

کاربرد صفحات مستغرق در کاهش آبشستگی پایه استوانه‌ای پل‌هاپریا شجاعی¹، داود فرسادی‌زاده^{2*}، علی حسین‌زاده دلیر²، فرزین سلماسی² و محمدعلی قربانی²

تاریخ دریافت: 88/6/14 تاریخ پذیرش: 89/8/18

1- دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز

2- دانشیار، گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز

* مسئول مکاتبه: E-mail: farsadi_d@yahoo.com**چکیده**

صفحات مستغرق سازه‌های مستطیلی نازکی هستند که به لحاظ داشتن زاویه با جهت جریان ناحیه پر فشار و کم فشار در دو طرف آن‌ها ایجاد می‌شود. این سازه‌ها باعث ایجاد گرداب ثانویه و تغییر الگوی جریان در کف رودخانه و در نتیجه تغییر روند انتقال رسوب و فرسایش می‌شوند. عملکرد صفحات مستغرق برای کاهش آبشستگی پایه پل و حرکت رسوب از اطراف صفحات به علت ایجاد جریان رو به پایین در جلوی آن‌ها تحت تأثیر نحوه قرارگیری صفحات می‌باشد. در این تحقیق به منظور کاهش آبشستگی پایه پل، از صفحات مستغرق استفاده گردید. بدین منظور پایه استوانه‌ای پل به قطر 6 سانتی‌متر در کانال مستطیلی آزمایشگاه به طول 8 متر و عرض 80 سانتی‌متر در شرایط آب زلال با $u_* / u_{*c} = 0/9$ ، مدل‌سازی شد. آزمایشات با دو نسبت طول به ارتفاع روی بستر صفحات مستغرق ($L/H = 3, 2$) و همچنین هم‌تراز بستر ($H = 0$) انجام شد. صفحات مستغرق با آرایش و زوایای مختلف برخورد با جریان مورد آزمایش قرار گرفت. براساس نتایج این تحقیق در شرایط کاربرد 6 صفحه مستغرق با حالت‌های مختلف قرارگیری آن‌ها، کاهش عمق آبشستگی تا 51% حاصل شد. بیشترین کاهش آبشستگی در این حالت مربوط به قرارگیری هر ردیف صفحه مستغرق با زوایای متفاوت بود. همچنین در شرایط کاربرد 4 صفحه مستغرق، 12% کاهش عمق آبشستگی ایجاد شد. این کاهش در حالت کاربرد 2 صفحه مستغرق 5% نیز رسید. بنابراین کاربرد 6 صفحه مستغرق با زوایای متفاوت در هر ردیف بهترین وضعیت برای کاهش عمق آبشستگی پایه پل در این تحقیق بود.

واژه‌های کلیدی: آبشستگی، انتقال رسوب، پایه پل، تنش برشی، صفحات مستغرق

Application of Submerged Vanes at Cylindrical Bridge Pier as a Scour Countermeasure

P Shojaee¹, D Farsadizadeh^{2*}, A Hoseinzadeh Dalir², F Salmasi² and MA Ghorbani²

Received: 05 September 2009 Accepted: 09 November 2010

¹MSc Student, Dept. of Water Engin., Faculty of Agric., Univ. of Tabriz, Iran

²Assoc. Prof., Dept. of Water Engin, Faculty of Agric., Univ. of Tabriz, Iran

*Corresponding author: Email: farsadi_d@yahoo.com

Abstract

Vanes are rectangular thin angled flow-training structures that high and low pressure zones are produced on both sides of them. These structures generate a secondary vortex, which is used to modify the near-bed flow pattern and thus redistribute the sediment transport and erosion within the channel cross section. The function of vanes to reduce scour around the bridge piers and sediment movement in the region of vanes due to downflow in front of them are affected by arrays of the vanes. This research reports a laboratory study that examines the effectiveness of submerged vanes as pier scour protection devices. Experiments were conducted in an 8m long and 0.8m wide flume and a cylindrical pier of 6 cm diameter. Clear-water scour tests with $u_*/u_{*c}=0.9$ were performed with two different vane aspect ratios (length to height of 2 and 3), and one placed at streambed level. Dissimilar arrays of vanes with different angles to main flow direction were employed. Results showed that reduction of scour with different arrays of six vanes was 0.4% to 51%. The highest reduction occurred in the layout of each row of vanes with different angles. In the case of application of four vanes, scour depth reduced to 12%. The reduction for two vane case was 1% to 5%. Finally, application of six vanes in the layout of each row with different angles was the best case of scour reduction around the bridge piers in this research.

Key words: Bridge pier, Scouring, Sediment transport, Shear stress, Submerged vanes

مقدمه

علت این امر اولاً پیچیدگی این پدیده و گرداب‌های نامنظم به وجود آمده در اطراف پایه، ثانیاً ثابت نبودن این پدیده نسبت به زمان و تغییر شرایط مرزی و ثالثاً

مطالعه ویژگی‌های هیدرولیکی جریان در رودخانه‌ها و به ویژه محل احداث پل‌ها به علت اهمیت موضوع از دیرباز مورد توجه محققان بوده است. اکثر مطالعات انجام شده به صورت تجربی و آزمایشگاهی می‌باشد.

¹Vortex

بالتر از سطح آب قرار گرفت و به این نتیجه رسیدند که فقط صفحات مستغرق در کاهش آبشستگی مؤثر می‌باشند (لاچلان 1999).

ادگارد و وانگ (1987) نیز تعدادی آزمایش برای کاهش آبشستگی موضعی پایه پل با استفاده از صفحات مستغرق انجام دادند. آن‌ها در آزمایشات خود از ترکیب صفحات مستغرق، صفحات مدفون و طوق جهت کاهش آبشستگی پایه پل تحت شرایط بستر زنده استفاده کردند. نتایج آزمایشات آن‌ها نشان داد که بیشترین کاهش آبشستگی در حالت کاربرد صفحات مستغرق، 36 درصد می‌باشد. لاچلان (1999) به بررسی اثر صفحات مستغرق در کاهش آبشستگی پایه پل در هر دو حالت جریان آب زلال و بستر زنده پرداخت و از دو سری صفحات مستغرق متفاوت استفاده کرد. صفحه مستغرق نوع I دارای نسبت L/H (نسبت طول صفحه در امتداد جریان به ارتفاع آن) کمتر از یک بود و صفحه مستغرق نوع II همانند صفحات مستغرق آیوا دارای نسبت L/H بزرگتر از یک بودند. مقدار کاهش عمق آبشستگی در شرایط آب زلال برای صفحات نوع I به میزان حداکثر 22/6 درصد حاصل گردید. در شرایط بستر زنده برای صفحات نوع II بیشترین کاهش در عمق ماکزیم آبشستگی به میزان 8/9 درصد و در متوسط عمق آبشستگی به میزان 28/2 درصد بدست آمد. صمیمی بهبهان و همکاران (1385) با استفاده از صفحاتی با زاویه مشخص بین 10 تا 30 درجه نسبت به جهت جریان در ردیف‌های چندتایی و با آرایش خاص برای اصلاح شکل جریان نزدیک بستر، عمق آبشستگی پایه پل استوانه‌ای را کاهش داد. قربانی و کریمی (2007) به بررسی استفاده از یک صفحه مستغرق با طولی برابر قطر پایه پل دایره‌ای در جلوی پایه و همچنین به بررسی استفاده از دو صفحه مستغرق در بالادست پایه در حالت چسبیده به پایه پرداختند.

هدف از این تحقیق، بررسی تأثیر زاویه برخورد جریان با صفحات مستغرق، تعداد، ارتفاع، فواصل صفحات در جهت جریان و عمود بر جهت جریان و

وجود سه فاز مختلف آب، هوا و رسوب در این پدیده است (لاچلان 1999). تکنیک صفحات مستغرق¹ یکی از روش‌هایی است که با تغییر در رژیم حرکت بار بستر این امکان را فراهم می‌سازد تا محل رسوب گذاری و فرسایش قابل کنترل باشد. این صفحات در مقطع عرضی کانال طراحی و با زاویه کوچکی نسبت به جهت جریان به صورت عمود در بستر نصب می‌شوند (گوپتا و همکاران 2010). نقش این صفحات ایجاد چرخش ثانویه² در جریان است. جریان چرخشی ناشی از تغییرات فشار عمودی در دو طرف سطح صفحه می‌باشد. ترکیب این چرخش با سرعت در جهت جریان، سبب ایجاد حرکت مارپیچی³ در پایین‌دست صفحات شده و این حرکت مارپیچی تنش برشی عرضی در بستر رودخانه ایجاد می‌کند که منتج به انتقال رسوب در جهت عرضی می‌شود (ادگارد و وانگ 1991).

