

## کاربرد صفحات مستغرق در کنترل آبشستگی اطراف پایه‌های پل مستطیلی با دماغه‌ی گرد

سید حسین حسینی<sup>۱\*</sup>، علی حسین زاده دلیر<sup>۲</sup>، داود فرسادی زاده<sup>۳</sup>، هادی ارونقی<sup>۴</sup> و محمد علی قربانی<sup>۵</sup>

<sup>۱</sup> دانشجوی دکتری سازه‌های آبی دانشگاه تبریز

<sup>۲</sup> دانشیار گروه مهندسی آب دانشگاه تبریز

<sup>۳</sup> دانشیار گروه مهندسی آب دانشگاه تبریز

<sup>۴</sup> استادیار گروه مهندسی آب دانشگاه تبریز

<sup>۵</sup> دانشیار گروه مهندسی آب دانشگاه تبریز

(تاریخ دریافت ۱۳۸۸/۰۷/۲۰، تاریخ دریافت روایت اصلاح شده ۱۳۸۹/۱۲/۲۲، تاریخ تصویب ۱۳۹۰/۰۵/۲۹)

### چکیده

یکی از روش‌های کاهش آبشستگی موضعی در اطراف پایه‌های پل‌ها استفاده از صفحات مستغرق است. در این تحقیق تاثیر صفحات مستغرق در کاهش آبشستگی پایه‌های مستطیلی با دماغه‌ی گرد بررسی شد. آزمایشات برای پایه با زاویه‌ی ۵، ۰ و ۱۰ درجه با جهت جریان و صفحات مستغرق با آرایش‌های مختلف انجام شد. نتایج نشان داد که با افزایش زاویه‌ی پایه با جهت جریان از تاثیر صفحات مستغرق در کاهش آبشستگی کاسته می‌شود. حداکثر کاهش آبشستگی برای پایه‌ی ۵، ۰ و ۱۰ درجه با صفحات مستغرق با ارتفاع ۲/۵ سانتیمتر در روی بستر و زاویه‌ی ۳۰ درجه با جهت جریان به ترتیب در حدود ۴۵/۵۷، ۳۹/۷۶ و ۲۷/۷۸ درصد بود.

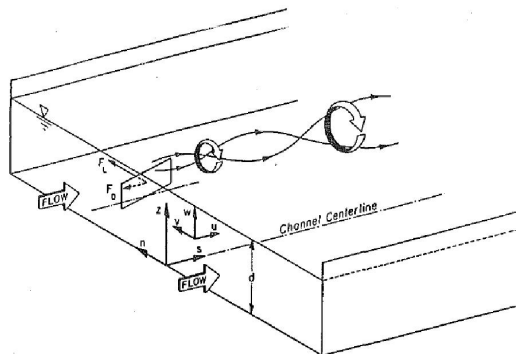
**کلید واژه‌ها:** آبشستگی، پایه‌ی پل، جریان‌های ثانویه، صفحات مستغرق، گرداب

### مقدمه

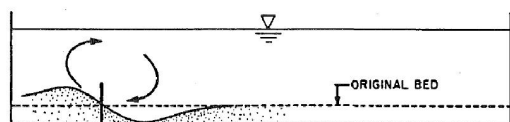
دو طرف صفحه، جریان از سمت پر فشار به طرف بالای آن و از سمت کم فشار به طرف پایین آن حرکت می‌نماید و در نتیجه گرداب و گردش القایی در اطراف پره بوجود می‌آید. (شکل ۱ و ۲) [۳]. هدف از این تحقیق بررسی تاثیر صفحات مستغرق در کاهش آبشستگی پایه‌های مستطیلی با دماغه‌ی گرد و در سه زاویه‌ی ۵، ۰ و ۱۰ درجه با امتداد جریان می‌باشد بررسی شد.

اهمیت پل‌ها در برقراری راه‌های ارتباطی بر کسی پوشیده نیست. همه ساله هزاران پل در سراسر جهان در اثر آبشستگی<sup>۱</sup> در اطراف پایه‌های آنها تخریب شود [۱]. 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 [۲]. با کنترل و محافظت از پایه‌های پل در برابر آبشستگی و ارائه‌ی روش‌های مناسب پیش بینی آبشستگی، می‌توان از وارد آمدن این خسارات پیش‌گیری کرد.

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 آبشستگی در اطراف پایه‌های پل‌ها ارائه شده است که از آن جمله می‌توان به استفاده صفحات مستغرق<sup>۲</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



شکل ۱: جریان القایی در اطراف صفحات مستغرق [۴]



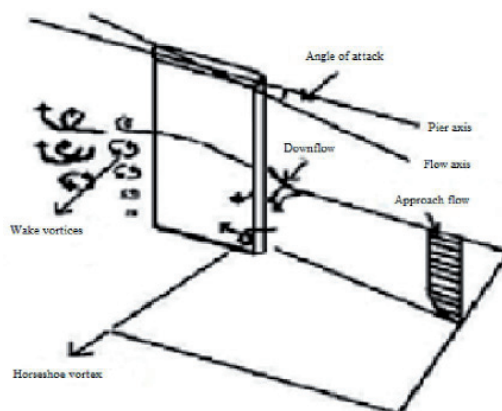
شکل ۲: تغییر پروفیل بستر توسط صفحات مستغرق [۴]

## مکانیزم آبشستگی در اطراف پایه‌های پل

بر اساس تحقیقات انجام شده قبلی، مکانیزم آبشستگی موضعی در اطراف پایه پل بسیار پیچیده می‌باشد [۵] و [۶]. 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 پایه 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>۲</sup> را شکل می‌دهد که عامل اصلی فرسایش بستر رودخانه در اطراف پایه می‌باشد. هنگامی که جریان از کناره‌های پایه پل عبور می‌کند، در طول جداره از پایه جدا شده و در پشت پایه گرداب‌های برخاستگی<sup>۴</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، ذرات بستر را به سمت بالا مکیده و در معرض جریان قرار می‌دهند [۶]. بدین ترتیب گرداب‌های برخاستگی باعث ایجاد حفره در پایین دست پایه می‌شوند (شکل ۳).

