تأثیر توأم صفحات مستغرق و طوق در کاهش عمق آبشستگی پایه‌های استوانه‌ای شکل پل‌ها

پریا شجاعی*، داود فرسادی زاده و علی حسین زاده دلیر[۱]

(تاریخ دریافت: ۱۳۸۸/۱۰/۹ ؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۰/۲/۲۴)

چکیده

صفحات مستغرق سازه‌های هدایت جریان با نسبت طول به ارتفاع کمی هستند که به صورت عمودی با زاویه‌ای نسبت به جهت جریان در بستر رودخانه نصب می‌شوند. این صفحات با ایجاد چرخش ثانویه در جریان باعث اصلاح الگوی جریان نزدیک بستر و توزیع مجدد جریان و انتقال رسوب در عرض کانال می‌شوند. طوق صفحه‌ای تخت با ضخامت کم است که در تراز بستر یا نزدیک آن روی پایه به صورت عمود بر آن نصب می‌شود و با ممانعت از برخورد جریان رو به پایین در جلوی پایه به ذرات بستر، باعث کاهش آبشستگی می‌شود. در این تحقیق به منظور کاهش آبشستگی پایه پل، از صفحات مستغرق و کاربرد توأم صفحات مستغرق و طوق استفاده گردید. بدین منظور پایه استوانه‌ای به قطر ۶ سانتی‌متر در کانالی به طول ۸ متر و عرض ۸۰ سانتی‌متر در شرایط آب زلال با u_*/u_{*c}=۰/۹ ، مدل‌سازی شد. آزمایشات با طوقی به قطر سه برابر قطر پایه همتراز بستر و صفحاتی با طول یک و نیم برابر قطر پایه و ارتفاع روی بستر صفر انجام شد. بیشترین میزان کاهش در عمق حفره آبشستگی با کاربرد توأم طوق و چهار عدد صفحه به مقدار ۶۱ درصد حاصل شد.

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

۱. به ترتیب کارشناس ارشد، استادیار و دانشیار مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز

* : مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: paryshoja@yahoo.com

[Downloaded from jstnar.iut.ac.ir on 2026-11-29]

[DOR: 20.1001.1.24763594.1390.15.57.3.5]

مقدمه

با توجه به عوارض طبیعی زمین استفاده از پل‌ها در مسیر راه‌ها اجتناب ناپذیر است. وجود پایه‌ها و تکیه‌گاه‌های جانبی پل در عرض رودخانه باعث کاهش عرض عبوری جریان، برخورد جریان به پایه و انحراف خطوط جریان اطراف پایه به کف بستر و در نتیجه ایجاد آبشستگی موضعی پایه پل‌ها می‌شوند. سالیانه بسیاری از پل‌ها بر اثر پدیده آبشستگی و لغزش پایه‌ها در مواقع سیلابی که شریان‌های ارتباطی به مناطق سیل‌زده هستند تخریب می‌شوند و دسترسی و امدادرسانی به مناطق سیل‌زده با مشکلات مواجه می‌شود که بیانگر اهمیت بررسی این پدیده است. افزایش مقاومت مواد بستر و کاهش قدرت فرسایش جریان اطراف پایه، دو روشی هستند که برای کنترل و کاهش آبشستگی موضعی استفاده می‌شوند.

صفحات مستغرق (Submerged vanes) با ایجاد جریان گردابه‌ای باعث تغییر در رژیم حرکت بار بستر و در نتیجه تغییر محل رسوب‌گذاری و فرسایش می‌شوند. این صفحات در مقطع عرضی کانال طراحی و با زاویه کوچکی نسبت به جهت جریان به صورت عمود در بستر نصب می‌شوند. جریان چرخشی ناشی از تغییرات فشار عمودی در دو طرف سطح صفحه است. ترکیب چرخش ایجاد شده با سرعت در جهت جریان، سبب ایجاد یک حرکت مارپیچی در پایین‌دست صفحات می‌شود. این حرکت مارپیچی یک تنش برشی عرضی به بستر رودخانه القا می‌کند که باعث انتقال رسوب در جهت عرضی می‌شود (۱۴) (شکل ۱).

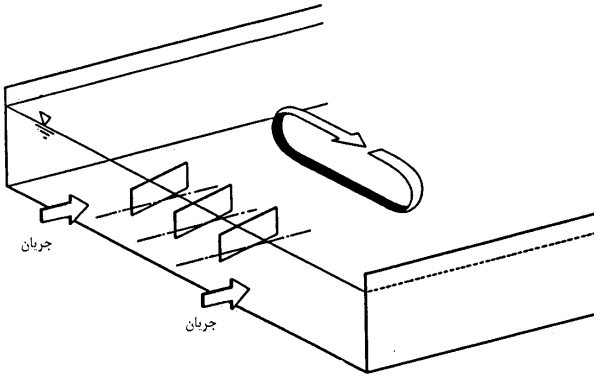
صفحات مستغرق اساساً برای حفاظت ساحل رودخانه‌ها، عمیق کردن کانال‌ها و جلوگیری از رسوبگذاری در دهانه آبگیرها به کار می‌روند. هم‌چنین این صفحات در تغییر توزیع سرعت و عمق در پیچ رودخانه‌ها مؤثرند (۱). وقتی که یک صفحه مستغرق در بستر رودخانه با زاویه کوچکی نسبت به امتداد جریان نصب شود، به علت اختلاف فشار موجود در دو طرف صفحه، گرداب و گردش القایی در اطراف صفحه به وجود می‌آید. در نتیجه این گرداب، در پایین دست صفحات رسوبات از قسمت مکشی صفحه برداشته شده و در قسمت فشاری صفحه ته‌نشین می‌شوند. لذا با نصب ردیف صفحات در بستر رودخانه می‌توان رسوبات را روی سطح بزرگ‌تری توزیع کرد (۱۴).