صفحات مستغرق اساساً برای حفاظت ساحل رودخانه‌ها، عمیق کردن کانال‌ها و جلوگیری از رسوبگذاری در دهانه آبرها⁴ به کار می‌روند. همچنین این صفحات در تغییر توزیع سرعت و عمق در پیچ رودخانه‌ها مؤثرند (بارانی و خانجانی 1380). وقتی صفحات در یک ردیف عرضی در کنار هم نصب می‌شوند، عرض سطح تأثیر آن‌ها در انتقال رسوب افزایش می‌یابد. نصب این ردیف صفحات در امتداد جریان و جلوی آبرگیر یا قوس رودخانه، موجب انتقال رسوب به طرف مقابل و در نتیجه تغییر وضعیت مرفولوژیک در مقطع عرضی بستر رودخانه می‌شود. بنابراین کف رودخانه در یک قسمت از مقطع عرضی بالا آمده و در قسمت دیگر فرو می‌افتد (ادگارد و اسپلجاریک 1986).

صفحات مستغرق اولین بار در اوایل سال 1930 در هند و پاکستان به نام صفحات کینگ⁵ مورد استفاده قرار گرفت. محققین در سال 1975 به بررسی عملکرد صفحات مستغرق و غیر مستغرق پرداختند. در آزمایشات آنها قسمتی از ارتفاع صفحات غیر مستغرق

¹ Submerged vanes

² Secondary circulation

³ Helical motion

⁴ Intakes

⁵ King's vanes

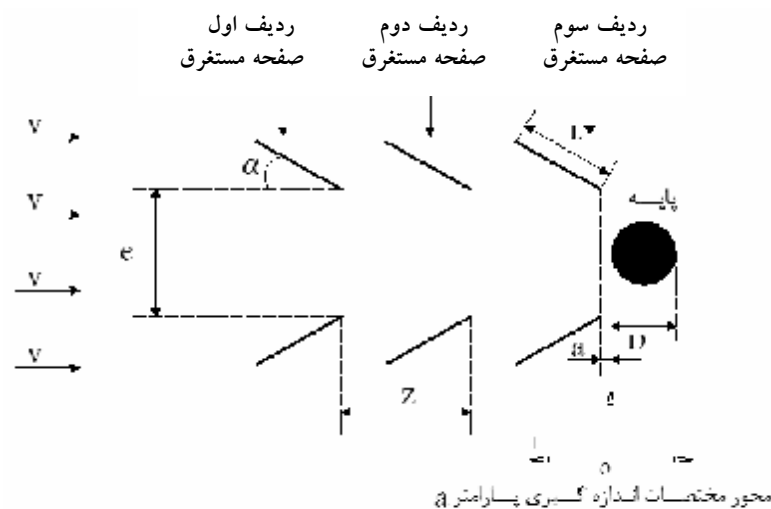
مدل صفحات مستغرق، از ورقه‌های گالوانیزه به ضخامت 1 میلی‌متر به شکل مربع مستطیل ساخته شد. طول این صفحات برابر 9 سانتی‌متر (1/5 برابر قطر پایه) و ارتفاع آن‌ها به نحوی انتخاب شد که نسبت طول صفحه در امتداد جریان به ارتفاع صفحه روی سطح بستر اولیه (L/H) برابر مقادیر 2 و 3 گردد. همچنین صفحات مستغرق با ارتفاع روی بستر صفر تحت آزمایش قرار گرفت. تعداد صفحات، نسبت L/H و زاویه صفحات با جهت جریان بر اساس مطالعات محققین قبلی (ادگارد و وانگ 1991، مارلیوس و سینها 1998، ادگارد و اسپلجاریک 1986، وانگ و همکاران 1996، جانسون و همکاران 2001، سون کیت و همکاران 2005) در محدوده کارایی مؤثر صفحات مستغرق در نظر گرفته شد. پارامترهای متغیر و نحوه قرارگیری صفحات مستغرق نسبت به پایه در جدول 1 و شکل 1 آمده است (D قطر پایه می‌باشد).

در تمام آزمایشات عمق جریان 14/7 سانتی‌متر و دبی 0/03 متر مکعب بر ثانیه، عدد رینولدز برابر $10^5 \times$ 1/09 و عدد فرود برابر 0/21 بود. عدد رینولدز برشی برابر 6/79 و بستر در شرایط بینابینی قرار داشت. عمق و سرعت آب در کانال به ترتیب با استفاده از سطح سنج با دقت 0/1 میلی‌متر و سرعت سنج میکرو با دقت

فاصله اولین ردیف صفحات تا جلوی پایه در کاهش عمق آبشستگی می‌باشد.

مواد و روش‌ها

آزمایشات در آزمایشگاه هیدرولیک گروه مهندسی آب دانشگاه تبریز که مجهز به یک کانال مستطیلی فلزی - شیشه‌ای به طول 8 متر، عرض 80 سانتی‌متر و ارتفاع 50 سانتی‌متر بود، انجام شد. کانال مجهز به یک مخزن انتهایی بود که با استفاده از سرریز مستطیلی نصب شده در آن، می‌توان دبی جریان را اندازه‌گیری کرد. آزمایشات بر اساس آبشستگی آب زلال با $u_* / u_{*c} = 0/9$ (نسبت سرعت برشی بستر به سرعت برشی آستانه حرکت ذره رسوب) انجام شد تا حداکثر عمق آبشستگی رخ دهد. زیرا بر اساس تجربه محققین در شرایط آبشستگی آب زلال، حداکثر عمق آبشستگی در حالت $0/9$ تا 1 u_* / u_{*c} رخ می‌دهد (چیو 1984). برای مدل پایه، از یک لوله استوانه‌ای شکل فولادی به قطر 6 سانتی‌متر استفاده شد. مدل پایه بر روی یک صفحه افقی متصل گردید و در فاصله 1/8 متری از ابتدای محدوده 3 متری رسوبات قرار داده شد. اندازه متوسط ذرات رسوب (d_{50}) برابر 0/43 میلی‌متر و انحراف معیار هندسی (σ_g) برابر 1/5 تعیین شد. چگالی نسبی ذرات رسوبی بستر برابر 2/64 بود.



شکل 1 - نحوه قرارگیری صفحات مستغرق و پارامترهای مربوطه

جدول 1- پارامترهای متغیر صفحات مستغرق در جلو پایه	
تعداد صفحات (n)	6، 4، 2
نسبت L/H صفحات	3، 2
زاویه برخورد جریان با صفحات (α)	30° ، 20°
فاصله صفحات در جهت جریان (z)	2D، 1/5D
فاصله صفحات عمود بر جهت جریان (e) *	2D، 1/5D، D
فاصله نزدیکترین ردیف صفحات تا پایه (a)	+0/5D، 0، -0/5D

* در آزمایشاتی که صفحات مستغرق به صورت چسبیده به پایه بررسی شدند میزان e برابر 4 و 4/5 در نظر گرفته شد.

در این رابطه زمان (t) بر حسب ساعت و عمق آبخستگی (ds) بر حسب سانتی‌متر می‌باشد. این رابطه به فرم معادلات عمق آبخستگی نسبت به زمان در مطالعه شپارد و همکاران (2004) می‌باشد. انحراف معیار و ضریب تعیین (R^2) این معادله به ترتیب برابر 0/056 و 0/99 می‌باشد. ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) معادله مذکور برابر 0/058 می‌باشد که با درجه اعتماد 0/95 از روی جدول Chi-Square در محدوده مجاز خطا قرار دارد.

آزمایشات پایه با صفحات مستغرق

در این حالت، شروع آبخستگی حول پایه همانند آبخستگی پایه بدون وین بود. اما پس از گذشت حدود 60 ثانیه (بسته به نوع چیدمان صفحات مستغرق) با بزرگ‌تر شدن دو شیار کناری پایه، روند آبخستگی تحت تأثیر صفحات مستغرق قرار گرفته و نحوه توسعه حفره آبخستگی با پایه بدون حفاظت متفاوت می‌شود. در این تحقیق عملکرد مؤثر صفحات مستغرق در کاهش عمق حفره آبخستگی جلوی پایه، توسط 4 مکانیزم توجیه می‌شود. این 4 مکانیزم عبارتند از:

1- آبخستگی ایجاد شده در اطراف صفحات مستغرق به علت زاویه دار بودن آنها با جهت جریان، باعث حرکت رسوبات از اطراف صفحات مستغرق و ته‌نشین شدن آنها در حفره آبخستگی جلوی پایه می‌شود.