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 رینولدز<sup>۵</sup> جریان، شکل پیشانی پایه و نسبت طول به عرض پایه دارد.

در صورتی که محور طولی پایه مستطیلی با راستای عمومی جریان زاویه داشته باشد، طول بیشتری از پایه در

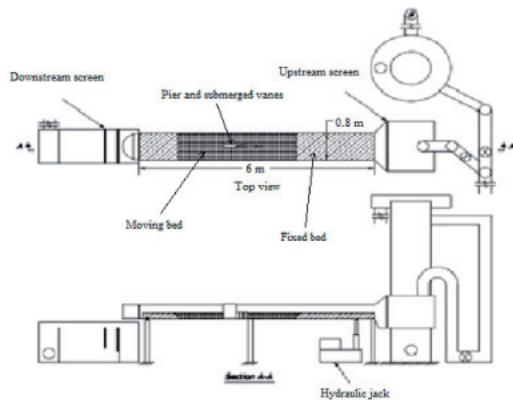


شکل ۳- الگوی جریان در اطراف یک پایه مستطیلی [۷]

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 [۸]. این اختلاف در مجموع عدم تقارن در حفره‌ی آبشستگی را بوجود می‌آورد (شکل ۳).

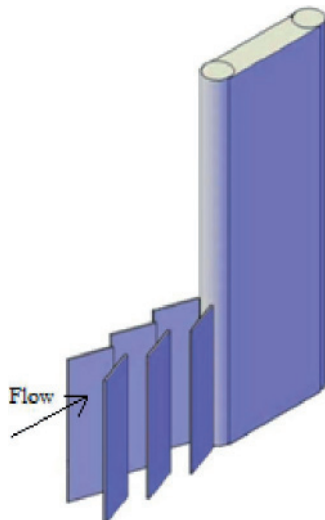
## بررسی منابع

تکنیک استفاده از صفحات مستغرق در اوایل دهه‌ی هشتاد میلادی توسط ادگارد و کندی در انیستیتیوی هیدرولیک دانشگاه آیووا<sup>۶</sup> به منظور حفاظت سواحل خارجی پیچ رودخانه استفاده شد. 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 ۷۰ تا ۸۰ درصد کاهش داد [۹]. لاجلان 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. در شرایط آب زلال  $0.96 = \frac{U_*}{U_{*c}}$  و مدت زمان آزمایشات ۲۴ ساعت بود. او آزمایشات را برای سه زاویه‌ی ۱۵، ۲۵ و ۳۵ درجه انجام داد و نتیجه گرفت با افزایش زاویه صفحات مستغرق عملکرد آنها افزایش می‌یابد. [۱۰]. 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 [۱۱]. 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 ۱۰ درجه و نیمه‌ی دوم آنها با جریان زاویه‌ی ۳۰ درجه می‌سازد را در کاهش آبشستگی پایه‌ی پل‌ها بررسی کرد. او نتیجه گرفت که استفاده از صفحات مستغرق با آرایش مختلف در حالت چسبیده به پایه بهترین عملکرد را دارد [۱۲]. قربانی



شکل ۴- کانال آزمایشگاه هیدرولیک

آن متصل هستند، تشکیل شده است و بر روی یک صفحه مستطیلی به ضخامت ۱ سانتیمتر قرار دارد. در آزمایشات مدل پایه در فاصله ۱/۶۵ متری از ابتدای بستر متحرک در داخل رسوبات قرار داده شد. شکل ۵ مدل پایه مورد استفاده در آزمایشات به همراه صفحات مستغرق را نشان می‌دهد. با انجام آزمایش دانه بندی و رسم منحنی دانه بندی ذرات،  $d_{50}$  ذرات برابر ۰/۴۳ میلیمتر به دست آمد. طبق مطالعات چپو چنانچه  $\frac{y}{D} > 3$  باشد (y عمق جریان و D عرض پایه)، عمق جریان تاثیری بر روی عمق آبستتگی ندارد [۱۴]. در نتیجه با توجه به معیارهای فوق و محاسبه سرعت برشی و دبی جریان و در نظر گرفتن  $\frac{U_*}{U_*^{*c}} = 0.9$  ۱۵ سانتیمتر و دبی ۳۱ لیتر بر ثانیه شرط  $\frac{U_*}{U_*^{*c}} = 0.9$  در آزمایشات برقرار شد. با توجه به محاسبات فوق سرعت جریان، عدد رینولدز و عدد فرود در مدل به ترتیب برابر با ۰/۲۵۳ متر بر ثانیه، ۲۸۰۸۳۰۰ و ۰/۲۴۲ بود.