صفحات مستغرق اولین بار در اوایل سال ۱۹۳۰ در هند و پاکستان به نام صفحات کینگ (King´s Vane) مورد استفاده قرار گرفتند. یکی از محققین به بررسی عملکرد صفحات مستغرق و غیر مستغرق پرداخت و به این نتیجه رسید که تنها صفحات مستغرق در عمل مفید واقع می‌شوند (۹). ادگارد و وانگ تعدادی آزمایش برای کاهش آبشستگی موضعی پایه پل با استفاده از صفحات مستغرق انجام دادند. هم‌چنین آنها در آزمایش‌های محدودی از ترکیب صفحات مستغرق، صفحات مدفون و طوق جهت کاهش آبشستگی پایه پل تحت شرایط بستر زنده استفاده کردند. بیشترین کاهش در میزان آبشستگی در حالت کاربرد توأم صفحات مستغرق و طوق به میزان ۶۴ درصد حاصل شد (۱۳). لاچلان 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 ۱ بود و صفحه مستغرق نوع II همانند صفحات مستغرق آیوا دارای نسبت L/H بزرگ‌تر از یک بودند (۹). صمیمی بهبهان و همکاران با استفاده از صفحاتی با زاویه مشخص بین ۱۰ تا ۳۰ درجه نسبت به امتداد جریان در ردیف‌های چندتایی و با آرایش خاص برای اصلاح شکل جریان نزدیک بستر، عمق آبشستگی پایه پل استوانه‌ای را کاهش دادند (۳). قربانی و کریمی 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 (۷).

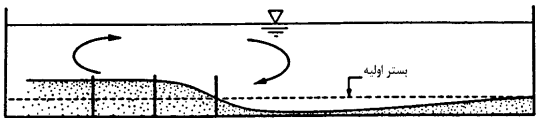
طوق (Collar) نقش یک سپر محافظ را در مقابل حرکت ذرات رسوب در اثر جریان رو به پایین داراست. تاکنون

[Downloaded from jstmar.iut.ac.ir on 2026-11-29]

[DOR: 20.1001.1.24763594.1390.15.57.3.5]



شکل۱ - الف. طرح شماتیک وضعیت جریان در نتیجه چرخش ایجاد شده توسط صفحات مستغرق (۱۴).



شکل۱- ب. طرح شماتیک تغییرات ناشی از صفحات مستغرق در پروفیل بستر(۱۴).

مطالعات زیادی در زمینه کاربرد طوق به منظور کاهش آبشستگی پایه پل‌ها انجام شده است (۵، ۶، ۸، ۱۱، ۱۶، ۱۸). برخی از نتایج این مطالعات عبارت‌اند از: با افزایش قطر طوق عمق آبشستگی کاهش بیشتری نشان می‌دهد. هر چه تراز نصب طوق نسبت به بستر پایین‌تر باشد، درصد کاهش آبشستگی افزایش می یابد. کارایی طوق‌ها با افزایش زاویه پایه مستطیلی نسبت به جریان کاهش می‌یابد. نصب طوق در گروه پایه‌ها نسبت به پایه منفرد مؤثرتر است.

در زمینه کاربرد توأم طوق و صفحات مستغرق تحقیقی در ایران انجام نگرفته است. هدف از این تحقیق، بررسی تأثیر توأم صفحات مستغرق و طوق جهت حفاظت پایه پل در مقابل آبشستگی می¬باشد.

مواد و روش‌ها

آزمایش‌ها در آزمایشگاه هیدرولیک گروه مهندسی آب دانشگاه تبریز که مجهز به یک کانال مستطیلی فلزی- شیشه‌ای به طول ۸ متر، عرض ۸۰ سانتی‌متر و ارتفاع ۵۰ سانتی‌متر بود، انجام شد. کانال مجهز به یک مخزن انتهایی است که با استفاده از سرریز مستطیلی نصب شده در آن، می‌توان دبی جریان را اندازه‌گیری کرد. آزمایش‌ها بر اساس آبشستگی آب زلال با $u_* / u_{*c} =$ ۰/۹ انجام شد تا حداکثر عمق آبشستگی رخ دهد. برای مدل پایه، از یک لوله استوانه‌ای شکل فولادی به قطر ۶ سانتی‌متر استفاده شد. مدل پایه بر روی یک صفحه افقی متصل گردید و در فاصله ۱/۸ متری از ابتدای محدوده ۳ متری رسوبات قرار داده شد. اندازه متوسط ذرات رسوب (d_{50}) برابر ۰/۴۳ میلی‌متر و انحراف معیار هندسی (σ_g) برابر ۱/۵ تعیین شد. چگالی نسبی ذرات رسوبی بستر برابر ۲/۶۴ بود. طبق مطالعات شفاعی بجستان (۱۳۷۸)، اگر σ_g<۱/۵ باشد مصالح بستر یکنواخت و برای σ_g≥۲ رسوبات غیر یکنواخت می‌باشند (۲). فرم بستر ریپل در رسوبات غیر چسبنده با اندازه متوسط ۰/۰۵ تا ۰/۷ میلی‌متر تشکیل می‌شود. در حالی‌که برای رسوبات با اندازه $d_{50} \geq$ ۰/۷ mm ، ریپل ایجاد نمی‌شود. برای رسوبات با d_{50} < ۰/۷ mm، ریپل‌ها در سرعت‌های جریان بیشتر از ۰/۶Vc تشکیل می‌شوند و باعث کاهش عمق حفره آبشستگی می‌شوند. برای رفع این مشکل، انحراف معیار هندسی ذرات بستر باید در محدوده ۱/۳ تا ۱/۵ باشد. در این محدوده از انحراف معیار، ذرات درشت‌تر سطح بستر

