

## بررسی تأثیر زبری‌های موضعی در کنترل و کاهش آبستگي موضعی تکیه‌گاه پل

حامد شهسوار<sup>۱\*</sup> و منوچهر حیدرپور<sup>۲</sup>

\*-نویسنده مسئول، دانشجوی دکتری سازه‌های آبی، دانشگاه فردوسی مشهد. hshahsavary@yahoo.com

۲- استاد گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه صنعتی اصفهان.

تاریخ پذیرش: ۹۵/۸/۲۳

تاریخ دریافت: ۹۵/۱/۲۹

### چکیده

یکی از مهم‌ترین مباحث مهندسی رودخانه آبستگي موضعی در تکیه‌گاه‌های پل است که به صورت گسترده‌ای در شش دهه گذشته مورد مطالعه قرار گرفته است. دلیل این امر تخریب اکثر پل‌ها به دلیل آبستگي موضعی اطراف پایه و تکیه‌گاه آن‌ها می‌باشد و نه به دلیل سازه‌ای. از این رو یافتن راهکاری برای کاهش عمق آبستگي موضعی از اهمیت خاصی برخوردار است. در روش‌های تغییر دهنده الگوی جریان، کنترل آبستگي موضعی به وسیله کاهش قدرت جریان‌های موثر در آبستگي موضعی صورت می‌گیرد. از جمله این روش‌ها می‌توان به زبری‌های موضعی اشاره کرد. در این تحقیق که آزمایشات در شرایط آبستگي آب‌زال و بر روی تکیه‌گاه نیم‌دایره‌ای انجام شد، اثر زبری‌های موضعی در عمق‌های مختلف و فواصل متفاوت و با ضخامت ثابت، مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که این زبری‌ها در کاهش عمق آبستگي موضعی و همچنین تأخیر در روند آبستگي موضعی موثر بوده است. به طوری که وجود یک مقدار بهینه برای فاصله بین زبری‌ها سبب افزایش عملکرد زبری‌ها شده است. همچنین در بهینه‌ترین فاصله بین زبری‌ها هر چه عمق زبری افزایش یابد موجب کاهش بیشتر عمق آبستگي موضعی و تأخیر بیشتر در روند آن خواهد شد.

**کلید واژه‌ها:** آبستگي موضعی، تکیه‌گاه پل، زبری‌های موضعی، ضخامت، فاصله.

### مقدمه

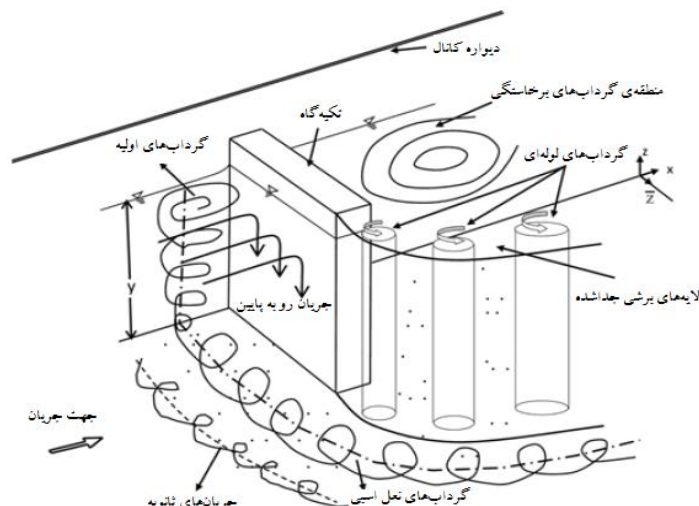
پل‌ها از جمله مهم‌ترین و پرکاربردترین سازه‌های رودخانه‌ای هستند و برای موارد مختلف مورد استفاده قرار می‌گیرند. آبستگي موضعی بر اثر ایجاد موانعی مانند پایه‌های پل‌ها، تکیه‌گاه‌های کناری و آبسکن‌ها در مسیر جریان و در اطراف این موانع رخ می‌دهد. این موانع می‌توانند سرعت موضعی جریان و آشفتگی آن را افزایش دهند و بسته به شکل سازه می‌توانند گردابه‌هایی ایجاد نمایند که نیروهای فرسایشی اضافی را بر بستر اطراف سازه اعمال نمایند. در نتیجه، نرخ حرکت رسوب و فرسایش به صورت موضعی در حوالی این سازه‌ها افزایش می‌یابد و منجر به پایین رفتن موضعی بستر نسبت به تراز عمومی بستر آبراهه می‌گردد (Shafai Bajestan, 1994). آبستگي موضعی در محل تکیه‌گاه پل‌ها موجب آسیب به پل‌ها و در موارد زیادی تخریب پل و پایین افتادن عرشه پل شده و منجر به خسارات مالی و جانی فراوانی می‌شود. علل اصلی خرابی بسیاری از پل‌ها قبل از پایان عمرشان، عدم توجه به معیارهای هیدرولیکی در طراحی و اجرا و نگهداری از آنهاست (Thompson, 2006).

بر اساس مطالعه‌های Melville (1992) ۱۰۸ شکست پل در فاصله سال‌های ۱۹۶۰-۱۹۸۴ در نیوزیلند رخ داده که ۲۹ مورد آن ناشی از آبستگي موضعی تکیه‌گاه پل بوده است. وی همچنین خاطر نشان می‌سازد که ۷۰ درصد هزینه‌های شکست پل در نیوزیلند

ناشی از آبستگي موضعی تکیه‌گاه پل بوده است. در ایران بر طبق آمار انجام شده مشکل آبستگي موضعی در پایه‌ها و تکیه‌گاه‌های پل عامل اصلی تخریب آن‌ها می‌باشد که از جمله می‌توان به پل تالار در استان مازندران اشاره کرد که در سال ۱۳۶۹ تحت تأثیر آبستگي موضعی قرار گرفت و در بدترین حالت در حدود ۱۰ تا ۱۴ متر عمق آبستگي موضعی ایجاد شد و منجر به معلق شدن بعضی پایه‌ها شد که برای پل بسیار خطرناک بود (Sturm, 2006).

تحقیقات در زمینه مکانیسم آبستگي موضعی در تکیه‌گاه پل‌ها نشان داده است که مکانیسم آبستگي موضعی در تکیه‌گاه پل‌ها بسیار شبیه به مکانیسم آبستگي موضعی در پایه پل‌ها است. جریان پایین‌رونده و گرداب اصلی در گوشه بالادست تکیه‌گاه پل، همواره با گرداب‌های ثانویه و گرداب‌های برخاستگی در قسمت میانی و گوشه‌ی انتهایی تکیه‌گاه پل باعث ایجاد فعل و انفعالات پیچیده‌ای بین سیال و مواد بستر می‌شود که دلیل اصلی آبستگي موضعی در تکیه‌گاه پل‌ها است.

در شکل (۱) میدان جریان پیرامون یک تکیه‌گاه پل نشان داده شده است. عوامل موثر آبستگي موضعی در اطراف تکیه‌گاه پل را می‌توان به جریان پایین‌رونده، گرداب موج کماتی، گرداب‌های اولیه (گرداب‌های نعل‌اسبی)، گرداب ثانویه و گرداب‌های برخاستگی تقسیم‌بندی نمود.



شکل ۱- میدان جریان در اطراف تکیه‌گاه پل (Koken and Constantinescu, 2008)

حرکت ذرات بستر، آزمایش‌هایی انجام داده‌اند. آزمایش‌ها در کانالی با عرض ۱/۵ متر و شیب طولی ۰/۰۰۱ و با نسبت سرعت  $u_w/u_c = 0.9$  (در حالت آب‌زال) انجام شد. آن‌ها با نصب طوق با اندازه‌های مختلف در ترازهای متغیر دریافتند که با قرارگیری طوق در تراز پایین‌تر از بستر نتایج بهتری حاصل می‌شود. بر اساس این آزمایش‌ها، زمانی که طوق در تراز ۵۰ میلی‌متر پایین‌تر از کف بستر قرار بگیرد، آبستتگی تا ۶۷ درصد کاهش می‌یابد. از روش‌های دیگر کاهش میزان آبستتگی تکیه‌گاه‌ها استفاده از دیواره‌های افقی به صورت بال‌ها در بالادست و پایین‌دست تکیه‌گاه می‌باشد (Li et al, 2006).