شکل ۵: شکل پایه ی مورد استفاده در آزمایشات همراه با صفحات مستغرق

و گلز نیز تاثیر صفحات مستغرق منفرد و دابل را در کاهش آبستتگی پایه‌های پل از طریق مطالعه‌ی آزمایشگاهی بررسی کردند، آنها نتیجه گرفتند که استفاده از دو صفحه‌ی مستغرق نسبت به یک صفحه در کاهش عمق آبستتگی موثرتر است [۱۳]. در حالت استفاده از دو صفحه‌ی مستغرق بیشترین کاهش در عمق آبستتگی در موقعیت ۳۰ درجه نسبت به مرکز پایه و به میزان ۸۷/۷ درصد اتفاق افتاد و در حالت استفاده از یک صفحه‌ی مستغرق بیشترین کاهش در عمق آبستتگی در زاویه‌ی ۸/۵ درجه و ارتفاع صفر و به میزان ۱۷/۳ درصد اتفاق افتاد.

## 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 ۶ متر، عرض ۸۰ سانتیمتر و ارتفاع ۵۰ 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 بوسیله یک پمپ با قدرت ۱۰۰ اسب بخار از مخزن اصلی به کانال منتقل می‌شود و توسط یک دریچه‌ی کشویی در انتهای کانال عمق آب در کانال تنظیم می‌شود. شکل زیر تصویر کانال آزمایشگاه هیدرولیک را نشان می‌دهد.

کانال آزمایشگاهی به دو قسمت بستر متحرک و کف کاذب تقسیم شد. بستر متحرک از فاصله‌ی ۲ متری از ابتدای کانال شروع شده و دارای طول ۳ متر است که ارتفاع رسوبات در این قسمت ۱۵ 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 می‌دهند که از سکوه‌های چوبی که روی آنها توسط فایبرگلاس پوشیده شده است تشکیل شده‌اند. ارتفاع کف کاذب نیز ۱۵ سانتیمتر بود. برای صاف کردن بستر نیز از یک صفحه‌ی پلاستیکی نازک استفاده شد.

با توجه به اینکه حداکثر عمق آبستتگی در شرایط آبستتگی 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 آبستتگی موضعی، قطر پایه نباید از ۱۰ درصد عرض کانال بیشتر باشد. با توجه به این نکته مدل پایه از جنس پلکسی گلاس به عرض ۵ سانتیمتر و طول ۲۵ سانتیمتر ساخته شد که از دو قسمت مستطیلی به طول ۲۰ سانتیمتر و دو نیم استوانه به شعاع ۲/۵ سانتیمتر که به ابتدا و انتهای

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 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 این آزمایش پس از ۱۲ ساعت نسبت بی بعد عمق آبشستگی ( $\frac{ds}{D}$ ) برابر ۱/۵۸ شد.

#### پایه با زاویه‌ی ۵ 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 گرداب‌های برخاستگی در قسمت پایین دست پایه نیز شروع به فعالیت می‌کنند. در این حالت پایه با امتداد جریان دارای زاویه است. با شروع آزمایش، در قسمتی از پایه که در تماس با جریان نیست (سمت کم فشار) در میانه انتهای پایه گرداب‌هایی در جهت عمود بر سطح بستر قابل رویت هستند که بسیار ضعیف هستند. با گذشت زمان و توسعه حفره در قسمت جلو پایه، رسوبات جابه جا شده از این منطقه به طرفین پایه حرکت کرده و در طرفین پایه جمع می‌شوند که 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 ۶). پس از گذشت چند ساعت به تدریج با توسعه حفره آبشستگی 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 توسعه حفره در قسمت جلو پایه به تدریج گرداب‌های نعل اسبی شروع به فعالیت کرده که با گذشت زمان بر قدرت آنها افزوده می‌شود. شدت این گرداب‌ها در سمتی از دیواره‌ی پایه که در سمت جبهه‌ی جریان است (سمت پرفشار) بیشتر بوده به همین دلیل توسعه‌ی حفره و عمق حفره در این منطقه نسبت به سمت دیگر (سمت کم فشار) بیشتر است (شکل ۶). زمان تعادل این آزمایش ۴۵ ساعت بود که در حدود ۸۰

صفحات مستغرق مورد استفاده در آزمایشات نیز از جنس ورق‌های گالوانیزه به شکل مستطیل و به ضخامت ۱ میلی‌متر ساخته شدند که بر روی صفحه‌ای مستطیل شکل سوار بودند که سبب حفظ تعادل آنها می‌شد. طول این صفحات ۷/۵ سانتیمتر (۱/۵ برابر عرض پایه) در نظر گرفته شد. در آزمایشات نسبت ارتفاع صفحات به طول این صفحات  $\frac{H}{L}$  برابر سه مقدار ۰،  $\frac{1}{3}$  و  $\frac{1}{6}$  در نظر گرفته شد. تعداد صفحات مورد استفاده در آزمایشات با توجه به مطالعات لاجلان ۶ عدد در نظر گرفته شد [۸]. سایر پارامترها از قبیل فاصله‌ی صفحات در جهت عمود بر جهت جریان، فاصله‌ی صفحات در جهت جریان نیز با توجه به مطالعات لاجلان انتخاب شد.