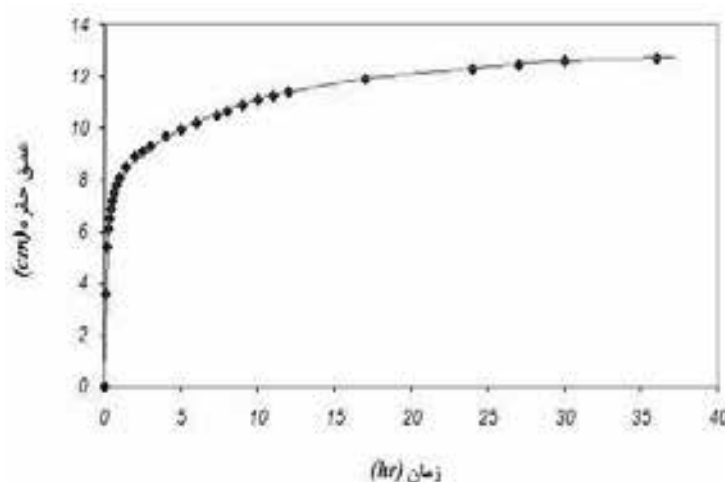
0/1 سانتی‌متر بر ثانیه اندازه‌گیری شد. معیار زمان تعادل در این تحقیق، معیار ویتال و همکاران (1994) می‌باشد. این محققین زمان تعادل آبخستگی را به صورت مدت زمانی که تغییرات در عمق آبخستگی در یک بازه زمانی 6 ساعته کمتر از 1 میلی‌متر باشد، تعریف کردند. بر این اساس آزمایشات اولیه با صفحات مستغرق تا 46 ساعت برای رسیدن به تعادل ادامه یافت. طبق نتایج بدست آمده در آزمایشات، 90 درصد عمق تعادل پس از 24 ساعت از شروع آزمایش ایجاد شد. بنابراین سایر آزمایشات به مدت 24 ساعت انجام شد و عمق حفره ایجاد شده پس از 24 ساعت در عدد 1/1 ضرب شد. آزمایش پایه تنها برای رسیدن به معیار تعادل 36 ساعت ادامه یافت.

نتایج و بحث

آزمایش پایه بدون حفاظت

شکل 2 نمودار توسعه زمانی حفره آبخستگی پایه بدون حفاظت (آزمایش A) تا زمان رسیدن به تعادل (36 ساعت) را نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل 2 مشاهده می‌شود سرعت آبخستگی در ابتدای آزمایش بسیار زیاد است به طوری که پس از 1 ساعت از شروع آزمایش (3 درصد زمان تعادل)، 64 درصد از کل آبخستگی ایجاد شد. اما با گذشت زمان تغییرات عمق حفره آبخستگی کاهش می‌یابد. معادله برازش شده به نمودار شکل 3 به صورت زیر می‌باشد.

$$ds = 8.37 \left[1 - \frac{1}{(1+9.62t)} \right] + 5.79 \left[1 - \frac{1}{(1+0.093t)} \right] \quad [1]$$



شکل 2- نمودار توسعه زمانی آبخستگی پایه بدون حفاظت

زمان رسیدن پشته از ابتدای اولین ردیف صفحات مستغرق تا حفره جلوی پایه و اندازه پشته، بستگی به پارامترهای متغیر آزمایش مانند تعداد صفحات مستغرق، فاصله صفحات مستغرق از یکدیگر در جهت جریان و عمود بر جهت جریان، زاویه قرارگیری صفحات مستغرق و ارتفاع صفحات مستغرق دارد. در این تحقیق پشته ایجاد شده در ابتدای آزمایش پس از گذشت 15 تا 85 دقیقه بسته به نوع آزمایش به جلوی پایه رسید. قبل از رسیدن پشته رسوبات به حفره آبخستگی جلوی پایه، عمق آبخستگی با گذشت زمان افزایش می‌یابد اما با رسیدن پشته، عمق حفره کاهش یافته و با انتقال رسوبات توسط گرداب نعل اسبی و جریان عمومی آب به سمت پایین دست، مدتی طول می‌کشد تا به عمق قبلی برسد. روند انتقال رسوب از جلوی صفحات مستغرق به جلوی پایه در تمام مدت آزمایش ادامه دارد اما پس از اینکه پشته ایجاد شده در ابتدای آزمایش به جلوی پایه رسید و محو شد، این روند با سرعت کمی ادامه می‌یابد به طوری که دیگر پشته‌ای شکل نگرفته و ذرات شسته شده از جلوی صفحات مستغرق بدون تشکیل پشته در روی سطح بستر حرکت کرده و درون حفره جلوی پایه ته‌نشین می‌شوند. عدم تشکیل پشته در این مرحله، به علت کاهش نرخ آبخستگی در جلوی صفحات مستغرق پس از ایجاد حفره آبخستگی می‌باشد.

همچنین به علت ایجاد ناحیه پرفشار در وجهی از صفحه مستغرق که در مقابل جریان قرار دارد و ایجاد ناحیه کم فشار در وجه دیگر آن، یک حرکت چرخشی

2- نحوه قرارگیری صفحات مستغرق در جلوی پایه، باعث هدایت رسوبات به سمت پایه و تجمع آن‌ها در جلوی پایه می‌شود.

3- به علت ایجاد چرخش ثانویه در نتیجه وجود ناحیه پرفشار و کم فشار در دو وجه وین، رسوبات در جهت عرضی جابجا شده و درون حفره آبخستگی جلوی پایه ته‌نشین می‌شوند.

4- وجود صفحات مستغرق در جلوی پایه باعث گسیخته شدن جریان نزدیک شونده و در نتیجه کاهش قدرت جریان رو به پایین و گرداب نعل اسبی جلوی پایه می‌شود.

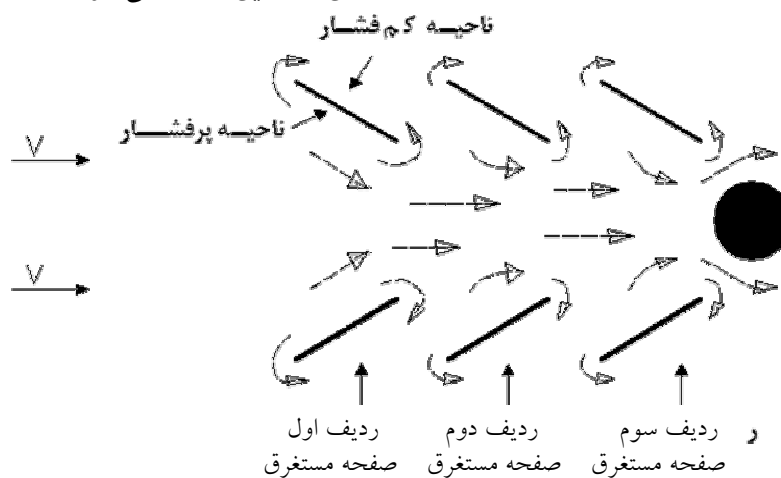
سهم هر یک از این مکانیزم‌ها در کاهش عمق حفره آبخستگی در تحقیق حاضر یکسان نمی‌باشد. مشاهدات نشان داد عملکرد اصلی صفحات مستغرق در کاهش آبخستگی پایه پل، بیشتر تحت تأثیر عوامل اول و دوم می‌باشد.

بررسی عامل اول در عملکرد صفحات مستغرق پس از برخورد آب به صفحات مستغرق، به علت ایجاد فشار دینامیک، در جلوی صفحات مستغرق جریان رو به پایین شکل گرفته و باعث جداکردن ذرات رسوب از بستر در این ناحیه می‌شود (مارلیوس و سینه‌ها 1998). رسوبات جدا شده از بستر تشکیل یک پشته داده و با سرعت کمی به سمت پایین دست و جلوی پایه حرکت می‌کنند. این رسوبات با رسیدن به حفره جلوی پایه، باعث کاهش عمق حفره آبخستگی می‌شوند. مدت

دست، اکثر ذرات رسوب واقع در جلوی صفحات مستغرق به سمت جلوی پایه حرکت می‌کنند.

بررسی عامل دوم در عملکرد صفحات مستغرق

امتداد قرارگیری ردیف صفحات مستغرق در یک راستا، باعث هدایت رسوبات شسته شده از جلوی صفحات مستغرق به سمت حفره جلوی پایه می‌شود. نحوه قرارگیری ردیف سوم صفحات مستغرق در جلوی پایه، مانع از حرکت رسوبات جلوی پایه و فرار آن‌ها از این منطقه می‌شود.