استفاده از کابل‌های پیچیده شده به دور پایه برای اولین بار توسط Dey et al (2006) به عنوان یک روش اقتصادی، ساده و قابل اجرا در کنترل و کاهش آبستتگی پیشنهاد گردید. در این روش کابل به صورت حلزونی به دور پایه پیچیده شده و منجر به تضعیف جریان روبه‌پایین و قدرت گردابه‌های نعل‌اسبی می‌گردد. Dey et al (2006) کارایی کابل پیچیده شده به دور پایه را در دو شرایط جریان موجدار و جریان پایدار مورد بررسی قرار دادند. نتایج آن‌ها نشان داد با افزایش قطر کابل و تعداد کابل‌های پیچیده شده به دور پایه و کاهش زاویه کابل‌ها میزان آبستتگی کاهش می‌یابد.

Izadinia و Heydarpour (2014) در مورد عملکرد کابل در کاهش آبستتگی آزمایش‌هایی انجام دادند، نتایج نشان داد که کابل پیچیده شده به دور پایه در کاهش آبستتگی مؤثر بوده و با کاهش زاویه پیچش و افزایش قطر کابل راندمان کابل افزایش می‌یابد.

ایجاد شکاف در پایه به عنوان راه حلی در کاهش گرادیان فشار بین سطح آب و بستر و همچنین کاهش قدرت جریان رو به پایین پیشنهاد شده است. Heydarpour (2002) تأثیر ایجاد شکاف در بدنه پایه‌های استوانه‌ای منفرد بر پدیده آبستتگی را

تخریب پل‌ها در نتیجه آبستتگی بی یا تکیه‌گاه پل‌ها موجب ترغیب روزافزون پژوهشگران برای مطالعه و بررسی پدیده آبستتگی در اطراف تکیه‌گاه پل و ارائه روش‌های کنترل و کاهش آبستتگی شده است. در چندین دهه گذشته مطالعات بسیاری جهت شناخت مکانیزم، توسعه آبستتگی و پدیده آبستتگی اطراف تکیه‌گاه، توسط افرادی چون Melville 1992، Molinas et al، 1998، Dey et al 2005 و Melville et al. 2006 انجام شده است.

روش‌های کاهش آبستتگی توسط محققین مختلف مورد بررسی قرار گرفته که هر یک از آن‌ها دارای مزایا و معایبی است. در روش‌های مقاوم‌سازی مواد مختلفی را در بستر، سواحل و در مجاورت آبسکن قرار می‌دهند تا توانایی و مقاومت بستر و دیواره‌ها در برابر آبستتگی افزایش یابد. از این روش‌ها می‌توان به سنگ‌چین اشاره کرد. در روش‌های تغییر دهنده الگوی جریان، کنترل آبستتگی به وسیله کاهش قدرت جریان صورت می‌گیرد. از این روش‌ها می‌توان به پره‌های مستغرق و طوق‌ها اشاره کرد. (Vice Presidency For Strategic Planning and Supervision of Iran, 2011).

Johnson et al. (2001) تأثیر صفحات مستغرق را در جلوگیری از آبستتگی تکیه‌گاه 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. استفاده از صفحه مدفون روشی برای کنترل آبستتگی در تکیه‌گاه پل‌ها با دیواره قائم و آبسکن‌های قائم است که توسط Alizadeh et al. (2012) معرفی شده است. آن‌ها به این نتیجه رسیدند که صفحه مدفون تا حدود ۶۰ درصد حداکثر عمق آبستتگی را کاهش می‌دهد.

Kayaturk et al. (2012) در زمینه عملکرد طوق بر پیشرفت آبستتگی اطراف تکیه‌گاه مستطیلی بلند، در آستانه

$d_{st}$  عمق آبستنگی در هر لحظه،  $d_s$  عمق آبستنگی نهایی،  $v_c$  سرعت بحرانی،  $v$  سرعت متوسط،  $t$  زمان،  $t_e$  زمان تعادل. هدف از مطالعه حاضر ارائه روشی جدید و کارآمد در کنترل و کاهش آبستنگی اطراف تکیه‌گاه پل و بررسی عوامل موثر در این روش می‌باشد. یکی از راه‌حل‌های کنترل و کاهش آبستنگی موضعی ایجاد زبری بر روی تکیه‌گاه پل است که برای ایجاد برجستگی روی پایه، در هنگام بتن‌ریزی حلقه‌های کروی و زاویه‌دار اجرا می‌شود. در این مطالعه با استفاده از زبری‌های ایجاد شده روی تکیه‌گاه نیم‌دایره‌ای، به بررسی تاثیر این زبری‌ها بر مقدار کاهش آبستنگی در تکیه‌گاه پرداخته شد.

### مواد و روش‌ها

آزمایش‌ها در کانال آزمایشگاهی به طول ۷، عرض ۰/۳۳ و ارتفاع ۰/۳۶ متر با کف افقی انجام گرفته است. یک پمپ وظیفه‌ی انتقال آب از مخزن اصلی به کانال را عهده‌دار است که حداکثر دبی آن ۱۰/۵ لیتر بر ثانیه است. کانال به یک مخزن حجم- زمان مجهز است که به کمک آن می‌توان دبی را اندازه‌گیری کرد. یک سرریز قابل تنظیم در پایین‌دست، عمق آب در کانال را تنظیم می‌نماید. منطقه انجام آزمایش‌ها در کانال، دارای طول ۱ متر و ارتفاع بستر ۱۰ سانتیمتر است که از ابتدای کانال ۴ متر فاصله دارد. در بالادست و پایین‌دست این محل، سکوهایی از جنس تفلون به طول ۱ متر و ارتفاع ۰/۱ متر نصب گردید، تا تغییر تراز مشهودی در بین سطح انجام آزمایش با کف کانال ایجاد نشود. (شکل ۲).

طول فلوم در بالادست محل قرارگیری تکیه‌گاه به گونه‌ای انتخاب شده که جریان کاملاً توسعه یافته باشد. در ادامه با توجه به پروفیل‌های سرعت برداشت شده توسط دستگاه سرعت‌سنج ADV در طول فلوم، پروفیل‌های سرعت در محل انجام آزمایشات بر روی هم منطبق شده‌اند، که نشان از توسعه یافتگی جریان می‌باشد، (شکل ۳).

مورد بررسی قرار داد. از جمله محدودیت‌های وارد بر شکاف آن است که راندمان شکاف برای جریان‌های زاویه‌دار کاهش یافته، همچنین وجود شکاف باعث کاهش استقامت و پایداری پایه پل می‌شود.

Molinas et al. (1998) آزمایش‌هایی را برای تکیه‌گاه‌های مستطیلی شکل و جریانی با عدد فرود بین ۰/۳ تا ۰/۹، انجام دادند. آنان با توجه به نتایج آزمایشات گزارش کردند که تنش برشی در تکیه‌گاه‌ها نسبت به تنش برشی جریان بالادست تکیه‌گاه تا ده برابر افزایش می‌یابد درحالی‌که سرعت جریان در محل جلوآمدگی تکیه‌گاه‌ها نسبت به سرعت جریان بالادست ۱/۵ برابر افزایش می‌یابد. Kwan (1988) نیز در آزمایش‌های خود بر روی تکیه‌گاه‌های دوزنقه‌ای و نیم‌دایره به این نتیجه رسید که حداکثر عمق آبستنگی برای مقدار ثابت  $(\tau_0 / \tau_c)$  (که نزدیک به واحد باشد)، با افزایش اندازه‌ی ذرات بستر، افزایش می‌یابد.

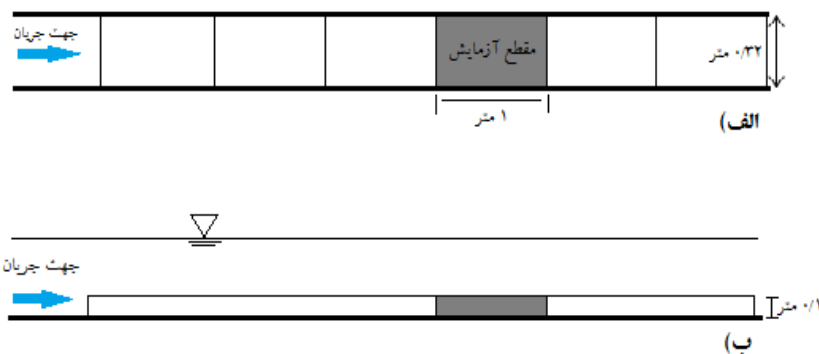
در اینجا برخی از روابط محاسبه روند آبستنگی در تکیه‌گاه توسط محققین مختلف ارائه شده است:

رابطه Oliveto و Hager (2002).