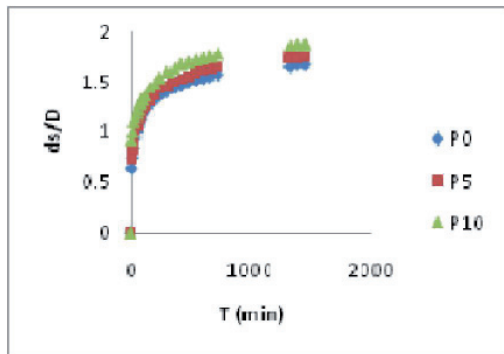
### آزمایشات

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

### نتایج و بحث

#### آزمایش‌های مربوط به پایه‌ی بدون حمایت

در شروع آزمایش‌ها تعداد سه آزمایش با پایه‌ی بدون حمایت و در زوایای صفر، ۵ و ۱۰ درجه با امتداد جریان به منظور تعیین حداکثر عمق آبشستگی انجام شد. الف- پایه هم‌راستا با جریان (زاویه صفر درجه) با شروع آزمایش جابه‌جایی رسوبات ابتدا در قسمت جلوی پایه و در یک ناحیه با زاویه ۴۵ 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 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 انتهای پایه جمع شده و تشکیل یک تل کوچک را در این منطقه می‌دهند. 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 گرداب نعل اسبی در جلو پایه شروع به فعالیت کرده، که با گذشت زمان



شکل ۷- نمودار توسعه زمانی آبستگی مربوط به پایه با زوایای مختلف

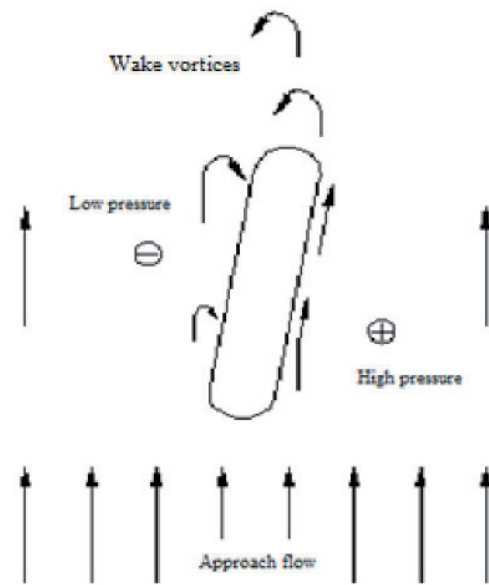
### آزمایشات با صفحات مستغرق

همانطور که قبلاً اشاره شد آزمایشات با صفحات مستغرق در سه نسبت  $\frac{H}{L}$  (۰،  $\frac{1}{6}$  و  $\frac{1}{3}$ ) و در دو زاویه‌ی ۲۰ و ۳۰ درجه با امتداد جریان انجام شدند.

### 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 آبستگی 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 آبستگی را در قسمت جلو پایه تحت کنترل در آوردند (شکل ۱۲). در آزمایشات با پایه‌ی هم‌راستا با جریان با توجه به اینکه زاویه‌ی پایه با امتداد برای پایه هم‌راستا با جریان صفر است شکل حفره در اطراف صفحات و پایه متقارن است. تعداد چهار آزمایش برای پایه هم‌راستا با جریان با صفحات مستغرق انجام شدند که مشخصات آنها در جدول ۱ ارائه شده است.

همان‌طور که در جدول ۱ مشخص است برای یک زاویه‌ی مشخص با کاهش ارتفاع صفحات در روی بستر از عملکرد آنها در کاهش آبستگی کاسته می‌شود زیرا

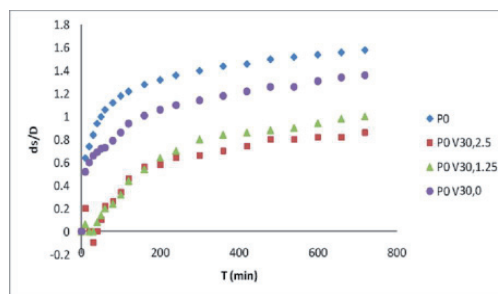
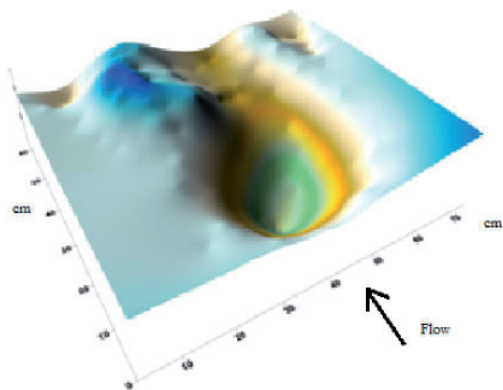


شکل ۶- طرح شماتیک جریان در اطراف پایه

درصد آبستگی در ۶ ساعت اول و ۹۰ در صد آبستگی پس از حدود ۱۲ ساعت از شروع آزمایش اتفاق افتاد. در این آزمایش نیز در پایان ساعت ۱۲ از شروع آزمایش نسبت بی بعد برابر ۱/۶۶ شد.

### پایه با زاویه‌ی ۱۰ درجه

در آزمایش با پایه‌ی ۱۰ درجه نیز توسعه‌ی حفره در جلو پایه به شکل کمائی از دایره بوده که هم‌زمان با توسعه‌ی حفره در قسمت جلو پایه گرداب‌های برخاستگی در قسمت انتهایی پایه نیز شروع به فعالیت می‌کنند. با توجه به اینکه در این حالت زاویه‌ی پایه با امتداد جریان بیشتر است در نتیجه قدرت گرداب‌های برخاستگی در میانه‌ی انتهایی دیواره‌ی سمت راست پایه (سمت کم فشار) نسبت به پایه با زاویه ۵ درجه بیشتر است (شکل ۶). پس از گذشت مدتی از شروع آزمایش و با توجه به توسعه‌ی حفره در قسمت جلو پایه به تدریج گرداب‌های نعل اسبی شروع به فعالیت می‌کنند که با گذشت زمان بر قدرت آنها افزوده می‌شود. شدت این گرداب‌ها در سمتی از دیواره‌ی پایه که در تماس مستقیم با جریان است (سمت پرفشار) بیشتر بوده به همین دلیل توسعه‌ی حفره و نهایتاً عمق حفره در این قسمت نسبت به سمت مقابل (سمت کم فشار) بیشتر است (شکل ۶). در انتهای آزمایش نیز نسبت بی بعد آبستگی برابر ۱/۸ شد. شکل ۷ نمودار توسعه‌ی زمانی آبستگی را برای پایه با سه زاویه‌ی صفر، ۵ و ۱۰ درجه پس از ۲۴ ساعت نشان می‌دهد.