[Downloaded from jstmar.iut.ac.ir on 2026-11-29]

[DOR: 20.1001.1.24763594.1390.15.57.3.5]

را پوشانده و لایه مسلح ایجاد می‌شود، ولی این ذرات به قدر کافی بزرگ نیستند تا حفره آبشستگی را بپوشانند زیرا شدت آشفتگی جریان در این ناحیه زیاد است. بنابراین در این حالت آبشستگی آب زلال همانند شرایط مربوط به ذراتی که ایجاد ریپل نمی‌کنند، رخ می‌دهد (۴).

مدل صفحات مستغرق، از ورقه‌های گالوانیزه به ضخامت ۱ میلی‌متر به شکل مربع مستطیل ساخته شد. این صفحات با طولی (L) برابر ۹ سانتی‌متر (۱/۵ برابر قطر پایه) با ارتفاع روی بستر صفر تحت آزمایش قرار گرفتند. زاویه صفحات با جهت جریان (α) برابر ۲۰ درجه که بر اساس مطالعات برخی از محققین در محدوده کارایی مؤثر صفحات مستغرق می‌باشد، در نظر گرفته شد (۱۰، ۱۲، ۱۴ و ۱۷). تعداد (n) ۲ و ۴ عدد صفحه مورد آزمایش قرار گرفت. پارامترهای متغیر و نحوه قرارگیری صفحات نسبت به پایه در شکل ۲ آمده است. در این شکل α زاویه قرارگیری صفحات نسبت به جهت جریان، z فاصله صفحات در راستای جریان، e فاصله صفحات عمود بر جهت جریان و D قطر پایه می‌باشد. برای مدل طوق، از ورقه گالوانیزه به ضخامت ۲ میلی‌متر به شکل دایره‌ای به قطر ۱۸ سانتی‌متر (۳ برابر قطر پایه) استفاده شد. ارتفاع نصب طوق در تراز بستر در نظر گرفته شد.

در همه آزمایش‌ها، عمق جریان ۱۴/۷ سانتی‌متر و دبی ۰/۰۳ متر مکعب بر ثانیه، عدد رینولدز برابر $۱/۰۹ \times ۱۰^{۵}$ و عدد فرود برابر ۰/۲۱ بود. عدد رینولدز برشی برابر ۶/۷۹ و بستر در شرایط بینابینی قرار داشت. عمق و سرعت آب در کانال با استفاده از سطح سنج با دقت ۰/۱ میلی‌متر و میکروپروپیلر با دقت ۰/۱ سانتی‌متر بر ثانیه اندازه‌گیری شد. عمق حفره آبشستگی از روی نوار میلی‌متری چسبانده شده روی پایه خوانده شد. معیار زمان تعادل (t_e) در این تحقیق، معیار ویتال و همکاران می‌باشد (۱۶). این محققین زمان تعادل آبشستگی را به صورت مدت زمانی که تغییرات در عمق آبشستگی در یک بازه زمانی ۶ ساعته کمتر از ۱ میلی‌متر باشد، تعریف کردند(۱۶). بر این اساس آزمایش پایه تنها برای رسیدن به معیار تعادل ۳۶ ساعت ادامه یافت. آزمایش کاربرد صفحات مستغرق در جلوی پایه برای رسیدن به معیار مذکور ۴۶ ساعت ادامه یافت. مشاهدات نشان داد که ۹۰٪ عمق تعادل آبشستگی پس از ۲۴ ساعت رخ می‌دهد. در شرایط کاربرد طوق و هم‌چنین کاربرد توأم صفحات مستغرق و طوق برای رسیدن به معیار زمان تعادل، آزمایش ۴۳ ساعت به طول انجامید.

نتایج و بحث

۱- آزمایش پایه بدون حفاظت

شکل ۳ نمودار توسعه زمانی حفره آبشستگی پایه بدون حفاظت (آزمایش A) تا زمان رسیدن به تعادل (۳۶ ساعت) را نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل ۳ مشاهده می‌شود، سرعت آبشستگی در ابتدای آزمایش بسیار زیاد است به طوری‌که پس از ۱ ساعت از شروع آزمایش (۳ درصد زمان تعادل)، ۶۴ درصد از کل آبشستگی ایجاد شد. اما با گذشت زمان تغییرات عمق حفره آبشستگی کاهش می‌یابد.