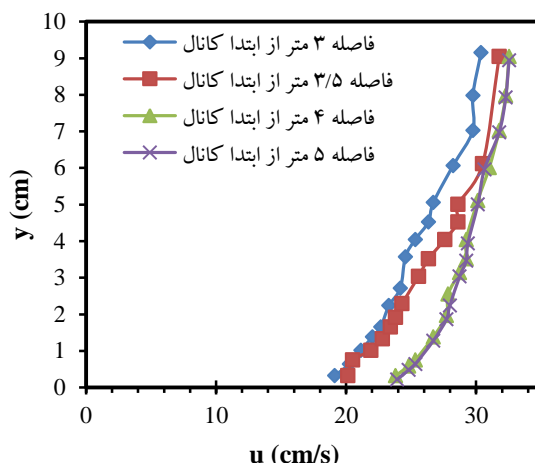
$$\frac{d_{st}}{L_R} = 0.068 N_s \sigma_g^{-0.5} F_d^{1.5} \log(T_R) \quad (1)$$

که در آن  $N_s$  عدد یا شماره شکل،  $L_R$  طول مبنا که برابر است با  $L_R = L^{2/3} y^{1/3}$  و  $T_R$  زمان بی‌بعد که برابر است با  $T_R = t \frac{(\Delta g d_{50})^{0.5}}{L_R}$ ،  $L$  طول تکیه‌گاه،  $y$  عمق جریان،  $d_{st}$  عمق آبستنگی در هر لحظه،  $d_{50}$  قطر متوسط ذرات،  $\sigma_g$  انحراف معیار هندسی ذرات. رابطه Coleman et al. (2003):

$$\frac{d_{st}}{d_s} = \exp \left[ -0.07 \left( \frac{V_c}{V} \right) \ln \left( \frac{t}{t_e} \right) \right]^{1.5} \quad (2)$$



شکل ۲- نمایی از کانال آزمایشگاهی (الف) پلان (ب) مقطع عرضی



شکل ۳ - نیمرخ های برداشته شده سرعت توسط دستگاه ADV در طول کانال

کانال به تدریج کاهش یافت. عمقی که در آن ذرات شروع به حرکت نمودند به عنوان عمق بحرانی در نظر گرفته شد که این عمق معادل ۱۱ سانتی متر بود و بنابر اصل پیوستگی  $u = \frac{Q}{Bz}$ ، عرض کانال است. سرعت بحرانی به دست آورده می شود:

$$Z_c = 11 \text{ cm} \rightarrow u_c = 29/82 \text{ cm/s}$$

همچنین با استفاده از رابطه ی Sutherland و Raudkivi (1981) به شکل زیر:

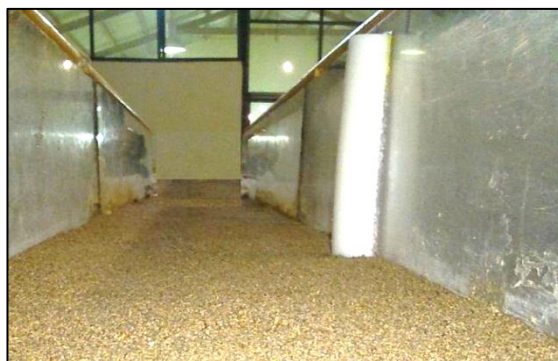
$$\frac{u_c}{u_{*c}} = 5.75 \log \frac{u_{*c} z_c}{\nu} + 5.5 \quad (3)$$

$\nu$  لزجت سینماتیک است. سرعت برشی بحرانی ( $u_{*c}$ ) برابر  $1/265$  سانتی متر بر ثانیه به دست آمد. با در نظر گرفتن سرعت برشی جریان ( $u_*$ ) برابر  $0/95$  سرعت برشی بحرانی و با استفاده از رابطه ی (۳) عمق جریان برابر  $12$  سانتی متر به دست آمد و در نهایت سرعت  $28/5$  سانتی متر بر ثانیه به دست می آید. در نتیجه نسبت سرعت جریان به سرعت بحرانی ( $u/u_c$ ) برابر  $0/95$  بدست آمده است.

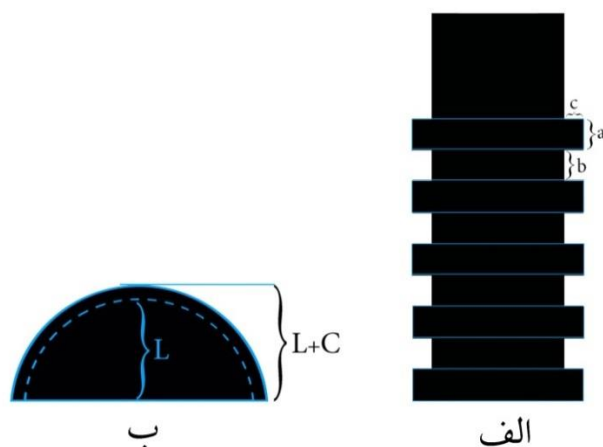
نحوه ی قرارگیری زبری ها نسبت به هم در شکل (۵) نشان داده شده است. همچنین به منظور بررسی تأثیر عمق زبری ها و تعیین فاصله مناسب بین زبری ها در کنترل و کاهش عمق آبستنگی مجموعاً ۱۰ آزمایش مطابق جدول (۱) انجام گرفت. ضخامت زبری ها در طول همه آزمایشات ثابت در نظر گرفته شده است.

برای از بین رفتن تأثیر دیواره های کانال بر آبستنگی موضعی، طبق نظر Raudkivi و Ettema (1983) فاصله محور تکیه گاه تا دیواره روبرویی کانال به طول تکیه گاه باید بزرگتر از  $6/25$  باشد. بر اساس این معیار و با کمی ملاحظات بیشتر طول تکیه گاه ها برابر با  $L=30$  میلی متر و از جنس پلاستیک تفلون و در تمامی آزمایش ها از تکیه گاه نیم دایره ای کوتاه ( $L/y < 1$ ) شعاع تکیه گاه و  $y$  عمق جریان) استفاده شده است. ارتفاع تکیه گاه ها با توجه به این نکته که تکیه گاه ها نباید در آب مستغرق گردد برابر  $33$  سانتی متر در نظر گرفته شده است. همچنین طبق نظر Raudkivi و Ettema (1983) برای جلوگیری از تشکیل ریبیل در طول آزمایش باید قطر متوسط ذرات بیش از  $0/7$  میلی متر باشد. Melville (1992) بیان نمودند زمانیکه انحراف معیار هندسی ذرات کمتر از  $1/3$  می باشد می توان از تأثیر غیریکنواختی ذرات بر عمق آبستنگی صرف نظر کرد. بنابراین طبق معیارهای فوق فاصله بین سکوها به وسیله رسوبات غیرچسبنده و با قطر متوسط  $0/72$  میلی متر، وزن مخصوص  $2/65$  و انحراف معیار هندسی  $1/13$  برگزید. برای ثابت ماندن خصوصیات جریان در طول کانال از جنس رسوب انتخاب شده برای محل آزمایش روی سکوها چسبانده شد. شکل (۴) نمایی از مدل تکیه گاه و نحوه ی قرارگیری آن در کانال را نشان می دهد.

