریج گرداب‌های برخاستگی در قسمت پشت پایه شروع به فعالیت کرده و با برخورد جریان به صفحات فرآیند آبشستگی ابتدا در قسمت جلو آنها مشاهده شده و به تدریج با جابه‌جایی رسوبات، به سمت داخل صفحات حرکت کرده و رسوبات را از این منطقه کنده و از طریق جریان‌های چرخشی ابتدا و انتهای آنها به پایین دست و قسمت پشت آنها منتقل می‌کند. رسوبات جابه‌جا شده از اطراف صفحات ردیف اول و دوم در قسمت ابتدای صفحات ردیف دوم جمع شده و به تدریج توسط جریان به قسمت جلو پایه و پایین دست منتقل می‌شوند (شکل 9). با توجه به اینکه در این حالت پایه دارای زاویه 10 درجه با جهت جریان است انتقال رسوبات نسبت به حالت‌های قبل با سرعت و شدت بیشتری صورت می‌گیرد. همچنین با توجه به زاویه‌ی پایه شکل حفره‌ی آبشستگی در اطراف صفحات مستغرق متقارن نبوده بطوری که عمیق‌ترین نقطه در قسمت جلو صفحه‌ی سمت راست پایه مشاهده شد (شکل 12).



شکل 12) گودترین نقطه در اطراف صفحات مستغرق

جدول 1) مشخصات مربوط به آزمایشات و نتایج مربوط به آنها

شماره آزمایش	زاویه پای پایه با امتداد جریان (درجه)	تعداد صفحات	فاصله صفحات در امتداد عمود بر جریان (cm)	فاصله صفحات در امتداد جریان (cm)	زاویه صفحات با امتداد جریان (درجه)	ارتفاع صفحات روی بستر (cm)	ماکزیمم عمق آبستگي (cm)	درصد کاهش
1	0	-	-	-	-	-	7/9	-
2	5	-	-	-	-	-	8/3	-
3	10	-	-	-	-	-	9	-
4	0	6	2/5	9	20	2/5	4/8	39/24
5	0	6	2/5	9	30	2/5	4/3	45/57
6	0	6	2/5	9	30	1/25	5	36/71
7	5	6	2/5	9	20	2/5	5/9	28/92
8	5	6	2/5	9	30	2/5	5	39/76
9	5	6	2/5	9	30	1/25	5/9	28/92
10	10	6	2/5	9	20	2/5	7	22/22
11	10	6	2/5	9	30	2/5	6/5	27/78
12	10	6	2/5	9	30	1/25	8/7	3/33
13	0	6	2/5	9	30	0	6/8	13/92
14	5	6	2/5	9	30	0	8	3/61
15	10	6	2/5	9	30	0	9/3	-3/33
16	10	6	2/5	9	20	0	9/6	-6/66

نتیجه گیری

نتایج آزمایشات نشان دادند که با افزایش زاویه پای پایه بر میزان آبستگي در اطراف پایه افزوده می‌شود. در آزمایش با صفحات مستغرق بهترین عملکرد مربوط به صفحات با ارتفاع 2/5 سانتیمتر در روی بستر ($\frac{H}{L} = \frac{1}{3}$) بود و با کاهش نسبت $\frac{H}{L}$ از عملکرد صفحات کاسته شد (شکل 3، D عرض پایه و ds عمق آبستگي). همچنین بهترین عملکرد در مورد زاویه صفحات مربوط به زاویه 30 درجه بود و با کاهش زاویه صفحات از عملکرد آنها کاسته شد. با توجه به نتایج فوق مشخص می‌شود که با افزایش زاویه پای پایه از عملکرد صفحات مستغرق کاسته می‌شود به طوری که برای یک سری صفحات مستغرق با ارتفاع مشخص در روی بستر و زاویه مشخص بیشترین عملکرد

مربوط به پایه‌ی هم‌راستا با جریان بوده و با افزایش زاویه‌ی پایه از عملکرد صفحات مستغرق کاسته می‌شود. هم‌چنین در مورد کاربرد صفحات مستغرق در پایه‌های زاویه دار (5 و 10 درجه) نیز باید گفت که وجود آنها در جلو پایه سبب می‌شود که از میزان توسعه‌ی حفره در سمت دیواره‌ی سمت چپ پایه که در تماس مستقیم با جریان است (ناحیه‌ی پرفشار) کاسته شود.

مراجع

- [1]- Johnson, P. A., and dock, D. A., (1998), Probabilistic bridge scour estimates, J., Hydr., Eng., ASCE, 124(7):750-754.
- [2]- Nazariha, M., (1996), Design Relationships for Maximum Local Scour Depth for Bridge Pier Groups, Thesis presented to the university of Ottawa, Canada, in partial fulfillment of the requirements for the Degree of Doctor of Philosophy Ph.D.
- [3]- زراتی، الف، عزیززی، م، (1380)، کنترل آبشستگی در اطراف پایه های پل، نشریه ی دانشکده ی فنی دانشگاه تهران، جلد 35، شماره ی 1، خرداد ماه 1380، ص 21 تا 33.
- [4]- Wang, Y., and Odgaard, A. J., (1993), Flow control with vorticity, J., Hydr., Eng., ASCE, 31(4):549-562.
- [5]- Odgaard, A. J., and Wang, Y., (1991), Sediment management with submerged vanes I: Theory, J., Hydr., Eng., ASCE, 117(3):267-283.
- [6]- Melville, B. W., and Coleman, S. E., (2000), Bridge scour, Water Resources Publications, LLC, Clorado, U.S.A, 550p.
- [7]- Raudkivi, A. j., (1990), loose boundary hydraulic, 3rd Edition, Pergamon press.
- [8]- Zarrati, A. R., Gholami, H., and Mashahir, M. B., (2004), Application of collar to control scouring around rectangular bridge piers, J., Hydr., Res., 42(1):97-103.
- [9]- Laursen, E. M., and Toch, A., (1956), Scour around bridge piers and abutments, Bull, No. 4, Iowa Highway Research Board.
- [10]- Odgaard, A. J., and Kennedy, J. F., (1983), River- bend bank protection by submerged vanes, J., Hydr., Eng., ASCE, 109:1116-1173.
- [11]- Barckdoll, B. D., Ettema, R., and odgarrd, A. J., (1999), Sediment control at lateral diversions: limits and enhancements to vane use, J., Hydr., Eng., ASCE, 125(8):862-870.
- [12]- Lauchlan, C.S., (1999), Pier scour countermeasures, Ph.D Thesis, University of Auckland, New Zealand, pp. 299-316.
- [13]- Johnson, P.A., and Hey. R. D., and Tessier. M., and Rosgen, D. L., (2001), Use of vanes for control of scour at vertical wall abutments, J., Hydr., Eng., ASCE, 127(9):772-778.
- [14]- صمیمی بهبهان، ت، بارانی، غ، رحیم خانی، م، خانجانی، م، (1385)، بررسی آزمایشگاهی اثر صفحات مستغرق بر آبشستگی پایه‌ی پل‌ها، همایش ملی مدیریت شبکه‌های آبیاری و زهکشی، دانشگاه شهید چمران اهواز، دانشگاه علوم و مهندسی آب، اردیبهشت 85.
- [15]- Ghorbani, B., and kells, J. A., (2008), Effect of submerged vanes on the scour occurring at a cylindrical pier, J., Hydr., Res., 1(1):1-10.
- [16]- Chiew, Y. M., (1995), Mechanics of riprap failure at bridge piers, J., Hydr., Eng., ASCE, 121(9):635-643.