معادله برازش شده به نمودار شکل ۳ به صورت زیر است.

$$ds = a\left[۱ - \frac{۱}{(۱+abt)}\right] + c\left[۱ - \frac{۱}{(۱+cdt)}\right] \qquad [۱]$$

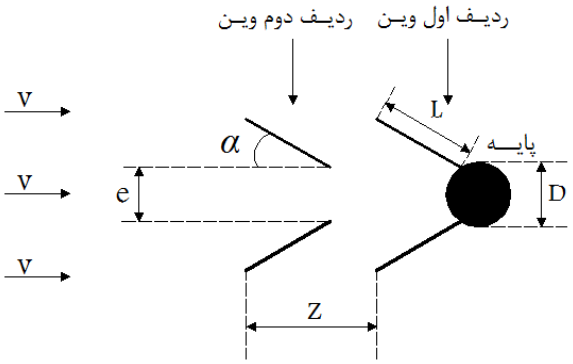
در این رابطه زمان بر حسب ساعت می‌باشد. ضرایب ثابت رابطه بالا عبارت از$d=۰/۰۱۶$ $a=۸/۳۷$ ، $b=۱/۱۵$ ، $c= ۵/۷۹$ است. این رابطه به فرم معادلات عمق آبشستگی نسبت به زمان است (۱۵). انحراف معیار و ضریب هم‌بستگی (R) این معادله به ترتیب برابر ۰/۰۶ و ۰/۹۹۹ است.

۲- آزمایش‌های پایه با صفحات

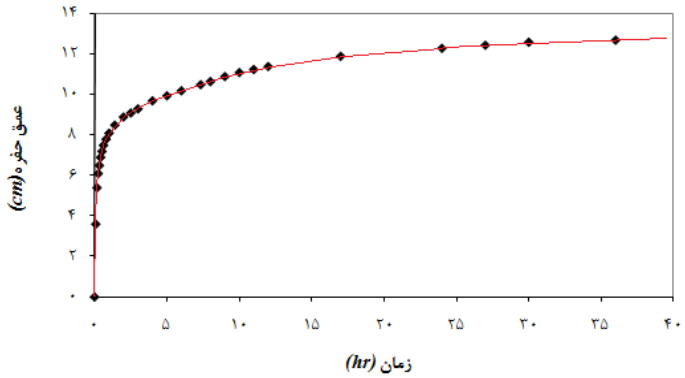
فهرست آزمایش‌ها و عملکرد آنها در جدول ۱ قابل مشاهده است. پارامترهای متغیر جدول ۱ همان‌طور که در شکل ۲ دیده می‌شود عبارت از : n تعداد صفحات، α زاویه

[Downloaded from jstmar.iut.ac.ir on 2026-11-29]

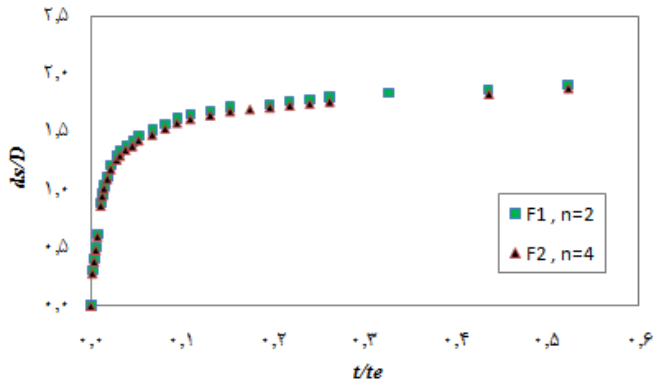
[DOR: 20.1001.1.24763594.1390.15.57.3.5]



شکل ۲. نحوه قرارگیری صفحات و پارامترهای مربوطه.



شکل۳. نمودار توسعه زمانی آبشستگی پایه بدون حفاظت.



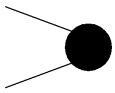
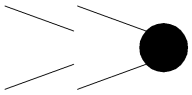
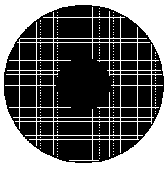
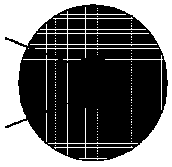
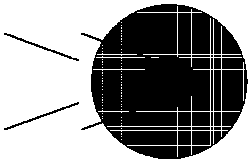
شکل۴. نمودار بی‌بعد توسعه زمانی آبشستگی با تغییر تعداد صفحات.

قرارگیری صفحات نسبت به جهت جریان، z فاصله صفحات در راستای جریان و e فاصله صفحات عمود بر جهت جریان است. در آزمایش‌های کاربرد صفحات در جلوی پایه (آزمایش F_1 و F_2)، سطح بالای صفحات هم سطح رسوبات بستر قرار دارد به طوری که صفحات در زیر رسوبات و هم سطح بستر مدفون شدند. در این شرایط، روند شروع آبشستگی همانند پایه بدون

[Downloaded from jstnar.iut.ac.ir on 2026-11-29]

[DOR: 20.1001.1.24763594.1390.15.57.3.5]

جدول ۱. فهرست آزمایشات و عملکرد آنها در کاهش عمق آبشستگی

مدل	نحوه قرارگیری	n	α	z	e	کاهش آبشستگی
F_1		۲	۲۰°	-	۴/۵	٪۰/۸
F_2		۴	۲۰°	۹	۴/۵	٪۲
G_0		۰	–	–	–	٪۳۵
G_1		۲	۲۰°	–	۴/۵	٪۵۹
G_2		۴	۲۰°	۹	۵	٪۶۱

- : فواصل برحسب سانتی‌متر می‌باشند. پارامترهای متغیر جدول ۱ در شکل ۲ دیده می‌شود.