با توجه به اینکه حداکثر عمق آبستنگی در شرایط جریان آب زلال و در هنگامی که شرایط جریان در فلوام کمتر از شرایط آستانه حرکت باشد، رخ می دهد، همه آزمایش ها در این شرایط صورت گرفت (Shafai Bajestan, 1994). بنابراین برای تعیین آستانه حرکت ذرات، آزمایشی بدون حضور تکیه گاه در کانال انجام شد. جریان با دبی  $10/5$  لیتر بر ثانیه و عمق  $15$  سانتی متر در کانال برقرار گردید. در این عمق هیچ حرکتی در ذرات بستر مشاهده نشد. پس از آن با استفاده از سرریز انتهایی عمق آب در



شکل ۴- مدل آزمایشگاهی تکیه‌گاه نصب شده در کانال



شکل ۵- طرح شماتیک از زبری‌ها روی تکیه‌گاه الف) نما از روبرو ب) پلان

جدول ۱- ابعاد زبری‌های لبه‌ی تیز

شماره آزمایش	Q(l/s)	a	b	c
۱	۱۰/۵	۰	۰	۰
۲	۱۰/۵	۰/۰۵ L	۰/۱۵ L	۰/۱ L
۳	۱۰/۵	۰/۰۵ L	۰/۴۵ L	۰/۱ L
۴	۱۰/۵	۰/۰۵ L	۰/۷۵ L	۰/۱ L
۵	۱۰/۵	۰/۰۵ L	۰/۱۵ L	۰/۰۷۵ L
۶	۱۰/۵	۰/۰۵ L	۰/۴۵ L	۰/۰۷۵ L
۷	۱۰/۵	۰/۰۵ L	۰/۷۵ L	۰/۰۷۵ L
۸	۱۰/۵	۰/۰۵ L	۰/۱۵ L	۰/۰۵ L
۹	۱۰/۵	۰/۰۵ L	۰/۴۵ L	۰/۰۵ L
۱۰	۱۰/۵	۰/۰۵ L	۰/۷۵ L	۰/۰۵ L

- عوامل مربوط به هندسه کانال: عرض کانال در مقطع قبل از تکیه‌گاه ( $B_1$ )، عرض کانال در مقطع تنگ شده ( $B_2$ ) و شیب کانال (S).  
- پارامترهای مربوط به هندسه تکیه‌گاه: طول تکیه‌گاه (L)، فاصله‌ی زبری‌ها (b)، بیرون زدگی یا عمق زبری (c) و ضخامت یا ارتفاع زبری (a).

#### تحلیل ابعادی

قبل از انجام آزمایش‌ها ابتدا به واسطه تحلیل ابعادی، پارامترهای مهم در پدیده آبشستگی در اطراف دماغه تکیه‌گاه بررسی شد. عوامل مورد استفاده در تحلیل ابعادی عبارتند از:

تبادل، به قطر پایه بستگی دارد و زمانی است که در آن حفره‌ی آبشستگی تا عمقی توسعه یابد که سرعت افزایش آبشستگی در آن بیشتر از ۵ درصد قطر پایه در طول ۲۴ ساعت متوالی نباشد.

از آنجا که هدف این تحقیق مقایسه توسعه‌ی زمانی گودال آبشستگی تکیه‌گاه شاهد با تکیه‌گاه‌های زبری‌دار بوده است لذا معیار Kummar et al. (1999) برای زمان تبادل انتخاب گردید. با در نظر گرفتن این معیار، زمان تبادل برابر با ۲۴ ساعت به دست آمد.

Altinbilek و Yanmaz (1991) و همچنین Mia و Nago (2003) نشان دادند که بیشترین مقدار آبشستگی پس از گذشت ۳ تا ۴ ساعت از شروع آزمایش اتفاق می‌افتد. با توجه به شکل (۶) مشخص گردید که ۹۰ درصد از عمق تبادل آبشستگی پس از گذشت ۸ ساعت از شروع آزمایش بدست می‌آید. از این رو معمولاً زمان انجام آزمایش‌ها کمتر از زمان تبادل آبشستگی انتخاب می‌گردد. در این تحقیق به منظور مقایسه روش‌های مختلف کنترل آبشستگی زمان ۸ ساعت به عنوان زمان توقف آزمایش‌ها در نظر گرفته شد. در شکل (۶) محور افقی زمان بر حسب دقیقه و محور عمودی عمق آبشستگی در هر لحظه به طول تکیه‌گاه می‌باشد. سایر نمودارها، محور افقی بر حسب نسبت زمان به زمان تبادل هشت ساعته ( $t/t_0$ ) و محور عمودی نسبت عمق گودال آبشستگی در هر لحظه به طول تکیه‌گاه ( $d_s/L$ ) آورده شده است.

در شکل (۷) توسعه زمانی عمق آبشستگی بی‌بعد برای تکیه‌گاه پل با نتایج Oliveto و Hager (2002) و Coleman et al. (2003) در شرایط آبشستگی آزلال مقایسه شده است. مقایسه‌ها نشان از تطابق خوب روند آبشستگی تحقیق حاضر با دو تحقیق دیگر می‌باشد. همان‌طور که از شکل پیداست آبشستگی در اوایل زمان با سرعت بیشتری گسترش می‌یابد و با گذشت زمان به یک تعادل نسبی دست پیدا می‌کند. در معادله Coleman et al. (2003) پارامترهای موثر بر آبشستگی مانند  $\rho_s$  و  $d_{50}$  به طور کلی و در معادله Oliveto و Hager (2002) نیز  $\sigma_g$ ،  $d_{50}$  و  $\rho_s$  را به صورت مستقیم وارد کردند که به نظر می‌رسد دلیل نزدیکی نمودار این تحقیق با نمودار این دو تحقیق می‌باشد. علاوه بر این به دلیل استفاده از پارامترهای بی‌بعد سرعت و زمان در معادله Coleman et al. (2003) روند آبشستگی تحقیق حاضر با ایشان نزدیک‌تر است. به نظر می‌رسد دلیل اختلاف کمی که در روند آبشستگی این تحقیق با Oliveto و Hager (2002) مشاهده می‌شود، استفاده از  $u/u_c$  بزرگتر و نزدیک به یک این تحقیق نسبت به  $u/u_c$ ‌های به کار گرفته شده توسط Oliveto و Hager باشد.

- عوامل مربوط به هیدرولیک جریان: سرعت متوسط جریان در مقطع قبل از تکیه‌گاه ( $v$ )، عمق جریان ( $y$ )، حداکثر عمق آبشستگی دماغه تکیه‌گاه ( $h_s$ )، شتاب ثقل ( $g$ )، طول گودال آبشستگی ( $L_1$ ) و عرض گودال آبشستگی ( $w$ ).

- عوامل مربوط به اندازه رسوبات بستر: قطر متوسط ذرات ( $D_{50}$ )، چگالی رسوبات بستر ( $G_s$ ) و سرعت آستانه حرکت رسوبات بستر ( $v_c$ ).

- عوامل مربوط به خواص سیال: جرم مخصوص سیال ( $\rho$ ) و لزوجت دینامیکی ( $\mu$ ).

با در نظر گرفتن جرم مخصوص سیال ( $\rho$ )، عمق جریان ( $y$ ) و سرعت متوسط جریان ( $v$ ) به عنوان پارامترهای تکراری و با استفاده از روش باکینگهام می‌توان پارامترهای بدون بعد مهم را به صورت زیر بدست آورد:

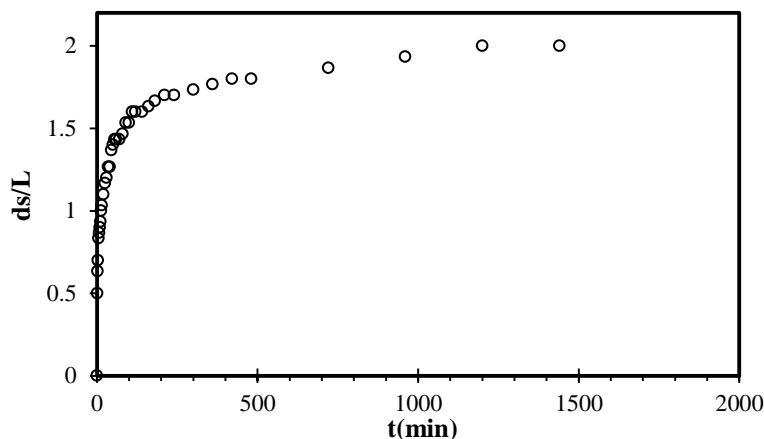
$$\frac{h_s}{y}, \frac{w}{y}, \frac{L_1}{y} = f\left(\frac{b}{y}, \frac{c}{y}, \frac{a}{y}, \frac{B_1}{y}, \frac{B_2}{y}, \frac{L}{y}, \frac{v}{y}, \frac{v_c}{y}, Re, Fr, \frac{v}{\sqrt{g(G_s-1)D_{50}}}, s\right) \quad (3)$$