شکل 3 - حرکت رسوبات بستر در جلوی صفحات مستغرق

صفحه برداشته شده و در قسمت فشاری صفحه ته‌نشین می‌شوند. بنابراین با نصب ردیف صفحات در بستر رودخانه می‌توان رسوبات را بر روی سطح بزرگتری توزیع کرد. وقتی صفحات مستغرق در یک ردیف عرضی در کنار هم نصب می‌شوند، عرض سطح تأثیر آن‌ها در انتقال رسوب افزایش می‌یابد. با نصب این ردیف صفحات مستغرق در امتداد جریان جلوی آبگیر یا قوس رودخانه، کف رودخانه در یک قسمت از مقطع عرضی بالا آمده و در قسمت دیگر فرو می‌افتد. اما در کاربرد صفحات مستغرق جلوی پایه پل، به دلیل اینکه در هر ردیف عرضی 2 صفحه مستغرق با زوایای یکسان اما خلاف جهت یکدیگر قرار می‌گیرند، جریان مارپیچی ایجاد شده دارای قدرت کمی برای انتقال رسوب در جهت عرضی می‌باشد.

از ناحیه پرفشار به ناحیه کم فشار در دو طرف صفحه مستغرق ایجاد می‌شود. شکل 3 نحوه حرکت چرخشی اطراف صفحات مستغرق را نشان می‌دهد. جریان چرخشی در ردیف اول صفحات مستغرق، قدرت بیشتری نسبت به حرکت چرخشی در ردیف دوم و سوم دارد که این امر به دلیل محافظت ردیف دوم و سوم صفحات با وجود ردیف اول می‌باشد. این جریان چرخشی باعث دور کردن رسوبات از منطقه جلوی پایه می‌شود اما به دلیل جریان عمومی آب به سمت پایین

بررسی عامل سوم در عملکرد صفحات مستغرق

مکانیزم سوم در عملکرد صفحات مستغرق بیشتر در کاربرد ردیف این صفحات در انحنا رودخانه‌ها و محل آبگیرها خود را نشان می‌دهد. وقتی صفحات مستغرق با زاویه کمی نسبت به جهت جریان قرار می‌گیرند، جریان رو به پایین در جلوی صفحات و جریان چرخشی در کنار صفحات ایجاد می‌شود. رسوبات از منطقه پرفشار در جلوی صفحه به سمت منطقه کم فشار در پشت صفحه حرکت می‌کنند. همچنین به علت اختلاف فشار در وجهی از صفحه که مقابل جریان قرار دارد و وجه دیگر آن، یک جریان چرخشی ایجاد می‌شود. ترکیب چرخش ایجاد شده با سرعت در جهت جریان، سبب ایجاد یک حرکت مارپیچی در پایین دست صفحات شده و این حرکت مارپیچی یک تنش برشی عرضی در بستر رودخانه ایجاد می‌کند. در نتیجه حرکت چرخشی در پایین دست صفحات، رسوبات از قسمت مکشی

ناحیه به پایین دست می شود. در نتیجه عمق حفره آبشستگی اطراف صفحات مستغرق نزدیکتر به پایه، افزایش می یابد در حالی که عمق حفره آبشستگی اطراف صفحات مستغرق ردیف اول تقریباً ثابت شده است.

وجود صفحات مستغرق باعث افزایش طولی و عرضی منطقه آبشستگی جلو پایه می شود. واضح است که پشت پایه نیز تحت تأثیر صفحات مستغرق قرار گرفته و از شروع آزمایش، تشکیل پشته ها و حرکت آن به سمت پایین دست دیده می شود. در آزمایشات کاربرد صفحات مستغرق در جلوی پایه نیز همانند آزمایش پایه تنها، در ابتدای آزمایش دوشیار متقارن در دو طرف پایه و دو پشته در انتهای شیارها در کناره پایه ایجاد می شود. با گذشت زمان این پشته ها بزرگتر شده و با حرکت به سمت پایین دست در نقطه ای بر روی محور طولی کانال به هم رسیده و تشکیل یک پشته واحد را می دهند. از ابتدای آزمایش تا حدود 10 ساعت از گذشت آزمایش، شیب فرورفتگی ها و برآمدگی ها در جلو پایه زیاد است اما پس از این مدت، سطح رسوبات در جلوی پایه مسطح تر می شود که نشان دهنده به تعادل رسیدن عمق حفره آبشستگی در جلوی صفحات مستغرق می باشد. شکل 4 توپوگرافی حفره آبشستگی آزمایش C₇ را نشان می دهد. ارقام محور X و Y بر حسب سانتی متر و محور Z بر حسب میلی متر می باشد. سطح بستر در تراز 179/9 قرار دارد.

جدول 2 فهرست مدل ها و عملکرد آنها را نشان می دهد. آزمایش ها در 3 سری به نام های F, C, B انجام گرفت. آزمایش سری B آزمایشاتی با نسبت L/H برابر 2 (ارتفاع صفحات مستغرق روی بستر برابر 4/5 سانتی متر) می باشد. در سری B مدل های B₁, B₂, B₃ با 6 صفحه مستغرق و B_D با 4 صفحه مستغرق و B_E با 2 صفحه مستغرق چسبیده به پایه انجام گرفت. آزمایش سری C آزمایشاتی با نسبت L/H برابر 3 (ارتفاع صفحات مستغرق روی بستر برابر 3 سانتی متر) می باشد. این سری با 6 صفحه مستغرق در 11 مدل C₁ تا C₁₁ انجام شد. آزمایش سری F با H = 0 (ارتفاع صفحات مستغرق روی بستر برابر صفر) انجام گرفت. این سری شامل آزمایش F₁ با 2 صفحه مستغرق و آزمایش F_E با 2 صفحه مستغرق چسبیده به پایه می باشد.

بررسی عامل چهارم در عملکرد صفحات مستغرق

نصب صفحات مستغرق جلوی پایه باعث گسیخته شدن جریان نزدیک شونده و در نتیجه کاهش قدرت جریان رو به پایین و گرداب نعل اسبی جلوی پایه می شود. این اثر مشابه عملکرد شمع های حفاظتی در کاهش عمق آبشستگی می باشد. در صورتی که نسبت ارتفاع روی بستر صفحه مستغرق به طول آن زیاد باشد ($L/H < 1$)، صفحات مستغرق دارای ارتفاع کافی برای گسسته کردن جریان نزدیک شونده می باشند (لاچلان 1999). در این تحقیق، صفحات مستغرق با طول 9 سانتی متر دارای ارتفاع صفر، 3 و 4/5 سانتی متر ($L/H > 1$) از سطح بستر رسوبات هستند و وجود آنها تأثیر قابل توجهی در گسسته کردن جریان نزدیک شونده ندارد.

از ابتدای آزمایش تا گذشت حدود 10 ساعت از شروع آزمایش، عمق حفره آبشستگی ایجاد شده در جلوی صفحات مستغرق ردیف اول که از پایه دورترند، بیشتر از عمق حفره ایجاد شده در جلوی صفحات مستغرق ردیف دوم و سوم می باشد. اما پس از آن تا انتهای زمان آزمایش، عمق حفره آبشستگی برای صفحات مستغرق ردیف سوم که به پایه نزدیکترند بیشتر می شود. زیرا در ساعات اولیه آزمایش ذرات رسوب اطراف ردیف اول صفحات مستغرق با سرعت زیادی شسته شده و به سمت پایین دست و حفره جلوی پایه حرکت می کنند. در این مدت ردیف دوم و سوم صفحات مستغرق کمتر تحت تأثیر جریان عمومی آب قرار می گیرند زیرا در امتداد ردیف اول صفحات مستغرق هستند و با وجود آنها، ردیف دوم و سوم صفحات مستغرق محافظت می شوند. بنابراین جریان رو به پایین تشکیل شده بر روی صفحات مستغرق ردیف دوم و سوم قدرت کمتری نسبت به جریان رو به پایین صفحات مستغرق ردیف اول دارد و رسوبات کمتری از اطراف آنها شسته می شوند. اما پس از گذشت حدود 10 ساعت از شروع آزمایش، حفره ایجاد شده در ردیف اول صفحات مستغرق تقریباً به حالت تعادل رسیده و عمق آن نسبتاً ثابت می شود. درحالی که به علت جریان رو به پایین و گرداب نعل اسبی مقابل و کناره های پایه، در اطراف صفحات مستغرق ردیف سوم، همچنان آبشستگی ادامه می یابد و باعث انتقال رسوبات این