صفحه است. زیرا با وجود صفحات با ارتفاع روی بستر صفر، جریان عمومی آب بدون حضور مانعی روی سطح رسوبات حرکت کرده و ذرات بستر در بالادست در جای خود ثابت مانده و حفره آبشستگی جلو پایه همانند آبشستگی پایه بدون صفحه توسعه می‌یابد. با این تفاوت که وجود صفحات در جلوی پایه نوعی حفاظت برای رسوبات در مقابل گرداب نعل اسبی ایجاد کرده ولی این حفاظت به علت افزایش فشار دینامیک در جلوی پایه با وجود صفحات چسبیده به پایه، به میزان چشمگیری نمی‌باشد. بنابراین مکانیزم کاهش عمق حفره آبشستگی در شرایط همترازی صفحات با رسوبات بستر، اختلال در روند تولید گرداب نعل اسبی به علت وجود صفحات است زیرا جریان چرخشی گرداب نعل اسبی درون حفره آبشستگی، با صفحات برخورد می کند. با افزایش تعداد صفحات از ۲ به ۴ عدد، عملکرد آنها در کاهش عمق آبشستگی جلوی پایه افزایش یافت زیرا صفحات مدفون ردیف دوم نیز باعث اختلال در روند ایجاد گرداب نعل اسبی شده و در نتیجه مانع از بلندشدن ذرات رسوب از درون حفره آبشستگی می‌شوند. شکل ۴ نمودار بی بعد توسعه زمانی آزمایش F_1 و F_2 را نشان می‌دهد. این نمودارها برای مدت زمان ۲۴ ساعت که ۹۰٪ عمق تعادل آبشستگی رخ می‌دهد ارائه شده‌اند.

معادلات برازش شده به نمودارهای شکل ۴ در زیر آورده شده است. در این روابط زمان بر حسب ساعت می‌باشد.

آزمایش F_1 :

$$ds/D = a\left[1-\frac{1}{(1+abt)}\right]+c\left[1-\frac{1}{(1+cdt)}\right] \qquad [۲]$$

ضرایب ثابت این رابطه عبارت از: d= ۰/۰۴۷ ، c=۰/۴۶ ، a=۱/۷۷ ، b=۱/۰۷ هستند.

[Downloaded from jstmar.iut.ac.ir on 2026-11-29]

[DOR: 20.1001.1.24763594.1390.15.57.3.5]

آزمایش F_2 :

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

ضرایب ثابت این رابطه عبارت از: d= ۱/۰۹، c=۱/۷۳، b=۰/۰۲۹، a=۰/۵۹ است. انحراف معیار و ضریب هم‌بستگی (R) هر دو این معادلات به ترتیب برابر۰/۰۳ و ۰/۹۹۹ می‌باشد.

مقایسه نتایج لاچلان (۹) با نتایج به دست آمده در این تحقیق، روند یکسانی را به ازای افزایش تعداد صفحات نشان داد. مقایسه نتایج در سایر زمینه‌ها به علت متفاوت بودن پارامترهای متغیر در این تحقیق با مطالعات لاچلان امکان‌پذیر نیست. هم‌چنین امکان مقایسه نتایج این تحقیق با نتایج صمیمی بهبهان و همکاران (۳) و نتایج قربانی و کریمی (۷) به ترتیب به علت متفاوت بودن آرایش صفحات و متفاوت بودن پارامترهای متغیر وجود ندارد. کاهش عمق حفره آبشستگی در آزمایش قربانی و کریمی (۷) در حالت دو صفحه چسبیده به پایه با ارتفاع روی بستر صفر به میزان ۸۷/۷ درصد در مدت زمان ۷ ساعت است. این عمق آبشستگی قبل از رسیدن به شرایط تعادل که حداکثر عمق آبشستگی رخ می‌دهد اندازه‌گیری شده است که قابل مقایسه با نتایج تحقیق حاضر با زمان تعادل ۴۶ ساعت نمی‌باشد.

۳- آزمایش پایه با طوق

برای مقایسه عملکرد توأم صفحات و طوق، ابتدا آزمایشی با طوق تنها همتراز بستر انجام گرفت (آزمایش G_0). در این حالت روند آبشستگی از همان ابتدا با آزمایش پایه بدون حفاظت متفاوت بود. اولین نشانه‌های آبشستگی تحت تأثیر گرداب برخاستگی در پشت پایه به صورت ایجاد دو حفره متقارن نسبت به محور طولی کانال در لبه‌های طوق، آغاز شد. در حالی‌که رسوبات در جلوی پایه، بدون هیچ‌گونه حرکتی در جای خود ثابت بودند. با گذشت زمان دو حفره ایجاد شده در دو طرف لبه طوق در پشت پایه بزرگ‌تر شده و به دنبال آن حجم پشته‌های شکل گرفته در انتهای حفره‌ها هم افزوده می‌شد. این حفره‌ها (شیارها) با گذشت زمان به سمت بالادست حرکت کرده و پس از ۲۵ دقیقه به لبه طوق در جلوی پایه رسیدند. گسترش شیارها همچنان ادامه یافت تا این‌که شیارها پس از ۶۵ دقیقه با خارج کردن ذرات رسوب زیر طوق در جلوی پایه به هم رسیدند و اولین نشانه‌های آبشستگی در روی پایه دیده شد. پس از ایجاد حفره آبشستگی در جلوی پایه، دو شیار نسبتاً عمیق در دو طرف پایه زیر طوق شکل گرفته و رسوبات به راحتی از زیر طوق خارج شده و به سمت پایین دست حرکت کرده و عمق آبشستگی با سرعت زیادی افزایش یافت. به طوری‌که پس از گذشت ۴ ساعت و۴ دقیقه (۹ درصد زمان تعادل) ۷۷ درصد عمق تعادل آبشستگی رخ داد. پس از این زمان، توسعه حفره آبشستگی با سرعت بسیار کمی ادامه یافت (شکل۵). معادله برازش شده به نمودار شکل ۵ به صورت زیر است.