با توجه به این که قطر متوسط مصالح در تمام آزمایش‌ها برابر می‌باشد و اثر پارامتر سرعت در عدد فرود جریان لحاظ شده است و عدد فرود در آزمایشات ثابت می‌باشد، در نتیجه از پارامترهای مربوطه صرف نظر شده است. به علاوه به علت اینکه محدوده عدد رینولدز برای این آزمایش‌ها نزدیک ۲۰۰۰۰ می‌باشد و جریان آشفته است، از پارامتر  $Re$  صرف نظر شد. پارامترهای  $S$ ،  $\frac{B_1}{y}$ ،  $\frac{B_2}{y}$  نیز به دلیل ثابت بودن کنار گذاشته شدند. همچنین چون عمق نهایی گودال آبشستگی در این مقاله مد نظر است، از طول و عرض گودال آبشستگی چشمپوشی شده است، در نهایت داریم:

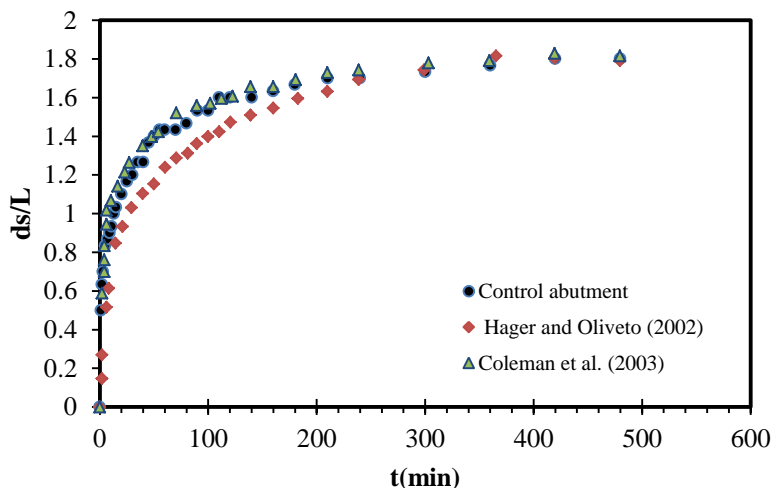
$$\frac{h_s}{y} = f\left(\frac{b}{y}, \frac{c}{y}\right) \quad (4)$$

## نتایج و بحث

با توجه به اهمیت زمان تبادل با مروری بر مطالعات صورت گرفته مشخص می‌شود که محققین معیارهای مختلفی را برای زمان تبادل آبشستگی به کار برده‌اند. Kummar et al. (1999) زمانی را به عنوان زمان تبادل آبشستگی در نظر گرفت که سه ساعت پس از آن، عمق آبشستگی کمتر از یک میلی‌متر تغییر کند. Vittal et al. (1994)، زمانی را که شش ساعت پس از آن، عمق آبشستگی کمتر از یک میلی‌متر تغییر کند را به عنوان زمان تبادل آبشستگی انتخاب کردند. Chiew و Melville (1999)، تعریف جدیدی برای زمان تبادل ارائه دادند. طبق تعریف آنها زمان



شکل ۶- روند آبستگي تکیه گاه شاهد در مقابل زمان



شکل ۷- مقایسه نتایج آبستگي با نتایج Hager و Oliveto (2002) و Coleman et al. (2003)

می‌شود. تأثیر زبری‌ها زمانی به صورت حداکثر خواهد بود که علاوه بر انتخاب بیشترین مقدار سطح زبری موجود در مسیر جریان رو به پایین، فاصله مناسب بین زبری‌ها رعایت شده باشد. اگرچه کم بودن فاصله بین زبری‌ها سبب افزایش سطح مؤثر زبری‌های موجود در مسیر جریان رو به پایین می‌شود ولی از طرفی این امر سبب کاهش میزان برخورد جریان با زبری‌ها می‌شود. به گونه‌ای که در صورت برخورد جریان با زبری‌هایی که فاصله کمی نسبت به هم دارند؛ شرایط لازم جهت راه‌یابی میدان جریان به فضای بین زبری‌ها مهیا نمی‌شود. در نتیجه از کارایی زبری‌ها کاسته می‌شود.

بنابراین با توجه به نتایج بدست آمده از آزمایشات مشاهده شد که نزدیکی بیش از حد زبری‌ها به یکدیگر باعث افزایش طول مؤثر تکیه‌گاه  $(L+c)$  در مقابل جریان و کاهش کمتر آبستگي نسبت به دو فاصله دیگر می‌شود. با افزایش فاصله‌ی بین زبری‌ها از میزان حداقلی که برای فاصله بین زبری‌ها در نظر گرفته شده است، روند و عمق آبستگي نهایی کاهش می‌یابد که به نظر

شکل (۸) مقایسه توسعه زمانی آبستگي در تکیه‌گاه شاهد و تکیه‌گاه‌های داری زبری با عمق ثابت  $(c=0.1L)$  و در فواصل مختلف در ماکزیم نقطه را نشان می‌دهد.

همان‌طور که در شکل (۸) دیده می‌شود وجود زبری‌ها از قدرت جریان روبه پایین می‌کاهد و از آن‌جا که گردابه‌های اولیه (نعل اسبی) در اثر جریان روبه پایین به وجود می‌آیند، گردابه‌های اولیه ضعیف‌تر شده و از شدت و روند آبستگي و همچنین عمق نهایی آبستگي کاسته می‌شود.

با توجه به شکل (۸) و ثابت بودن میزان بیرون‌زدگی زبری‌ها (c)، با افزایش فاصله بین آنها از  $0.15L$  به  $0.45L$  شدت توسعه گودال آبستگي کاهش می‌یابد. در صورتی که با افزایش دوباره این فاصله به مقدار  $0.75L$  مقدار آبستگي افزایش می‌یابد. با توجه به شکل (۸) اختلاف موجود بین دو نمودار  $b=0.45L$  و  $b=0.75L$  بیانگر نقش مؤثر فاصله موجود بین زبری‌ها است؛ بنابراین هر چه سطح زبری‌های موجود در مسیر جریان رو به پایین بیشتر باشد انرژی جریان رو به پایین بیشتر مستهلک

اطمینان بالا مستلزم افزایش دامنه این نمودار و انجام آزمایش های تکمیلی در مطالعات آینده می باشد.

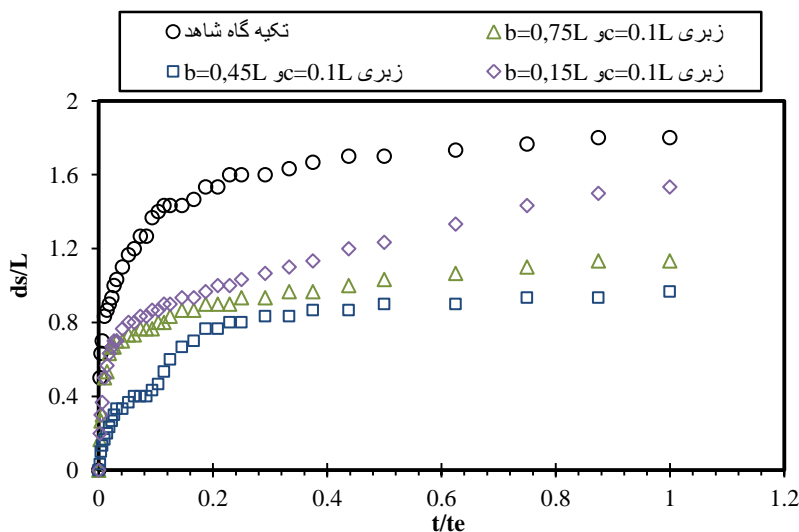
با توجه به شکل (۹) به ازای مقادیر  $b/L < 0.22$  افزایش بیرون زدگی ها در ابتدا باعث کاهش عمق آبستنگی ولی افزایش بیشتر آن سبب کاهش عملکرد زبری شده است که به دلیل فاصله کم زبری ها و افزایش عمق آن ها موجب افزایش طول مؤثر تکیه گاه با وجود زبری شده در نتیجه عمق آبستنگی افزایش می یابد. برای مقادیر  $0.22 < b/L < 0.56$  با افزایش فاصله بین زبری ها سبب افزایش کارایی زبری ها می شود. همان طور که دیده می شود با افزایش عمق زبری (بیرون زدگی زبری) مقدار آبستنگی در بهترین حالت فاصله ی بین زبری ها کاهش می یابد. افزایش فاصله بین زبری ها به ازای مقادیر  $b/L > 0.56$  سبب کاهش سطح مؤثر موجود در مسیر جریان روبه پایین و در نتیجه کاهش عملکرد زبری ها می شود.