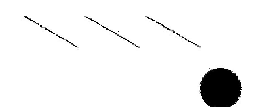






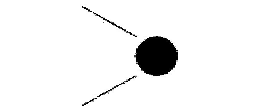


شکل 4 - توپوگرافی حفره آبخستگی آزمایش C₇

جدول 2 - فهرست آزمایشات و عملکرد آنها در کاهش عمق آبخستگی

کاهش آبخستگی	a	e	z	α	n	H	L/H	نحوه قرارگیری	مدل
%19	0	6	12	30°	6	4/5	2		B ₁
%17	0	12	12	30°	6	4/5	2		B ₂
%0/4	0	12	12	20°	6	4/5	2		B ₃
%12	0	12	12	30°	4	4/5	2		B _D
-%13	چسبیده	4/5	-	30°	2	4/5	2		B _E
%24	0	12	12	30°	6	3	3		C ₁
%28	0	6	12	30°	6	3	3		C ₂
%23	چسبیده	4	12	20°	6	3	3		C ₃

ادامه جدول 2-

%25	چسبیده	4/5	12	30°	6	3	3		C ₄
%37	0	6	9	30°	6	3	3		C ₅
%27	0	12	9	30°	6	3	3		C ₆
%21	+3	6	9	30°	6	3	3		C ₇
%45	-3	9	12	30°	6	3	3		C ₈
%25	0	9	12	30°	6	3	3		C ₉
%51	0	6	9	30°, 20° 35°	6	3	3		C ₁₀
%36	-3	9	9	30°, 20° 35°	6	3	3		C ₁₁
%5	0	6	-	30°	2	0	-		F ₁
%1	چسبیده	4/5	-	30°	2	0	-		F _E

فاصل بر حسب سانتی متر می باشند. پارامترهای متغیر جدول 2 در شکل 1 مشاهده می شود.

آنها شکل می گیرد. این جریان باعث ایجاد حفره آبستگی در جلوی صفحات مستغرق می شود. با افزایش ارتفاع روی بستر صفحه مستغرق، جریان بیشتری با آن برخورد کرده و طبعاً قدرت جریان رو به پایین ایجاد شده بیشتر است و توانایی بیشتری برای

تأثیر ارتفاع روی بستر صفحه مستغرق (H)

وقتی صفحات مستغرق با داشتن ارتفاعی از سطح بستر به صورت یک مانع در برابر جریان قرار گرفته باشند، پس از برخورد جریان عمومی آب به آنها، به علت ایجاد فشار دینامیک، جریان رو به پایین در جلوی

B₂ به ترتیب برابر 0/06 و 0/99 می‌باشد و همچنین انحراف معیار و ضریب تعیین (R²) معادله B₃ به ترتیب برابر 0/05 و 0/99 می‌باشد. ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) معادله B₂ برابر 0/06 و معادله B₃ برابر 0/045 می‌باشد که با درجه اعتماد 0/95 از روی جدول Chi-Square در محدوده مجاز خطا قرار دارد.

تأثیر زاویه صفحه مستغرق با جهت جریان (α) با افزایش زاویه قرارگیری صفحه مستغرق نسبت به جهت جریان، ناحیه عرضی بیشتری تحت تأثیر صفحه مستغرق قرار گرفته و طبیعتاً رسوبات بیشتری به جلوی پایه و پایین دست حرکت می‌کنند. این رسوبات با پرکردن حفره آبشستگی جلوی پایه باعث کاهش عمق آبشستگی می‌شوند. بهبود عملکرد صفحه مستغرق با افزایش زاویه برخورد جریان با مقایسه نمودارهای B₃ و B₂ در شکل 5 و مقایسه نمودارهای C₃ و C₄ در شکل 8 مشاهده می‌شود. این نمودارها برای مدت زمان 24 ساعت که 90% عمق تعادل آبشستگی رخ می‌دهد ارائه شده‌اند. یکسان نبودن زاویه برخورد جریان به صفحات مستغرق در هر ردیف موجب افزایش کارایی آن‌ها در کاهش آبشستگی جلوی پایه می‌شود. در آزمایش C₁₀ ردیف اول صفحات مستغرق با زاویه 35°، ردیف دوم 30° و ردیف سوم 20° قرار داده شده‌اند. زاویه زیاد ردیف اول باعث ایجاد آبشستگی زیادی در جلوی صفحات مستغرق در این ردیف شده و ذرات رسوب جدا شده از بستر به سمت جلوی پایه حرکت می‌کنند. از طرفی زاویه کمتر صفحات مستغرق در ردیف‌های دوم و سوم نسبت به ردیف اول باعث می‌شود در مقابل جریان نزدیک شونده حفاظت شده و آبشستگی کمتری در این ردیف از صفحات مستغرق رخ دهد. در این حالت رسوبات کمتری به دلیل وجود ناحیه پر فشار و کم فشار در دو طرف صفحه مستغرق با حرکت چرخشی از کناره‌های صفحه مستغرق ردیف سوم به سمت پایین دست حرکت می‌کنند. در نتیجه رسوبات در جلوی پایه تجمع یافته و عمق آبشستگی کاهش زیادی نشان می‌دهد (شکل 9).

ایجاد حفره آبشستگی در جلوی صفحه مستغرق دارد. بنابراین آبشستگی زیادی در اطراف صفحات مستغرق در جلوی پایه ایجاد می‌شود که باعث کاهش عملکرد صفحه مستغرق در کاهش آبشستگی جلوی پایه می‌شود. مقایسه نمودارهای سری B و C در شکل‌های 5 و 6 این وضعیت را نشان می‌دهد. در حالتی که ارتفاع صفحه مستغرق روی سطح بستر صفر باشد، جریان عمومی آب بدون حضور مانعی بر روی سطح رسوبات حرکت کرده و ذرات بستر بالادست در جای خود ثابت مانده و حفره آبشستگی جلو پایه همانند آبشستگی پایه بدون صفحه مستغرق توسعه می‌یابد. بدین ترتیب با وارد نشدن ذرات رسوب از بالادست به درون حفره آبشستگی جلوی پایه عمق آبشستگی افزایش بیشتری نسبت به آزمایشاتی که صفحه مستغرق دارای ارتفاعی بر روی بستر می‌باشد، دارد (شکل 7).

معادلات برازش شده به نمودار آزمایشات کاربرد صفحات مستغرق در جلوی پایه به دو فرم بدست آمد. این دو فرم برای آزمایشات B₁ و B₂ و B₃ در زیر آورده شده است. در این روابط زمان بر حسب ساعت در محدوده 0 تا 24 ساعت در نظر گرفته شده است. آزمایش B₁:

$$ds/D = a[1 - \exp(-bt)] + c[1 - \exp(-dt)] \quad [2]$$

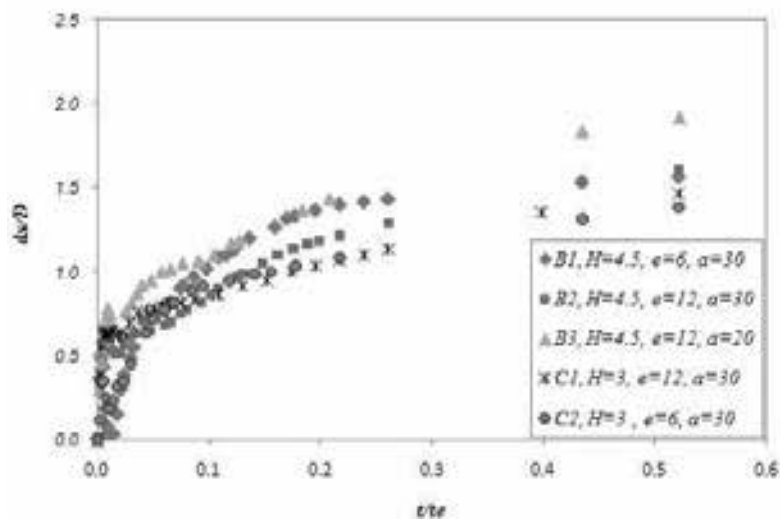
ضرایب ثابت این رابطه عبارتند از:

$a=0.36$, $b=0.047$, $c=1.32$, $d=0.296$. انحراف معیار و ضریب تعیین (R²) این معادله به ترتیب برابر 0/13 و 0/97 می‌باشد. ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) معادله مذکور برابر 0/126 می‌باشد که با درجه اعتماد 0/95 از روی جدول Chi-Square در محدوده مجاز خطا قرار دارد.