آزمایش G_0 :

$$ds/D = a(b-e^{-ct}) \qquad [4]$$

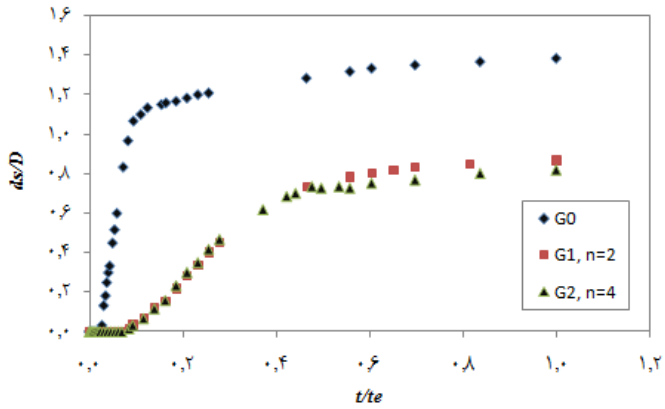
در این رابطه زمان بر حسب دقیقه می‌باشد. ضرایب ثابت این رابطه عبارت از : c=۰/۰۰۴ ، b=۰/۸۸ ، a=۱/۵۵ است. انحراف معیار و ضریب هم‌بستگی (R) این معادله به ترتیب برابر ۰/۱۲ و ۰/۹۷۹ می‌باشد.

۴- آزمایش‌های پایه با طوق و صفحات

روند شروع آبشستگی در آزمایش‌های کاربرد توأم صفحات و طوق همانند آزمایش پایه با طوق است. اولین حرکت ذرات رسوب در لبه طوق در پشت پایه تحت تأثیر گرداب برخاستگی مشاهده شد که منجر به تشکیل دو حفره متقارن در دو سمت پایین دست طوق گشت. این دو حفره (شیار) با گذشت زمان به سمت بالادست در زیر طوق پیشروی کرده و به حجم پشته ایجاد شده در انتهای حفره‌ها در پایین دست می‌افزایند. دو شیار پس از ۲۰ دقیقه از شروع آزمایش، با خارج شدن ذرات رسوب زیر طوق به صفحات رسیدند. برخورد شیارها به صفحه، موجب عدم پیشروی آنها به بالادست و جلوی پایه شده و

[Downloaded from jstmar.iut.ac.ir on 2026-11-29]

[DOR: 20.1001.1.24763594.1390.15.57.3.5]



شکل ۵ . نمودار بی‌بعد توسعه زمانی آبشستگی پایه با کاربرد توأم طوق و وین.

ایجاد حفره آبشستگی را به تأخیر انداخت. پس از گذشت ۳۰ دقیقه شیارها توانستند تا ابتدای صفحه در بالادست پیشروی کرده و با خارج کردن ذرات رسوب ابتدای صفحه و کناره طوق، پس از ۴۵ دقیقه به لبه طوق در جلوی پایه رسیدند. ایجاد حفره با سرعت بسیار کمی در زیر طوق ادامه یافت تا این‌که پس از گذشت ۳ ساعت و ۴۰ دقیقه حفره آبشستگی در روی پایه ایجاد شد. عامل اصلی تأخیر زمانی تشکیل حفره در جلوی پایه وجود صفحات چسبیده به پایه در مسیر حرکت حفره از پشت پایه به سمت بالادست است. صفحات مانع از رسیدن شیار آبشستگی به جلوی پایه می‌شوند. در حالت استفاده از طوق تنها، آبشستگی در نتیجه گرداب برخاستگی از پایین دست پایه شروع شده و به بالادست پیشروی می‌کند ولی در شرایط استفاده از طوق و صفحه، گرداب برخاستگی سهم کمتری در تشکیل حفره آبشستگی جلوی پایه دارد زیرا صفحات مانع از رسیدن حفره حاصله از گرداب برخاستگی به جلوی پایه می‌شوند. بنابراین درکاربرد توأم طوق و صفحات، ذرات رسوب جلوی پایه توسط طوق از گرداب نعل اسبی و توسط صفحه مدفون از گرداب برخاستگی محافظت می‌شوند. شکل ۶ توپوگرافی حفره آبشستگی آزمایش کاربرد طوق و دو عدد صفحه (آزمایشG_1) و شکل ۷ خطوط میزان دو بعدی آن را نشان می‌دهد. ارقام محور x و y بر حسب سانتی‌متر و محور z بر حسب میلی‌متر است. سطح بستر در تراز ۱۶۴/۹ قرار دارد.

شکل ۵ نمودار بی بعد توسعه زمانی آبشستگی با کاربرد توأم صفحات و طوق را برای مدت ۴۳ ساعت که زمان تعادل آزمایش‌های طوق و صفحه می‌باشد نشان می‌دهد.