حال با انتخاب  $b=0.45L$  به عنوان مؤثرترین فاصله بین زبری ها، به بررسی میزان عمق زبری ها در کاهش روند آبستنگی پرداخته می شود. شکل (۱۰) مقایسه توسعه آبستنگی در تکیه گاه شاهد و تکیه گاه های داری زبری با عمق های مختلف و در فاصله ثابت  $(b=0.45L)$  در بیشترین نقطه را نشان می دهد.

می رسد احتمالاً دلیل این کاهش، افزایش فاصله ی بین زبری ها است که باعث کاهش طول مؤثر تکیه گاه می شود. از طرفی می توان گفت با افزایش فاصله بین زبری ها، فضای بیشتری برای به وجود آمدن جریان روبه پایین و افزایش سرعت این جریان ایجاد می شود. در نتیجه برخورد این جریان با زبری ها موجب مستهلک شدن جریان روبه پایین می شود، به عبارتی می توان گفت با افزایش فاصله ی میان زبری ها نسبت به کمترین حالت، کاهش عمق نهایی آبستنگی مشاهده می گردد.

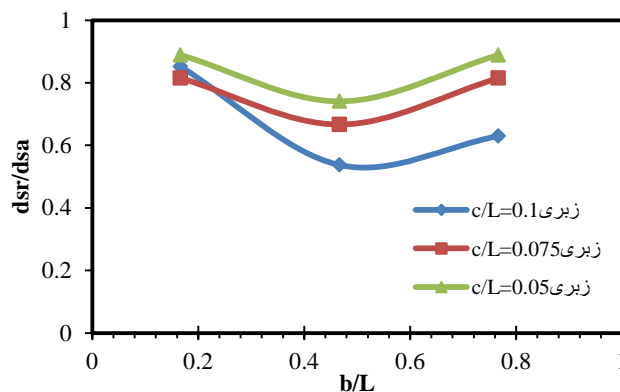
از سوی دیگر این افزایش فاصله، دارای یک مقدار ماکزیمم است به طوریکه بعد از این مقدار، با افزایش فاصله بین زبری ها عمق آبستنگی مجدداً افزایش می یابد. که احتمالاً به دلیل قدرتمندتر شدن جریان روبه پایین و کاهش تعداد زبری ها باشد که در نهایت منجر به کاهش سطح مؤثر در مسیر جریان روبه پایین می شود. همچنین می توان گفت با افزایش مجدد فاصله زبری ها، تماس زبری در قامت تکیه گاه با بستر کمتر شده که منجر به افزایش دوباره آبستنگی نسبت به حالت قبل می گردد.

برای دید بهتر، شکل (۹) روند تغییرات عمق آبستنگی موضعی را برای  $b/L$  های مختلف و سه مقدار  $c/L$  هنگامی که  $a/L$  برابر با  $0.5$  باشد نشان می دهد. البته آوردن چنین روندی با

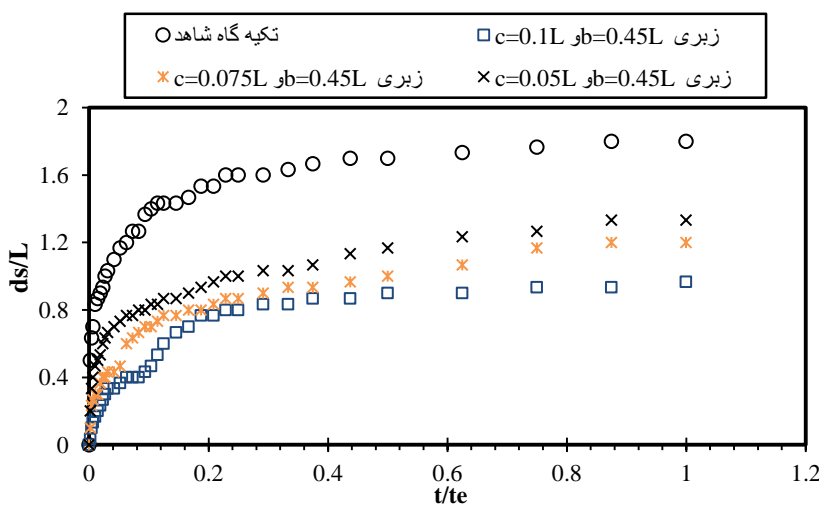


شکل ۸- تأثیر فاصله زبری ها در روند آبستنگی





شکل ۹- تأثیر فاصله و عمق زبری در کاهش عمق نهایی آبشستگی



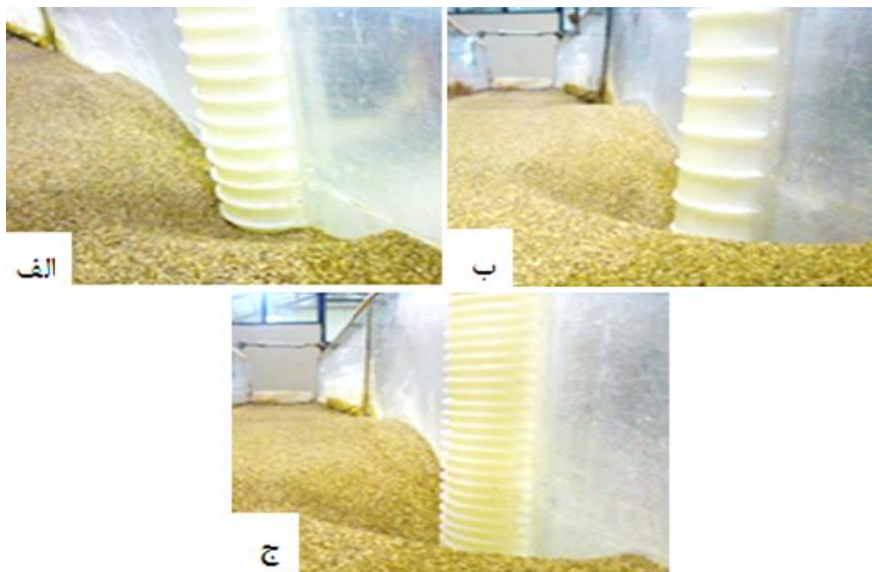
شکل ۱۰- تأثیر اندازه زبری‌ها در روند آبشستگی

تکیه‌گاه دارای عمق زبری  $(c=0.1L)$  و فاصله بین زبری‌ها  $(b=0.45L)$ ، همراه با گودال آبشستگی آن می‌باشد. قسمت ب و ج به ترتیب مربوط به تکیه‌گاه  $(b=0.75L)$  و  $(c=0.1L)$  و  $(b=0.15L)$  و  $(c=0.1L)$  می‌باشد. همان‌طور که مشخص است گودال شکل الف نسبت به دو شکل دیگر دارای گودال آبشستگی کوچک‌تر، هم از نظر عمق و نیز اندازه می‌باشد.