شکل ۸- تأثیر ارتفاع صفحات مستغرق روی بستر برای پایه همراستا با جریان

شکل ۹- منحنی‌های هم‌عمق آبشستگی ایجاد شده در اطراف پایه ۱۰ درجه

ابتدا و انتهای صفحات به قسمت پشت پایه و به پایین دست منتقل می‌شوند. 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 ۱۲) اما با توجه به اینکه در این حالت پایه دارای زاویه است و به لحاظ شدت گرداب‌ها در اطراف پایه در این حالت نسبت به حالت قبل بیشتر است شستشوی رسوبات سریعتر آنها در قسمت جلو صفحه‌ی سمت راست جلو پایه اتفاق افتاد. همچنین میزان تجمع رسوبات در سمت راست پایه صورت می‌گیرد. با توجه به زاویه‌ی پایه شکل حفره در اطراف صفحات و پایه متقارن بوده و میزان شستشوی رسوبات از اطراف صفحات سمت راست نسبت به صفحات سمت چپ بیشتر است بطوری‌که گودترین نقطه در اطراف که در سمت جبهه‌ی جریان نبود (سمت کم‌فشار) بیشتر بود (شکل ۶). برای پایه‌ی ۵ درجه نیز تعداد چهار آزمایش انجام شد که مشخصات آنها در جدول ۲ ارائه شده است.

همان‌طور که در جدول ۲ مشخص است برای یک زاویه مشخص با کاهش ارتفاع صفحات در روی بستر از عملکرد آنها کاسته می‌شود زیرا همان‌طور که در قسمت قبل ذکر شد با کاهش ارتفاع صفحات از توانایی آنها در کنترل رسوبات جابه‌جا شده کاسته می‌شود و بدین ترتیب

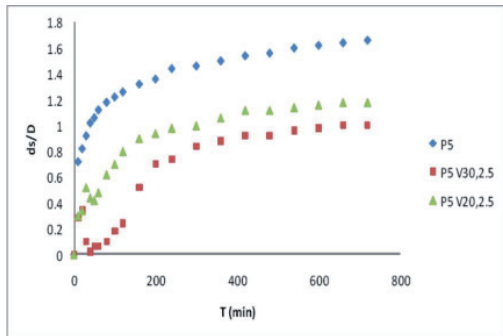
همچنین برای یک صفحه‌ی مستغرق با ارتفاع مشخص با افزایش زاویه‌ی با امتداد جریان بر عملکرد آنها افزوده می‌شود زیرا با افزایش زاویه‌ی صفحات با امتداد جریان طول موثر آنها افزایش یافته و بدین ترتیب بر میزان جابه‌جایی رسوبات توسط آنها افزوده می‌شود که نتیجه‌ی آن انتقال رسوبات بیشتر به قسمت جلو پایه و کنترل بهتر روند توسعه‌ی حفره‌ی آبشستگی است. با توجه به مطالب فوق بهترین عملکرد مربوط به صفحات مستغرق با ارتفاع ۲/۵ سانتیمتر روی بستر ( $\frac{H}{L} = \frac{1}{3}$ ) و زاویه ۳۰ درجه با امتداد جریان بود که عمق آبشستگی را در قسمت جلو پایه در حدود ۴۵/۵۷ درصد کاهش داد. شکل ۹ و ۱۰ شکل حفره آبشستگی و میزان توسعه حفره را در اطراف پایه با زاویه‌ی ۱۰ درجه با امتداد جریان نشان می‌دهد.

### پایه با زاویه ۵ درجه با امتداد جریان

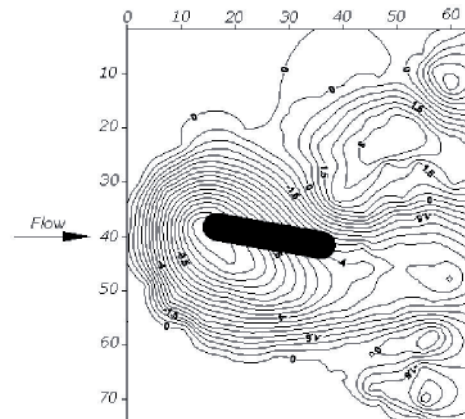
در این حالت نیز به تدریج گرداب‌های برخاستگی در قسمت پشت پایه نمایان شدند و در اثر برخورد جریان به صفحات، آبشستگی از ابتدای صفحات ردیف اول شروع شده و با توسعه حفره در این قسمت و حرکت آن به سمت داخل آنها این منطقه تبدیل به یک منطقه پر فشار شده و رسوبات بستر را از این منطقه کنده و از طریق جریان‌های چرخشی

جدول ۱- نتایج مربوط به پایه همراستا با جریان

| Scour reduction (%) | $\frac{ds}{D}$ | Height of vanes on the bed (cm) | Angle of vanes with flow direction (degree) | Distance of vanes in flow direction (cm) | Distance of vanes perpendicular to the flow (cm) |
|---------------------|----------------|---------------------------------|---|--|--|
| 39.24               | 0.96           | 2.5                             | 20  | 9  | 2.5  |
| 45.57               | 0.86           | 2.5                             | 30  | 9  | 2.5  |
| 36.71               | 1              | 1.25                            | 30  | 9  | 2.5  |
| 13.92               | 1.36           | 0                               | 30  | 9  | 2.5  |