در حالت کاربرد طوق و چهار عدد صفحه مدفون در آزمایش G_2، پس از گذشت ۱۹ ساعت، حفره آبشستگی جلوی طوق با پیشروی به سمت بالادست تحت تأثیر صفحات ردیف دوم قرار گرفته و روند توسعه کمتری نسبت به آزمایش طوق و ۲ عدد صفحه نشان می‌دهد که این روند تا رسیدن به تعادل ادامه می‌یابد (شکل۵). در حقیقت نحوه قرارگیری دو صفحه ردیف دوم نوعی حفاظت در مقابل آبشستگی را برای رسوبات ایجاد کرده و مانع از حرکت رسوبات در این ناحیه می‌شود (شکل۸). در این تحقیق آزمایش G_2 با ۶۱٪ کاهش عمق آبشستگی، بالاترین عملکرد در کاهش میزان آبشستگی با کاربرد توأم صفحات و طوق را داشت (جدول۱).

معادلات برازش شده به نمودار آزمایش‌های G_1 و G_2 در زیر آورده شده است. در این معادلات زمان بر حسب ساعت است.

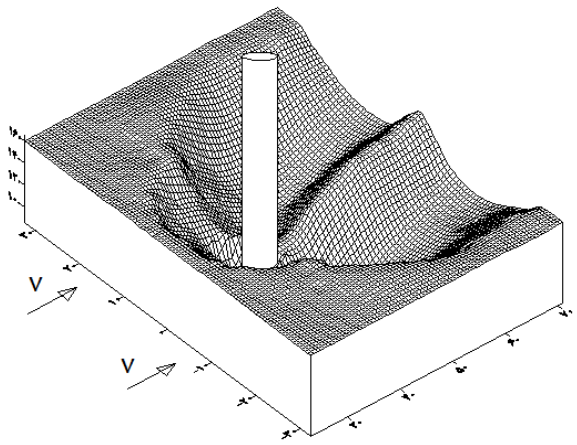
آزمایش G_1 :

$$ds/D = a\ Ln(t+1) + b(Ln(t+1))^2 \qquad [5]$$

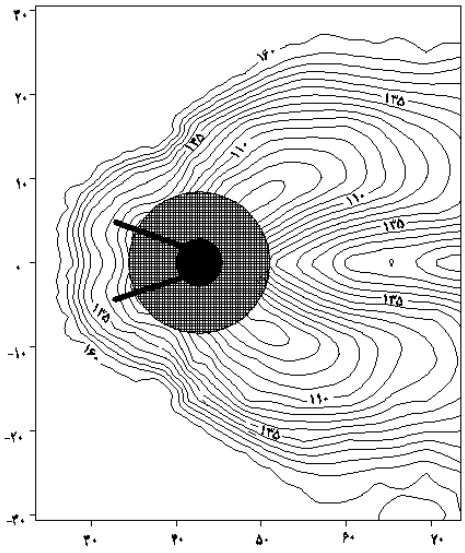
ضرایب ثابت این رابطه عبارت از : a= −۰/۱۱۱ ، b=۰/۱۰۲ است. انحراف معیار و ضریب همبستگی (R) این معادله به ترتیب برابر ۰/۰۵ و ۰/۹۸۶ می‌باشد.

[Downloaded from jstmar.iut.ac.ir on 2026-11-29]

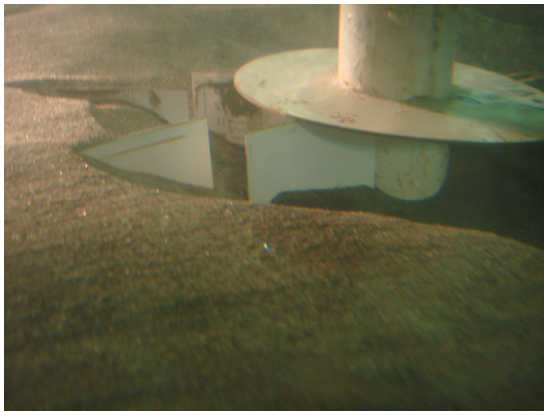
[DOR: 20.1001.1.24763594.1390.15.57.3.5]



شکل ۶. توپوگرافی حفره آبشستگی آزمایش G_1



شکل۷ . خطوط میزان دو بعدی حفره آبشستگی آزمایش G_1



شکل۸. حفره آبشستگی پس از ۲۴ ساعت در آزمایش G_2

[Downloaded from jstmar.iut.ac.ir on 2026-11-29]

[DOR: 20.1001.1.24763594.1390.15.57.3.5]

آزمایش G_2 :

$$ds/D = a\ Ln(t+1) + b(Ln(t+1))^2 \qquad [۶]$$

ضرایب ثابت این رابطه عبارت از : a= −۰/۰۸۷ ، b=۰/۰۹۴ است. انحراف معیار و ضریب هم‌بستگی (R) این معادله به ترتیب برابر ۰/۰۷ و ۰/۹۷۸ می‌باشد.

مقایسه نتایج آزمایش‌های حاضر با نتایج ادگارد و وانگ (۱۳) در آزمایش مشترک کاربرد دو صفحه مدفون و طوق، مقدار کاهش آبشستگی آزمایش ادگارد و وانگ را ۵ درصد بیشتر از مطالعه حاضر نشان داد که علت آن می‌تواند متفاوت بودن شرایط آزمایش از لحاظ u_* / u_{*c} (سرعت برشی جریان نسبت به سرعت برشی آستانه حرکت ذرات بستر) باشد. در آزمایش‌های ادگارد و وانگ نیز همانند تحقیق حاضر بهبود عملکرد کاربرد توأم صفحات و طوق نسبت به کاربرد صفحات تنها مشاهده گردید.