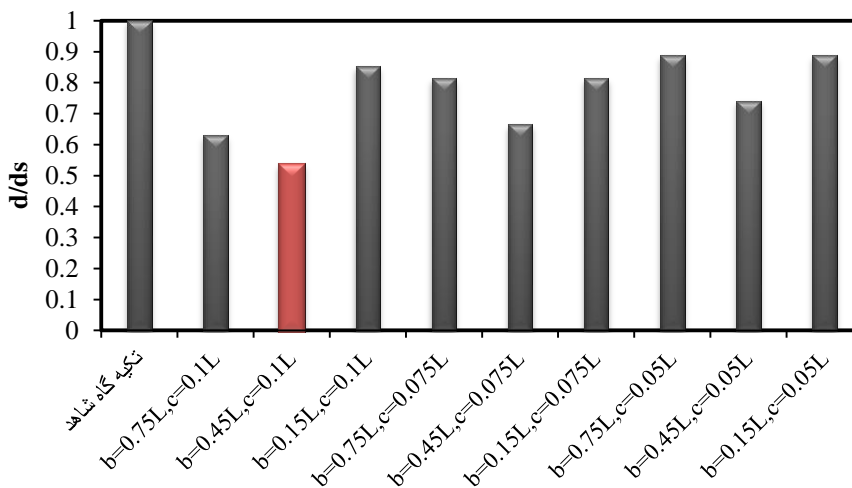
سایر آزمایش‌ها با اعماق زبری متفاوت و نیز فاصله‌های مختلف مطابق جدول (۱) انجام شد، که میزان عمق آبشستگی نهایی و درصد کاهش مقدار آن نسبت به تکیه‌گاه شاهد در شکل (۱۲) آمده است. محور افقی این نمودار مربوط به هر کدام از تکیه‌گاه‌ها و محور قائم آن به صورت بی‌بعد عمق آبشستگی نهایی هر تکیه‌گاه به عمق آبشستگی تکیه‌گاه شاهد  $(d_s/d_{se})$  می‌باشد.

همچنین با توجه به شکل (۱۲) تکیه‌گاه دارای عمق زبری  $(c=0.1L)$  و فاصله بین زبری‌ها  $(b=0.45L)$  که با رنگ قرمز مشخص شده است بیشترین عملکرد را در کاهش عمق آبشستگی دارد.

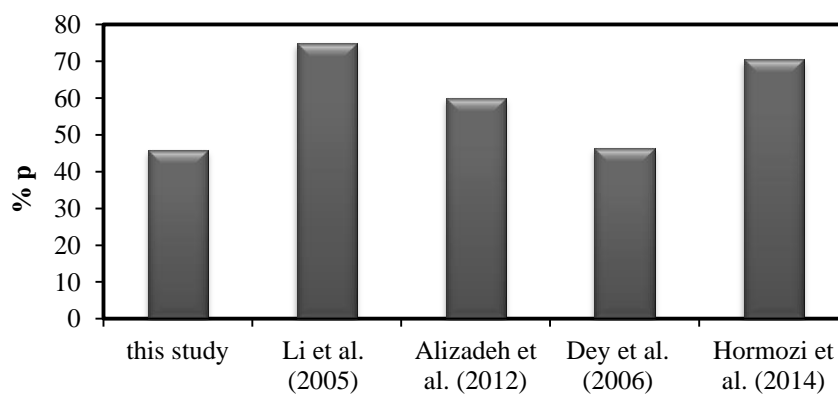
بنابر شکل (۱۰) هرچه عمق زبری افزایش یابد موجب کاهش بیشتر عمق آبشستگی و نیز تأخیر در روند آن خواهد شد. به نظر می‌رسد با افزایش عمق زبری‌ها، جریان رو به پایین هنگام برخورد به آن‌ها بیشتر منحرف شده و از برخورد مستقیم و شدید جریان به بستر جلوگیری و موجب کاهش بیشتر آبشستگی نسبت به تکیه‌گاه‌هایی که دارای زبری‌های کوچک‌تر هستند، می‌شود. همچنین ذکر این نکته قابل بیان است که، هنگامی بستر دقیقاً زیر هر زبری قرار می‌گیرد، زبری همانند یک طوقه کوچک عمل کرده و موجب یک تأخیر زمانی کوتاه در روند آبشستگی می‌شود، که به عنوان نمونه این رخداد در توسعه آبشستگی مربوط به  $(b=0.45L)$  و  $(c=0.1L)$  در بازه  $0.05$  تا  $0.09$  دیده می‌شود. گمان می‌رود زبری‌هایی که در محدودی بالای بستر قرار می‌گیرند، باعث کاهش قدرت جریان‌های روبه‌پایین و زبری‌هایی که در محدوده زیر بستر قرار می‌گیرند باعث کاهش قدرت گرداب‌های اولیه و فعل‌وانفعالات درون گودال آبشستگی می‌شوند. شکل (۱۱) نمونه‌هایی از آزمایش‌های صورت گرفته را بر روی تکیه‌گاه‌های زبری‌دار به تصویر می‌کشد، قسمت الف این شکل مربوط به



شکل ۱۱- تصاویری از تکیه گاه های زبری دار مدل شده



شکل ۱۲- مقدار آبستگی نهایی هر یک تکیه گاه ها



شکل ۱۳- درصد کاهش آبستگی روش های مختلف محققین

قرارگیری زبری‌ها نسبت به یکدیگر می‌باشد. که در نهایت با مقایسه‌ی تمامی نتایج با یکدیگر می‌توان گفت بخش عمده‌ای از تفاوت نتایج، به دلیل نوع روش مورد استفاده برای ارزیابی میزان عمق آبستنگی می‌باشد.

شکل (۱۳) میزان کاهش آبستنگی روش‌های استفاده شده هر یک از محققان ذکر شده را نشان می‌دهد. در این میان به نظر می‌رسد نتایج روش استفاده از کابل تقریباً به نتایج بررسی حاضر نزدیکتر است. که نشان از شباهت قرارگیری زبری موضعی حول تکیه‌گاه با کابل پیچیده شده در اطراف پایه پل می‌باشد.

### نتیجه‌گیری

در تحقیق حاضر از روش زبری موضعی در تکیه‌گاه به منظور کنترل و کاهش آبستنگی استفاده شده است. نتایج نشان داد که این زبری‌ها در کاهش عمق آبستنگی و همچنین تأخیر در روند آبستنگی مؤثر بوده است. از عوامل مؤثر بر عملکرد زبری‌ها:

۱. تأثیر فاصله بین زبری‌هاست، کم بودن فاصله بین زبری‌ها که موجب کاهش فضای مناسب بین زبری‌ها و افزایش طول تکیه‌گاه می‌شود. همچنین زیاد بودن فاصله بین زبری‌ها موجب کاهش سطح مؤثر موجود در مسیر جریان رو به پایین و کمبود تعداد زبری می‌شود، بنابراین وجود یک مقدار بهینه برای فاصله بین زبری‌ها سبب افزایش عملکرد زبری و کاهش مقدار آبستنگی می‌گردد.

۲. تأثیر اندازه اعماق زبری بر عملکرد زبری، که در رابطه با فاصله بین زبری‌ها می‌باشد. در بهینه‌ترین فاصله بین زبری‌ها هر چه عمق زبری افزایش یابد موجب کاهش بیشتر عمق آبستنگی و نیز تأخیر در روند آن خواهد شد.

۳. زبری‌هایی که در محدودی بالای بستر قرار می‌گیرند، باعث کاهش قدرت جریان‌های روبه‌پایین و زبری‌هایی که در محدوده زیر بستر قرار می‌گیرند باعث کاهش فعالیت گرداب‌های اولیه می‌شوند.

۴. به صورتی که تکیه‌گاه با عمق زبری  $c=0/1L$  و فاصله بین زبری‌ها  $b=0/45L$  و در ضخامت ثابت زبری، موجب کاهش ۴۶ درصدی میزان آبستنگی نسبت به تکیه‌گاه بدون زبری شده است. بنابراین می‌توان از زبری‌های موضعی به عنوان یک روش عملی در هنگام بتن‌ریزی و کم هزینه و کارآمد در کنترل و کاهش آبستنگی استفاده کرد.

با توجه به جدید بودن روش استفاده از زبری موضعی در ارزیابی عمق آبستنگی در تکیه‌گاه، در ادامه به مقایسه‌ی این روش با سایر روش‌های انجام شده برای تعیین عمق آبستنگی پرداخته می‌شود.

Li et al. (2005) مطالعاتی در زمینه تأثیر طوق در کاهش آبستنگی اطراف تکیه‌گاه دیوارباله‌ای در حالت آب‌زلزل انجام دادند، آن‌ها دریافتند که اندازه طوق مؤثرترین پارامتر در کاهش میزان عمق آبستنگی است و همچنین به این نتیجه رسیدند که عمق آبستنگی تا ۷۵ درصد کاهش می‌یابد.