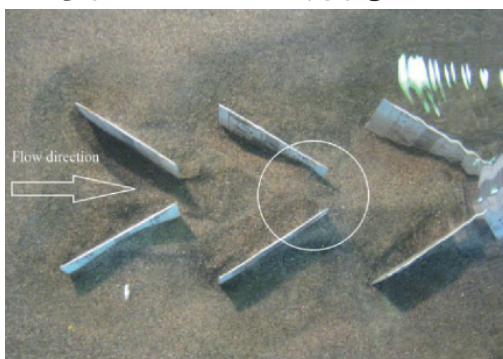


شکل ۱۱- تأثیر زاویه صفحات با امتداد جریان در کاهش آبشستگی برای پایه ۵ درجه با امتداد جریان



شکل ۱۰: خطوط کنتور دو بعدی حفره ی آبشستگی پایه با زاویه ی ۱۰ درجه

از میزان تجمع رسوبات در قسمت جلو پایه کاسته می شود. در این حالت نیز با افزایش زاویه صفحات با امتداد جریان بر عملکرد آنها در کاهش آبشستگی افزوده می شود (شکل ۱۱). در آزمایشات مربوط به پایه ۵ درجه نیز بهترین عملکرد مربوط به صفحات مستغرق با ارتفاع ۲/۵ سانتیمتر روی بستر و زاویه ۳۰ درجه با جهت جریان بود که عمق آبشستگی را در حدود ۳۹/۷۶ درصد در قسمت جلو پایه کاهش داد.



شکل ۱۲- محل تجمع رسوبات در فضای بین صفحات

قبل با سرعت و شدت بیشتری صورت می گیرد. همچنین با توجه به زاویه ی پایه شکل حفره آبشستگی در اطراف صفحات مستغرق متقارن نبوده بطوری که عمیق ترین نقطه در قسمت جلو صفحه ی سمت راست پایه مشاهده شد (شکل ۱۳). در این حالت نیز تعداد ۵ آزمایش انجام شدند که مشخصات آنها در جدول ۳ ارائه شده است.

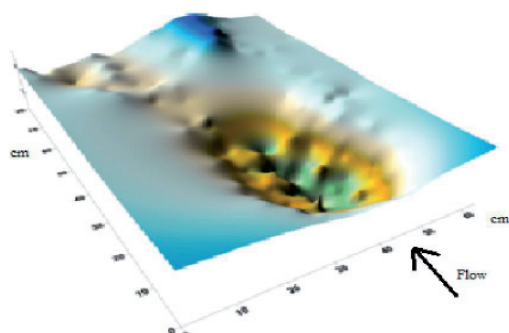
همان طور که در جدول ۳ مشخص است همانند حالت های قبل برای صفحات با زاویه ی مشخص با کاهش ارتفاع آنها در روی بستر از عملکرد آنها در کاهش آبشستگی کاسته می شود و برای صفحات با یک ارتفاع مشخص با کاهش زاویه آنها با امتداد جریان از عملکرد آنها در کاهش آبشستگی کاسته می شود. همچنین برای صفحات همتراز بستر میزان کاهش آبشستگی عددی منفی است. در این حالت در واقع شروع فرآیند آبشستگی با حالتی که صفحات

جدول ۲- نتایج مربوط به پایه ۵ درجه

| Scour reduction (%) | $\frac{ds}{D}$ | Height of vanes on the bed (cm) | Angle of vanes with flow direction (degree) | Distance of vanes in flow direction (cm) | Distance of vanes Perpendicular to the flow (cm) |
|---------------------|----------------|---------------------------------|---|--|--|
| 28.92               | 1.18           | 2.5                             | 20  | 9  | 2.5  |
| 39.76               | 1              | 2.5                             | 30  | 9  | 2.5  |
| 28.92               | 1.18           | 1.25                            | 30  | 9  | 2.5  |
| 3.61                | 1.6            | 0                               | 30  | 9  | 2.5  |

### پایه با زاویه ۱۰ درجه با جهت جریان

با شروع آزمایش به تدریج گرداب های 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 جابه جایی رسوبات، به سمت داخل صفحات حرکت کرده و رسوبات را از این منطقه کنده و از طریق جریانات چرخشی ابتدا و انتهای آنها به پایین دست و قسمت پشت آنها منتقل می کند. رسوبات جابه جا 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 می شوند (شکل ۱۲). با توجه به اینکه در این حالت پایه دارای زاویه ی ۱۰ درجه با جهت جریان است انتقال رسوبات نسبت به حالت های



شکل ۱۴: توپوگرافی حفره ی آبشستگی در آزمایش  $P_{10}V_{30, \frac{1}{3}}$

### تأثیر زاویه ی پایه بر روی عملکرد ارتفاع صفحات در روی بستر

نتایج آزمایشات انجام شده برای پایه با زوایای مختلف با صفحات به ارتفاع مشخص در روی بستر و زاویه ی ثابت با امتداد جریان نشان دادند که با افزایش زاویه ی پایه از عملکرد ارتفاع صفحات در روی بستر کاسته می شود زیرا با افزایش زاویه ی پایه بر شدت گردابها در اطراف پایه افزوده شده که نتیجه ی آن جابه جایی و انتقال بیشتر رسوبات از قسمت جلو پایه به سمت پایین دست است. شکل ۱۶ صحت نتایج فوق را تصدیق می کند.