نتیجه‌گیری

- در آزمایش‌های پایه با صفحات مستغرق در مقایسه با پایه بدون حفاظت، عمق آبشستگی کاهش یافت. ولی زمان تعادل آبشستگی افزایش یافت.
- با افزایش تعداد صفحات به ۴ عدد، عملکرد بهتری در کاهش عمق آبشستگی در جلوی پایه حاصل شد.
- صفحات با ارتفاع صفر از سطح بستر، توانایی کمی در کاهش عمق آبشستگی جلوی پایه دارند مگر این‌که با طوق به کار برده شوند.
- در آزمایش‌های پایه با طوق در مقایسه با پایه بدون حفاظت، عمق آبشستگی کاهش یافت ولی توسعه حفره آبشستگی به طرفین پایه افزایش یافت. هم‌چنین زمان تعادل آبشستگی افزایش یافت.
- کاربرد توأم طوق و صفحه در حالت چسبیده به پایه، به میزان زیادی زمان شروع آبشستگی را به تأخیر انداخت.
- ترکیب صفحات و طوق در کاهش آبشستگی جلوی پایه عملکرد بالایی را نشان داد به طوری که کاربرد توأم ۴ عدد صفحه و طوق، باعث ۶۱٪ کاهش عمق آبشستگی در جلوی پایه شد.

منابع مورد استفاده

۱. بارانی، غ. و م. ج. خانجانی. ۱۳۸۰. محاسبه ابعاد و آرایش بهینه صفحات مستغرق در دهانه‌های آبگیر با روش جهات امکان‌پذیر. نشریه استقلال دانشگاه صنعتی اصفهان ۲۰(۲):۲۰۷-۲۱۶.

۲. شفاعی بجستان، م. ۱۳۷۸. *هیدرولیک رسوب*. انتشارات دانشگاه شهید چمران اهواز.

۳. صمیمی بهبهان، ت.، غ.ع. بارانی.، م. رحیم خانی و م. ج. خانجانی. ۱۳۸۵. بررسی آزمایشگاهی اثر صفحات مستغرق بر آبشستگی پایه پل‌ها. مجموعه مقالات همایش ملی مدیریت شبکه‌های آبیاری و زهکشی، ۱۲ الی ۱۴ اردیبهشت، دانشگاه شهید چمران اهواز.

4. Breusers, N.H.C and A. J. Raudkivi. 1991. Scouring. Hydraulic Structures Design Manual. Balkema Pub., Rotterdam, Nethrlands.
5. Dargahi, B. 1987. Flow field and local scouring around a cylinder pier. Bulletin No.137, Hydraulic Labtoraory, Royal Institude of Technology, Stockholm, Sweden.
6. Ettema, R. 1980. Scour at bridge piers. Report No.216, University of Auckland, School of Engineering, New Zealand.
7. Ghorbani, B. and A. Karimi. 2007. A comparison of single and double submerged vanes effect on the scour occurring at a cylindrical pier. Pp. 260-276. Proc.of 6th Conf. of hydraul., Sep. 4-6, Shahrekord, Iran.
8. Kumar, V., K. Ranga Raju and N. Vittal. 1999. Reduction of local scour around bridge piers using slots and collars. J. Hydraul. Eng. ASCE 125(12):1302-1305.
9. Lauchlan, C.S. 1999. Pier scour countermeasures. PhD Thesis, University of Auckland, New Zealand.
10. Marelius, F. and S.K. Sinha .1998. Experimental investigation of flow past submerged vanes. J. Hydraul. Eng.

[Downloaded from jstmar.iut.ac.ir on 2026-11-29]

[DOR: 20.1001.1.24763594.1390.15.57.3.5]

ASCE 124(5): 542-545.
11. Masjedi, A; M. Shafaei Bejestan and A. Esfandi. 2010. Reduction of local scour at a bridge pier fitted with a collar in a 180 degree flume bend (case study: oblong pier). J. Hydraul. Eng. ASCE 22(5):669-673.
12. Odgaard, A. J. and A. Spoljaric. 1986. Sediment control by submerged vanes. J. Hydraul. Eng. ASCE 112(3): 1164-1181.
13. Odgaard, A. J. and Y. Wang .1987. Scour prevention at bridge piers. Pp. 523-527. Proc. of National Conference on Hydraulic Engineering, ASCE, Aug. 3-7, Williamsburg, Virginia, USA.
14. Odgaard, A. J. and Y. Wang .1991. Sediment management with submerged vanes. I: theory, J. Hydraul. Eng. ASCE 117(3): 267-283.
15. Sheppard, D. M., M. Odeh and T. Glasser. 2004. Large scale clear water local scour experiments. J. Hydraul. Eng. ASCE 130(10): 957-963.
16. Vittal, N., V.C.Kothyari and M. Haghighat. 1994. Clear-water scour around bridge pier group. J. Hydraul. Eng. ASCE 120(11):1309-1318.
17. Wang, Y., A. J. Odgaard and B.W.Melville. 1996. Sediment control at water intakes, J. Hydraul. Eng. ASCE 122(6): 353-359.
18. Zarrati, A. R., H. Gholami and M. Azizi. 2004. Application of collar to control scouring around rectangular bridge piers. J. Hydraul. Res. 42(1) :97- 103.

[Downloaded from jstnar.iut.ac.ir on 2026-11-29]

[DOR: 20.1001.1.24763594.1390.15.57.3.5]