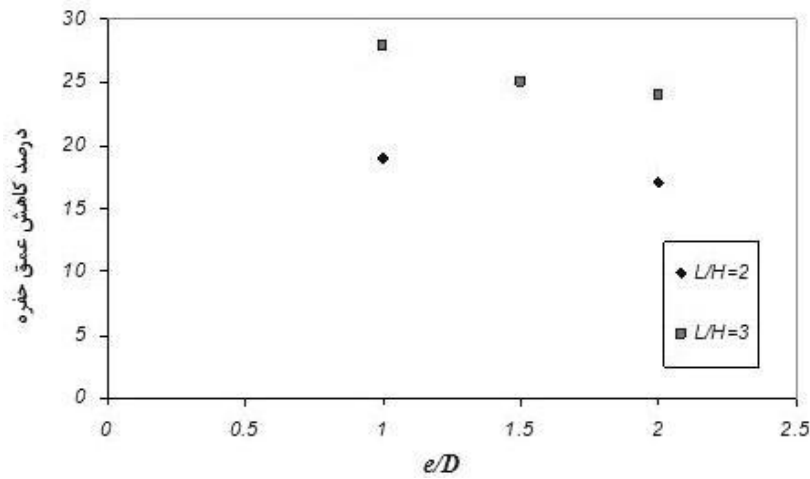
آزمایش B₂ و B₃:

$$ds/D = a \left[1 - \frac{1}{(1+abt)} \right] + c \left[1 - \frac{1}{(1+cdt)} \right] \quad [3]$$

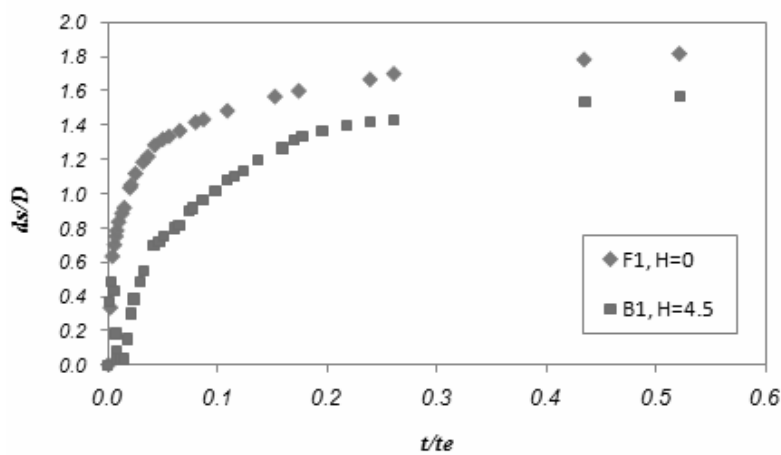
ضرایب ثابت این رابطه در آزمایش B₂ عبارتند از: $d=163.9$, $c=0.5$, $a=2.17$, $b=0.02$. B₃ عبارتند از: $d=11.43$, $b=0.011$, $c=0.81$, $a=2.69$. انحراف معیار و ضریب تعیین (R²) معادله



شکل 5- نمودار بی بعد توسعه زمانی آبشستگی با تغییر پارامترهای α , H , e



شکل 6 - نمودار درصد کاهش عمق حفره آبشستگی با تغییر پارامترهای H و e



شکل 7- نمودار بی بعد توسعه زمانی آبشستگی با تغییر پارامتر H

شکل 5 و مقایسه نمودارهای C_1 و C_2 و C_9 و مقایسه نمودارهای C_5 و C_6 در شکل 10 مشاهده می‌شود.

تأثیر فاصله صفحه مستغرق در جهت جریان (z)

با افزایش فاصله صفحات مستغرق در جهت جریان، منطقه وسیع‌تری در بالادست پایه تحت تأثیر عملکرد صفحات مستغرق قرار گرفته و وسعت طولی ناحیه متأثر از آبشستگی صفحات مستغرق افزایش می‌یابد. در نتیجه رسوبات بیشتری از بالادست پایه شسته شده و به سمت پایین دست و جلوی پایه حرکت می‌کنند. اما با افزایش فاصله صفحات مستغرق در جهت جریان، رسوبات آزادی بیشتری برای حرکت چرخشی از بین صفحات مستغرق بدست می‌آورند. در نتیجه به راحتی تحت تأثیر جریان چرخشی اطراف صفحه مستغرق قرار گرفته و با حرکت از جلوی صفحه مستغرق به پشت آن و دور شدن از ناحیه جلوی پایه باعث افزایش آبشستگی جلوی پایه می‌شوند. بهبود عملکرد صفحات مستغرق با کاهش فاصله آن‌ها در جهت جریان با مقایسه نمودارهای C_1 و C_6 و مقایسه نمودارهای C_2 و C_5 در شکل 10 مشاهده می‌شود.

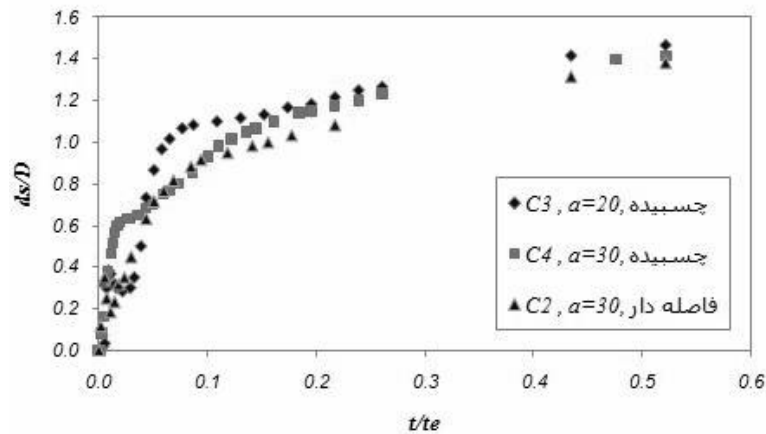
تأثیر تعداد صفحه مستغرق (n)

با افزایش تعداد صفحات مستغرق، منطقه وسیع‌تری در راستای طولی کانال تحت تأثیر عملکرد آن‌ها قرار گرفته و رسوبات بیشتری از بالادست پایه شسته شده و به سمت حفره آبشستگی جلوی پایه حرکت می‌کنند. در نتیجه عمق حفره آبشستگی پایه کاهش بیشتری نشان می‌دهد. اما افزایش بی‌رویه تعداد صفحات مستغرق هم از لحاظ اقتصادی به صرفه نیست و هم در عمل برای قایقرانی در رودخانه‌ها مشکل ساز می‌باشد زیرا با وجود تعداد زیادی صفحه مستغرق حرکت قایق‌ها در منطقه وسیعی از اطراف پایه امکان پذیر نمی‌باشد. بهبود عملکرد صفحات مستغرق با افزایش تعداد آنها با مقایسه نمودارهای B_1 و B_2 در شکل 11 مشاهده می‌شود.

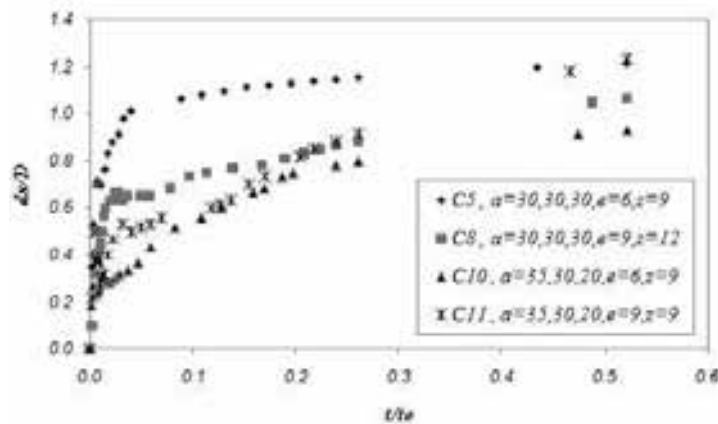
آزمایش C_{11} به جز در اندازه زوایا و فواصل صفحات مستغرق در جهت جریان مشابه آزمایش C_8 می‌باشد. اما همان‌طور که در جدول 2 مشاهده می‌شود، درصد کاهش کمتری دارد با وجود اینکه زوایای صفحات مستغرق همانند آزمایش C_{10} می‌باشد. به نظر می‌رسد این کاهش عملکرد به علت زاویه 20° صفحات مستغرق در ردیف سوم در کناره پایه می‌باشد که باعث هدایت رسوبات به پایین دست می‌شود. در آزمایش C_{11} صفحات مستغرق با همان زوایای آزمایش C_{10} قرار داده شدند. اما در آزمایش C_{10} صفحات مستغرق ردیف سوم با $e=6\text{cm}$ و $a=0\text{cm}$ در جلوی پایه قرار داشتند درحالی که در آزمایش C_{11} صفحات مستغرق با $e=9\text{cm}$ و $a=-3\text{cm}$ در کناره پایه قرار دارند و امکان تجمع رسوبات در جلو پایه وجود ندارد. بهبود عملکرد صفحات مستغرق با تغییر زاویه آن‌ها در هر ردیف در شکل 10 مشاهده می‌شود. طبق مطالب ذکر شده در قسمت 2 با رسیدن پشته به جلوی پایه عمق حفره به یکباره کاهش و دوباره افزایش می‌یابد که این روند در نمودارها به وضوح مشاهده می‌شود.