### تأثیر زاویه پایه بر روی عملکرد زاویه صفحات با امتداد جریان

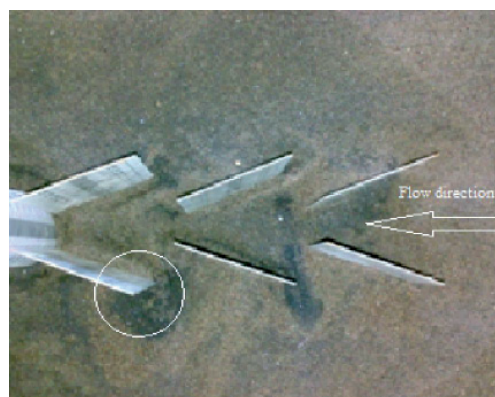
آزمایشات انجام شده برای پایه با زوایای مختلف همچنین نشان دادند که با افزایش زاویه ی پایه با امتداد جریان از عملکرد صفحات با یک زاویه ی مشخص کاسته می شود. در واقع می توان گفت که با افزایش زاویه ی پایه بر شدت گردابها در اطراف پایه افزوده شده که منجر به جابه جایی و انتقال رسوبات بیشتر و افزایش آبشستگی در اطراف پایه می شود. شکل ۱۷ نتایج ارائه شده در بالا را تأیید می کند.

### مقایسه ی نتایج با نتایج سایر محققین

نتایج به دست آمده از این تحقیق با نتایج لاجلان

جدول ۳- نتایج مربوط به پایه ۱۰ درجه

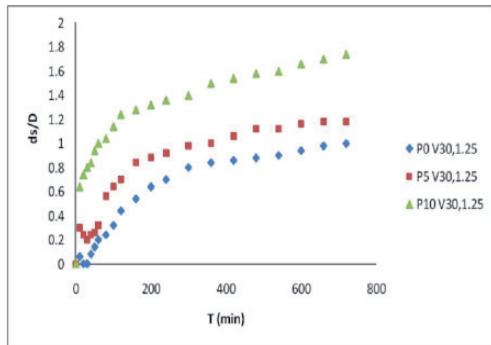
| Scour reduction (%) | $\frac{ds}{D}$ | Height of vanes on the bed (cm) | Angle of vanes with flow direction (degree) | Distance of vanes in flow direction (cm) | Distance of vanes perpendicular to the flow (cm) |
|---------------------|----------------|---------------------------------|---|--|--|
| 22.22               | 1.4            | 2.5                             | 20  | 9  | 2.5  |
| 27.78               | 1.3            | 2.5                             | 30  | 9  | 2.5  |
| 3.33                | 1.74           | 1.25                            | 30  | 9  | 2.5  |
| -3.33               | 1.86           | 0                               | 30  | 9  | 2.5  |
| -6.66               | 1.92           | 0                               | 20  | 9  | 2.5  |



شکل ۱۳: گودترین نقطه در اطراف صفحات مستغرق

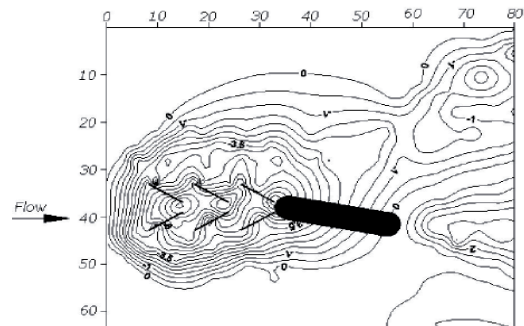
دارای ارتفاع مشخص در روی بستر هستند متفاوت بوده و می توان گفت با توجه به اینکه صفحات همتراز بستر هستند با شروع آزمایش آبشستگی ابتدا در قسمت جلو پایه مشاهده می شود و تا هنگامی که فضای بین صفحات مستغرق خالی نشود آنها تاثیری در جابجایی و کنترل رسوبات ندارند. همچنین در شروع آزمایش صفحات نقش زیادی در کنترل رسوبات اطراف پایه نداشته و با توجه به مکانیسم آنها ممکن است سبب جابه جایی بیشتر رسوبات در اطراف پایه شوند و آبشستگی را تشدید کنند که نتیجه ی آن تأثیر منفی صفحات در کاهش آبشستگی در جلو پایه است. نکته ای که در مورد استفاده از صفحات در پایه های زاویه دار باید به آن اشاره کرد این است که با کاربرد آنها در جلو پایه از میزان توسعه ی حفره در سمتی از دیواره ی پایه که در سمت جبهه ی جریان است (سمت پرفشار) کاسته شده و دلیل آن این است که صفحات مستغرق در واقع مانع از تماس مستقیم جریان با دیواره شده و از قدرت جریان نیز می کاهند (شکل ۱۰ و ۱۵). در آزمایشات مربوط به پایه ی ۱۰ درجه نیز بهترین عملکرد مربوط به صفحات با ارتفاع  $\frac{2}{5}$  سانتیمتر روی بستر و زاویه ی ۳۰ درجه بود که در حدود  $\frac{27}{78}$  درصد عمق آبشستگی را در جلو پایه کاهش داد. شکل های ۱۴ و ۱۵ توپوگرافی حفره ی آبشستگی و منحنی های هم عمق مربوط به پایه با زاویه ی ۱۰ درجه با امتداد جریان را نشان می دهند.