Alizadeh et al. (2012) شش زاویه‌ی (صفر، ۲۲، ۳۰، ۳۷/۵، ۴۵ و ۹۰ درجه) قرار گیری پره مدفون را در شرایط آب‌ و هوایی مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها به این نتیجه رسیدند که پره‌های مدفون قادرند عمق آبستنگی را از ۳۰ الی ۶۰ درصد کاهش دهند که بیشترین مقدار مربوط به زاویه ۳۷/۵ درجه با ۶۰ درصد کاهش و کمترین آن صفر درجه با ۳۰ درصد کاهش می‌باشد.

Dey et al. (2006) کارایی کابل پیچیده شده به دور پایه را مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها آزمایش‌هایی را در شرایط جریان پایدار در کانالی به طول ۲۰ متر، عرض ۰/۹ متر و عمق ۰/۷ متر با قطر پایه برابر ۲۰ سانتی‌متر و اندازه متوسط ذرات برابر با ۰/۲۶ میلی‌متر انجام دادند. نتایج آن‌ها نشان داد با افزایش قطر کابل و تعداد کابل‌های پیچیده شده به دور پایه و کاهش زاویه کابل‌ها میزان آبستنگی کاهش می‌یابد. بیشترین مقدار کاهش آبستنگی برابر ۴۶/۳ درصد برای شرایطی که زاویه کابل برابر ۱۵ و نسبت قطر کابل به پایه برابر ۰/۸ است گزارش گردید.

Hormozi et al. (2014) به بررسی اثر زبری‌های مستطیلی شکل بر کاهش میزان آبستنگی موضعی در اطراف پایه پل مربعی شکل در کانالی به طول ۷/۳۰ متر، عرض ۰/۵۶ متر و ارتفاع ۰/۵۶ متر با شیبی طولی معادل ۰/۰۰۲۸ پرداختند و به این نتایج دست یافتند که به‌طور کلی زبری‌ها باعث کاهش عمق آبستنگی نسبت به حالت بدون زبری می‌شوند. همچنین بیشترین کاهش عمق آبستنگی مربوط به زبری با ارتفاع  $h=3/8D$ ، عرض  $b=1/16D$  و فواصل قرارگیری  $l=1/4D$  بوده است. به‌طور کلی نتایج نشان داد که زبری می‌تواند تا ۷۰ درصد باعث کاهش عمق آبستنگی پایه شود که میزان این کاهش به نحوه چیدمان زبری، ابعاد و شرایط جریان بستگی دارد.

همراستا با یافته‌های این محققان نتایج مطالعه حاضر حاکی از کاهش ۴۶ درصدی عمق نهایی آبستنگی در بهترین حالت

### منابع

- Alizadeh, V.N., Saneie, M., and Azhdary Moghaddam, M. 2012. Experimental investigations on effect of buried vane' angels to control scour at vertical wall abutments and spur dykes. *9th International Congrees on Civil Engineering. Isfahan. Iran.*
- Coleman, S.E., Lauchlan, C.S. and Melville, B.W., 2003. Clear-water scour development at bridge abutments. *Journal of Hydraulic Research*, 41(5), pp.521-531.

- 3- Dey, S. and A. K. Barbhuiya 2005. Time variation of scour at abutments. *Journal of Hydraulic Engineering*, 131(1): 11-23.
- 4- Dey, S., Sumer, B. M., Fredsøe, J. 2006. Control of scour at vertical circular piles under waves and current. *Journal of Hydraulic Engineering*, 132(3): 270-279.
- 5- Heidarpour, M. 2002. Control and reduction of local scour at bridge piers by using slot. *Proceeding of River Flow, Louvain, Belgium*, 2:1069-1072.
- 6- Hormozi, M., Taleb Bidokhti, N., Shafai Bajestan, M. 2014. 'Experimental Investigation of Applications of Artificial Roughness for Bridge Pier Scour Reduction, *Journal of Hydraulics*, 9(2), pp. 11-21. (In Persian)
- 7- Izadinia, E., Heydarpoor, M. 2014. Investigation and Comparison of Efficiency of Cable and Groove in Protection Against Scouring, *Irrigation Sciences and Engineering*, 37(1), pp. 23-32. (In Persian)
- 8- Johnson, P., Hey, R., Tessier, M., and Rosgen, D. 2001. Use of vanes for control of scour at vertical wall abutments. *Journal of Hydraulic Engineering*, 127(9): 772-778.
- 9- Kayaturk, S. Y., M. A. Kokpinar, and M. Gogus. 2004. Effect of collar on temporal development of scour around bridge abutments. *2nd International Conference on scour and erosion, IAHR, Singapore*, 7: 14-17.
- 10- Koken, M. and Constantinescu, G., 2008. An investigation of the flow and scour mechanisms around isolated spur dikes in a shallow open channel: 1. Conditions corresponding to the initiation of the erosion and deposition process. *Water Resources Research*, 44(8): 1-16.
- 11- Kummar, V., Ranga Raju, K. G., and N. Vittal. 1999. Reduction of local scour around bridge piers using slot and collar. *Journal of Hydraulic Engineering, ASCE*, 125(12): 1302-1305.
- 12- Kwan, T.F., 1988. A study of abutment scour. School of Engineering, University of Auckland, Auckland, New Zealand (No. 451). Report.
- 13- Li, H., Barkdoll, B., Kuhnle, R., and Alonso, C. 2006. Parallel walls as an abutment scour countermeasure. *Journal of Hydraulic Engineering*, 132(5): 510-520.
- 14- Li, H.-M. T., R. Kuhnle, and B. M. T. Barkdoll. 2005. Countermeasures against scour at abutments. *Lab Publ.* 49: 150.
- 15- Melville, B. 1992. Local scour at bridge abutments. *Journal of Hydraulic Engineering*, 118(1): 615-631.
- 16- Melville, B. W. and Y. M. Chiew. 1999. Time scale for local scour at bridge piers. *Journal of Hydraulic Engineering, ASCE*, 125(1): 59-65.
- 17- Melville, B., van Ballegooy, S., Coleman, S., and Barkdoll, B. 2006. Scour countermeasures for wing-wall abutments. *Journal of Hydraulic Engineering*, 132(6): 563-574.
- 18- Mia, F. and H. Nago. 2003. Design Method of Time-Dependent Local Scour at Circular Bridge Pier. *Journal of Hydraulic Engineering, ASCE*, 117(7): 891-904.
- 19- Molinas, A., K. Kheireldin, and B. Wu. 1998. Shear stress around vertical wall abutments. *Journal of Hydraulic Engineering*, 124(8): 822-830.
- 20- Oliveto, G. and Hager, W.H., 2002. Temporal evolution of clear-water pier and abutment scour. *Journal of Hydraulic Engineering*, 128(9), pp.811-820.
- 21- Raudkivi, A. J. and R. Ettema 1983. Clear-water scour at cylindrical piers. *Journal of Hydraulic Engineering*, 109(3): 338-350.

- 22- Raudkivi, A. J., and Sutherland, A. J. 1981. Scour at bridge crossings. *Report No. 51*, Road Research Unit, National Roads Board, Wellington, New Zealand.
- 23- Shafai Bajestan, M. 1994. *Hydraulics of Sediment*. Ahvaz. univ. press. 327p. (In Persian).
- 24- Sturm, T. W. 2006. Scour around bankline and setback abutments in compound channels. *Journal of Hydraulic Engineerin.*, 132(1): 21-32.
- 25- Thompson, D. M. 2006. The role of vortex shedding in the scour of pools. *Advances in Water Resources*, 29(2): 121-129.
- 26- Vice Presidency For Strategic Planning and Supervision of Islamic Republic of Iran. (2011). Guideline for Estimation of Local Scour. *No. 549*. (In Persian)
- 27- Vittal, N., U. Kothyari, and M. Haghighat. 1994. Clear-water scour around bridge pier group. *Journal of Hydraulic Engineering*, 120(11): 1309-1318.
- 28- Yanmaz, A. M., and H. D. Altinbilek. 1991. Study of time-dependent local scour around bridge piers. *Journal of Hydraulic Engineering, ASCE*, 117(10):1247-1268.