تأثیر فاصله صفحه مستغرق در راستای عمود بر جریان (e)

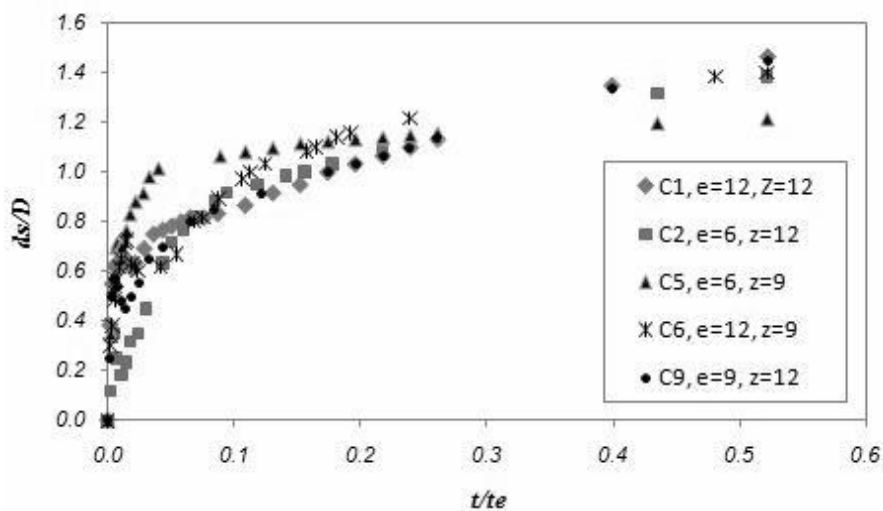
با افزایش فاصله صفحات مستغرق در راستای عرض کانال، منطقه عرضی وسیع‌تری در جلوی پایه تحت تأثیر آبشستگی موضعی قرار می‌گیرد. در نتیجه رسوبات بیشتری از بالادست شسته شده و به سمت پایه حرکت می‌کنند. اما به دلیل اینکه فاصله صفحات مستغرق تا پایه در جهت عرضی کانال زیاد می‌باشد، رسوباتی که از بالادست می‌آیند به راحتی از کناره پایه حرکت کرده و به سمت پایین دست می‌روند. بنابراین افزایش فاصله صفحات مستغرق در راستای عرضی کانال، باعث فرار رسوبات از منطقه جلوی پایه می‌شود. بهبود عملکرد صفحات مستغرق با کاهش فاصله آن‌ها در عرض کانال در شکل 6 و همچنین با مقایسه نمودارهای C_1 و C_2 و مقایسه نمودارهای B_1 و B_2 در



شکل 8- نمودار بی بعد توسعه زمانی آبشستگی تحت تأثیر چسبیده بودن صفحات مستغرق به پایه و تغییر پارامتر α



شکل 9- نمودار بی بعد توسعه زمانی آبشستگی با تغییر زوایای صفحات مستغرق در هر ردیف



شکل 10- نمودار بی بعد توسعه زمانی آبشستگی با تغییر پارامترهای e و z

می‌باشد. در شرایط چسبیده بودن صفحات مستغرق به پایه، هم سطح بودن صفحات مستغرق با رسوبات بستر ($H=0$) باعث کاهش فشار دینامیک در جلوی پایه و افزایش عملکرد آنها می‌شود. مقایسه نمودارهای B_E و F_E در شکل 13 این حالت را نشان می‌دهد.

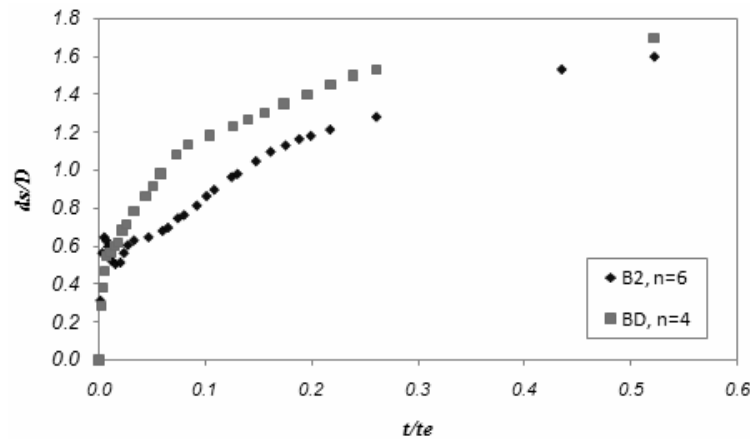
آزمایش C_{10} با 51% کاهش عمق حفره آبشستگی، بهترین مدل کاربرد صفحات مستغرق در کاهش عمق آبشستگی پایه پل در این تحقیق بود. مقایسه نتایج بدست آمده در این تحقیق با نتایج لاچلان (1999) در مورد تعداد صفحات مستغرق، زاویه برخورد جریان با آن و فواصل صفحات مستغرق در عرض کانال، روند یکسانی را برای بهبود عملکرد صفحات مستغرق نشان داد. تنها تفاوت نتایج، در فواصل صفحات مستغرق در جهت جریان (z) بود. طبق نتایج لاچلان (1999)، افزایش فاصله صفحات مستغرق در جهت جریان باعث افزایش کارایی صفحه مستغرق شد. در این تحقیق با افزایش فاصله صفحات مستغرق در جهت جریان عملکرد صفحه مستغرق کاهش یافت. شرایط بستر زنده لاچلان در آزمایشات وی در مقایسه با شرایط آب زلال این تحقیق، می‌تواند توجیهی برای این تفاوت باشد. مقایسه نتایج قربانی و کریمی (2007) با نتایج بدست آمده از این تحقیق در حالت استفاده از دو صفحه مستغرق چسبیده به پایه، روند یکسانی با کاهش ارتفاع روی بستر صفحه مستغرق نشان داد. امکان مقایسه نتایج بدست آمده از این تحقیق با نتایج صمیمی بهبهان و همکاران (1385) به علت متفاوت بودن آرایش صفحات مستغرق وجود نداشت.

نتیجه‌گیری

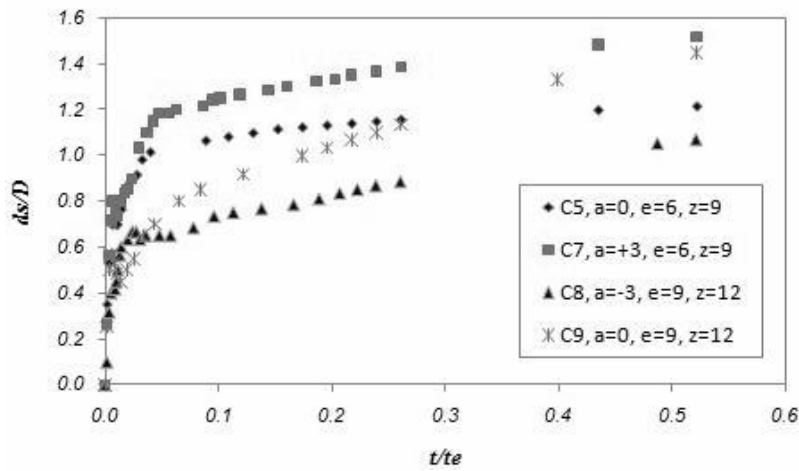
- در آزمایشات پایه با صفحه مستغرق در مقایسه با پایه بدون حفاظت، عمق آبشستگی کاهش یافت ولی توسعه حفره آبشستگی به طرفین پایه افزایش پیدا کرد. همچنین زمان تعادل آبشستگی افزایش یافت.