شکل ۱۷: نمودار مربوط به تاثیر زاویه ی پایه بر روی عملکرد زاویه ی صفحات با امتداد جریان

عملکرد در مورد زاویه ی صفحات مربوط به زاویه ۳۰ درجه بود و با کاهش زاویه صفحات از عملکرد آنها کاسته شد (شکل ۱۱). بهترین عملکرد در آزمایشات با صفحات مستغرق مربوط به صفحات با ارتفاع ۲/۵ سانتیمتر در روی بستر و زاویه ی ۳۰ درجه با امتداد جریان بود که عمق آبشستگی را برای پایه ی صفر، ۵ و ۱۰ درجه با امتداد جریان به ترتیب ۴۵/۵۷، ۳۹/۷۶ و ۲۷/۷۸ درصد کاهش دادند. با توجه به نتایج فوق مشخص می شود که با افزایش زاویه ی پایه از عملکرد صفحات مستغرق کاسته می شود به طوری که برای یک سری صفحات مستغرق با ارتفاع مشخص در روی بستر و زاویه ی مشخص بیشترین عملکرد مربوط به پایه ی هم راستا با جریان بوده و با افزایش زاویه ی پایه از عملکرد صفحات مستغرق کاسته می شود. همچنین در مورد کاربرد صفحات مستغرق در جلو پایه های زاویه دار (۵ و ۱۰ درجه) نیز باید گفت که وجود آنها در جلو پایه سبب می شود که از میزان توسعه ی حفره در سمت دیواره سمت چپ پایه که در تماس مستقیم با جریان است کاسته شود (شکل های ۶، ۱۰ و ۱۵).



شکل ۱۵: منحنی های هم عمق دوبعدی حفره در آزمایش  $P_{10} V_{30, \frac{1}{3}}$

(۱۹۹۹) در زمینه ی زاویه ی صفحات با جهت جریان مقایسه شد و مطابقت خوبی را نشان دادند. در آزمایشات لاچلان با کاهش زاویه ی صفحات با جهت جریان از عملکرد آنها کاسته شد که این نتایج در این تحقیق نیز به دست آمدند.

### نتیجه گیری

نتایج آزمایشات نشان دادند که با افزایش زاویه ی پایه بر میزان آبشستگی در اطراف پایه افزوده می شود (شکل ۷). همچنین آزمایشات نشان دادند که تکنیک صفحات مستغرق یک روش مناسب برای کاهش آبشستگی در اطراف پایه ها می باشد. در واقع این صفحات با ایجاد یک سری جریانات ثانویه چرخشی مقدار و توزیع تنش های برشی بستر، سرعت، عمق و انتقال رسوب را در منطقه ی مورد نظر تغییر می دهند. در آزمایش با صفحات مستغرق در رابطه با ارتفاع صفحات در روی بستر بهترین عملکرد مربوط به صفحات با ارتفاع ۲/۵ سانتیمتر در روی بستر ( $\frac{H}{L} = \frac{1}{3}$ ) بود و با کاهش نسبت  $\frac{H}{L}$  از عملکرد صفحات کاسته شد (شکل ۸). همچنین بهترین

### مراجع

- 1 - Johnson, P. A. and dock, D. A. (1998). "Probabilistic bridge scour estimates." J. Hydr. Eng. ASCE. 124(7):750-754.
- 2 - Zarrati, A. and Azizi, M. (2001). "Control of scouring around bridge piers." Publication of Technical college, Tehran University. Vol 35. Num 1. Pages 21-33.
- 3 - Wang, Y. and Odgaard, A. J. (1993). "Flow control with vorticity." J. Hydr. Eng. ASCE. 31(4):549-562.
- 4 - Odgaard, A. J. and Wang, Y. (1991). "Sediment management with submerged vanes I: Theory." J. Hydr. Eng. ASCE. 117(3):267-283.
- 5 - Melville, B. W. and Coleman, S. E. (2000). Bridge scour. Water Resources Publications. LLC. Clorado. U.S.A. 550p.
- 6 - Raudkivi, A. j. (1990). loose boundary hydraulic. 3rd Edition. Pergamon press.
- 7 - 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.

- 8 - Laursen, E. M. and Toch, A. (1956). "Scour around bridge piers and abutments." Bull. No. 4. Iowa Highway Research Board.
- 9 - Barckdoll, B. D. Ettema, R. and Odgaard, A. J. (1999). "Sediment control at lateral diversions: limits and enhancements to vane use." J. Hydr. Eng. ASCE. 125(8):862-870.
- 10 - Lauchlan, C.S. (1999). "Pier scour countermeasures." Ph.D Thesis. University of Auckland. New Zealand. pp. 299-316.
- 11 - 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.
- 12 - Samimiye Behbahan, T. Barani, GH. Rahim Khanli, M. and Khanjani, M. (2006). "Experimental Investigation of Submerged Vanes Effect on Scouring of Bridge Piers." National Congress of Irrigation and Drainage Networks management. Faculty of Water Sciences Engineering, Shahid Chamran University, Ahvaz, Iran.
- 13 - Ghorbani, B. and Kells, J. A. (2008). "Effect of submerged vanes on the scour occurring at a cylindrical pier." J. Hydr. Res. (1):1-10.
- 14 - Chiew, Y. M. (1995). "Mechanics of riprap failure at bridge piers." J. Hydr. Eng. ASCE. 121(9):635-643.

#### واژه‌های انگلیسی به ترتیب استفاده در متن

- 1- Scouring
- 2- Bridge pier
- 3- Submerged vanes
- 4- Vortex
- 5- Horseshoe vortex
- 6- Wake vortices