تأثیر فاصله نزدیک‌ترین ردیف صفحه مستغرق تا پایه (a) وقتی ردیف سوم صفحات مستغرق (شکل 1) پایین‌تر از قسمت جلوی پایه قرار گیرد یعنی پارامتر a منفی شود (آزمایش C_8 در جدول 2)، فاصله کمتری بین صفحه مستغرق و پایه برای فرار رسوبات ایجاد می‌شود. همچنین نوعی حفاظت از رسوبات در جلوی پایه توسط صفحات مستغرق ردیف سوم که پایین‌تر از ابتدای پایه قرار دارند ایجاد می‌شود. زمانی که ردیف سوم صفحات مستغرق بالاتر از پایه قرار گیرد (آزمایش C_7) یعنی پارامتر a مقداری بزرگتر از صفر داشته باشد، رسوباتی که از بالادست حرکت می‌کنند پس از رسیدن به جلوی پایه، از فاصله موجود بین ردیف سوم صفحات مستغرق و پایه به راحتی حرکت کرده و از ناحیه جلوی پایه دور می‌شوند. بنابراین نسبت به حالتی که صفحه مستغرق تا پایه فاصله کمتری دارد، عمق آبشستگی بیشتری در جلوی پایه رخ می‌دهد. بهبود عملکرد صفحات مستغرق با منفی شدن پارامتر a با مقایسه نمودارهای C_5 و C_7 و نمودارهای C_8 و C_9 در شکل 12 مشاهده می‌شود.

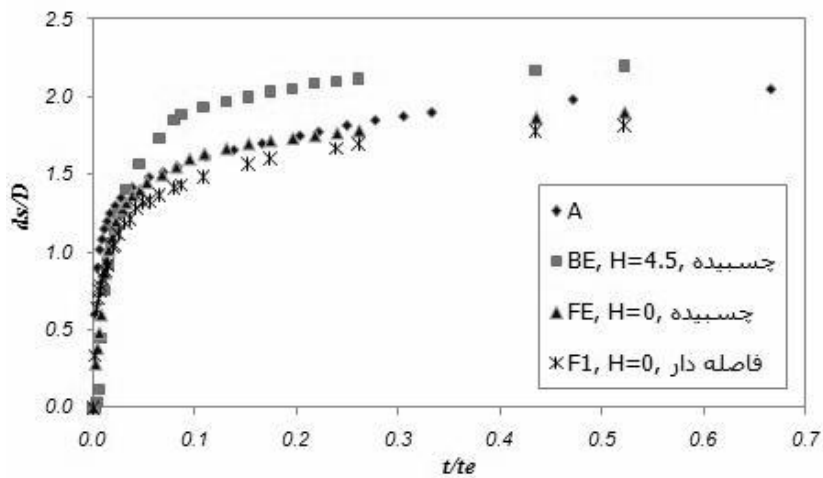
وقتی صفحات مستغرق بدون هیچگونه فاصله‌ای تا پایه به صورت چسبیده به پایه قرار داده شوند، فشار دینامیک زیادی در جلوی پایه ایجاد شده و عمق آبشستگی بیشتری نسبت به حالتی که بین صفحه مستغرق و پایه فاصله‌ای باشد، ایجاد می‌شود. مقایسه نمودارهای C_3 و C_4 با نمودار C_2 در شکل 8 این موضوع را تصدیق می‌کند. در این شرایط قدرت گرداب نعل اسبی افزایش یافته و ذرات رسوب جلوی پایه تحت اثر این گرداب به سمت بالادست در ابتدای صفحه مستغرق حرکت کرده و با حرکت چرخشی از کناره‌های صفحه مستغرق ردیف سوم، به سمت پایین دست منتقل می‌شوند. مقداری از رسوبات جلوی پایه هم تحت اثر گرداب، به راحتی از بستر جدا شده و با جریان عمومی آب به پایین دست می‌روند. بهبود عملکرد صفحات مستغرق با ایجاد فاصله بین آن‌ها و پایه با مقایسه نمودارهای F_1 و F_E در شکل 13 مشاهده می‌شود. در این شکل مدل A آزمایش پایه بدون صفحه مستغرق



شکل 11- نمودار بی بعد توسعه زمانی آبشستگی با تغییر پارامتر n



شکل 12- نمودار بی بعد توسعه زمانی آبشستگی با تغییر پارامتر a



شکل 13 - نمودار بی بعد توسعه زمانی آبشستگی تحت تأثیر چسبیده بودن صفحه مستغرق به پایه و تغییر پارامتر H

- با افزایش تعداد صفحات مستغرق به 6، عملکرد بهتری در کاهش عمق آبشستگی در جلوی پایه حاصل شد.
- با کم شدن فاصله صفحات مستغرق در جهت جریان، عملکرد آن‌ها در کاهش عمق آبشستگی در جلوی پایه افزایش یافت.
- با کم شدن فاصله صفحات مستغرق در راستای عمود بر جهت جریان، عملکرد آن‌ها در کاهش عمق آبشستگی در جلوی پایه افزایش یافت.
- با افزایش زاویه برخورد جریان به صفحات مستغرق، عملکرد آن‌ها در کاهش عمق آبشستگی در جلوی پایه افزایش یافت.
- با نصب ردیف صفحات مستغرق در فاصله‌ای عقب‌تر از ابتدای پایه، درصد کاهش آبشستگی بیشتری در جلوی پایه حاصل می‌شود.
- با کاهش ارتفاع روی بستر صفحات مستغرق تا نسبت $L/H=3$ ، عملکرد آن‌ها در کاهش عمق آبشستگی در جلوی پایه افزایش یافت.
- تغییر زوایا در هر ردیف از صفحات مستغرق به بهبود عملکرد آن‌ها در کاهش آبشستگی منجر شد بطوریکه بهترین کارایی صفحات مستغرق با 51% کاهش در عمق آبشستگی حاصل شد.

منابع مورد استفاده

- بارانی غ و خانجانی م ج، 1380. محاسبه ابعاد و آرایش بهینه صفحات مستغرق در دهانه‌های آبگیر با روش جهات امکانپذیر. نشریه مهندسی دانشگاه صنعتی اصفهان، سال 20، شماره 2. صفحه‌های 207 تا 216.
- صمیمی بهبهان ت، بارانی غ، رحیم خانی م و خانجانی م ج، 1385. بررسی آزمایشگاهی اثر صفحات مستغرق بر آبشستگی پایه پل‌ها. صفحه‌های 25 تا 31. مجموعه مقالات همایش ملی مدیریت شبکه‌های آبیاری و زهکشی، 12 الی 14 اردیبهشت، دانشگاه شهید چمران اهواز.
- Chiew YM, 1984. Local scour at bridge piers. University of Auckland, School of Engineering, New Zealand. Report No.355.
- Ghorbani B and Karimi A, 2007. A comparison of single and double submerged vanes effect on the scour occurring at a cylindrical pier. Pp. 260-276. Proceeding of 6th Conference of Hydraulic, Sept. 4-6, Shahre Kord, Iran.
- Gupta UP, Ojha CSP and Shurma N, 2010. Enhancing utility of submerged vanes with collar. Journal of Hydraulic Engineering, ASCE 136(9):651-655.
- Johnson PA, Hey RD, Tessier M and Rosgen DL, 2001. Use of vanes for control of scour at vertical wall abutments. Journal of Hydraulic Engineering, ASCE 127(9):772-778.
- Lauchlan CS, 1999. Pier scour countermeasures. Ph.D Thesis, University of Auckland, New Zealand.
- Marelius F and Sinha SK, 1998. Experimental investigation of flow past submerged vanes. Journal of Hydraulic Engineering, ASCE 124(5): 542-545.

- Odgaard AJ and Spoljaric A, 1986. Sediment control by submerged vanes. *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE 112(3): 1164-1181.
- Odgaard AJ and Wang Y, 1987. Scour prevention at bridge piers. Pp: 523-527. *Proceeding of National Conference on Hydraulic Engineering*, ASCE, Aug. 3-7, Williamsburg, Virginia, USA.
- Odgaard AJ and Wang Y, 1991. Sediment management with submerged vanes. I: theory. *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE 117(3): 267-283.
- Sheppard DM, Odeh M and Glasser T, 2004. Large scale clear water local scour experiments. *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE 130(10):957-963.
- Soon-Keat T, Guoliang Y, Siow-Yong L and Muk-Chen O, 2005. Flow structure and sediment motion around submerged vanes in open channel. *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering*, ASCE 131(3):132-136.
- Vittal N, Kothyari VC and Haghghat M, 1994. Clear-water scour around bridge pier group. *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE 120(11):1309-1318.
- Wang Y, Odgaard AJ and Melville BW, 1996. Sediment control at water intakes, *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE 122(6): 353-359.