

## اثر آستانه بر کاهش آبستگي اطراف پایه پل در شرایط جریان سیلابی

حسینعلی عرب<sup>1</sup>، کاظم اسماعیلی<sup>2\*</sup>، علی اصغر بهشتی<sup>3</sup>، محمدرضا اکبرزاده<sup>4</sup>

تاریخ دریافت: 1395/1/31 تاریخ پذیرش: 1395/10/14

### چکیده

آبستگي اطراف پایه‌های پل در اثر جریان‌های سیلابی سریع مهم‌ترین عامل تهدید پایداری پل‌ها در مسیر رودخانه‌ها است. بنابراین در این شرایط، کنترل آبستگي بیش از حد ضروری است. محققین زیادی سعی در کاهش عمق آبستگي اطراف پایه‌های پل با استفاده از ابزار مختلف نموده‌اند. یکی از این روش‌های موفق استفاده از آستانه در بستر است. این تحقیق اثر به‌کارگیری آستانه در پایین دست پایه پل را به منظور کاهش آبستگي موضعی در شرایط جریان سیلابی سریع مورد مطالعه قرار داده است. بدین منظور آزمایش‌های مختلفی با قراردادن آستانه هم عرض با کانال و هم‌تراز با بستر رسوبی در پایین دست پایه پل و در فواصل مختلف از آن انجام شد. آزمایش‌ها در شرایط جریان یکنواخت با آب زلال و هم‌چنین جریان سیلابی سریع انجام گرفتند. برای ایجاد جریان سیلابی از دو سری آب‌نمود با زمان‌های پایه متفاوت و در سه دبی اوج مختلف استفاده شد. پایه پل دایره‌ای شکل در مقطع رسوبی با دانه‌بندی یکنواخت نصب و در شرایط مختلف جریان میزان آبستگي نهایی اندازه‌گیری شد. نتایج بدست آمده نشان داد که در شرایط جریان یکنواخت با آب زلال با افزایش فاصله بین آستانه و پایه پل، میزان تاثیر آستانه بر کاهش عمق و حجم آبستگي تقلیل می‌یابد. بهترین حالت جهت دست‌یابی به بالاترین کارایی در کاهش آبستگي، با قرار دادن آستانه چسبیده به پایه در پایین دست آن حاصل شد که منجر به کاهش 36 درصدی در عمق آبستگي و 77 درصدی در حجم آبستگي شد. این نتایج یافته‌های مطالعات قبلی را تایید می‌کند. در شرایط سیلابی نیز قرارگیری آستانه در فواصل کم‌تر از سه برابر قطر پایه باعث کاهش عمق و حجم آبستگي می‌شود. نتایج جریان سیلابی نیز نشان داد با فاصله گرفتن از پایه به شدت از کارایی آستانه کاسته شده و در فاصله سه برابر قطر پایه، نصب آستانه باعث افزایش عمق آبستگي می‌گردد. در حالت سیلابی در شرایط آستانه چسبیده به پایه در پایین دست، عمق آبستگي حدود 25 درصد و حجم آبستگي حدود 48 درصد کاهش می‌یابد. براساس این نتایج در شرایط جریان سیلابی راندمان نصب آستانه در پایین دست پایه نسبت به شرایط آب زلال مقداری کاهش یافته است.

### واژه‌های کلیدی: آبستگي، آستانه، پایه پل، جریان سیلابی

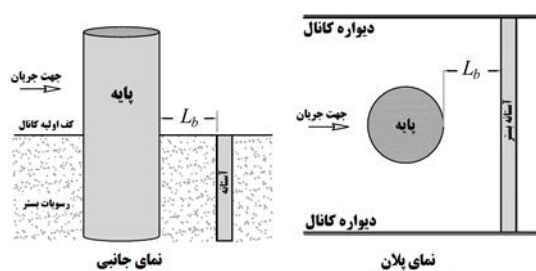
### مقدمه

عمق آبستگي و در نتیجه کاهش عمق طراحی پی پل مورد توجه محققین زیادی قرار گرفته است. دی و راج کومار روش‌های کاهش و کنترل آبستگي اطراف پایه پل‌ها به دو شیوه کلی (1) تقویت و حفاظت بستر (2) تغییر مکانیزم جریان تقسیم بندی می‌شوند (Dey and Rajkumar., 2007). در روش اول هدف مقابله با قدرت فرسایش جریان با استفاده از مصالح سخت از جمله سنگ چین‌ها، گابیون‌ها و اجسام خاص 3 و 4 وجهی می‌باشد (Chiew and Lim., 2000 ; Lauchlan and Melville., 2001 ; Parker et al., 1998 ; Yoon., 2005 ; Ding et al., 2006 ; Lim and Chiew., 2007). محققین (2001 ; Chiew., 1995 ; Dey and Rajkumar., 2007) زیادی تلاش کرده‌اند با تغییر مکانیزم‌های حاکم بر آبستگي عمق آبستگي را کاهش دهند (Tafarjnoruz et al. 2012). اولین مطالعات در این زمینه توسط (Chabert and Engeldinger (1956) با استفاده از آرایشی از شمع‌ها در جلوی پایه پل برای کاهش آبستگي انجام شده است. مطالعات مشابه توسط سایر محققین

آبستگي اطراف پایه‌های پل یکی از مهم‌ترین عوامل تخریب آن‌ها می‌باشد. برای طراحی پی پل‌ها تخمین دقیق عمق آبستگي ضروری است. روابط تجربی ارائه شده برای تخمین عمق آبستگي اطراف پایه پل‌ها (Melville and Coleman., 2000 ; Arneson et al., 2012 ; Sheppard et al., 2014) اغلب منجر به طراحی پی با عمق زیاد و پرهزینه می‌شود؛ به ویژه این روابط عمق آبستگي را در مقایسه با مشاهدات میدانی چند برابر تخمین می‌زنند (Johnson., 1995). از این رو در سال‌های اخیر آرایه روشی مطمئن برای کاهش

- 1- دانش آموخته ارشد سازه‌های آبی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد
  - 2- دانشیار گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد
  - 3- استادیار گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد
  - 4- استادیار گروه علوم مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد
- \* - نویسنده مسئول: (Email: Esmaili@um.ac.ir)

می‌کند. علی‌رغم شرایط مختلف آزمایشگاهی، راندمان استفاده از آستانه در مطالعات ذکر شده بین 24 تا 26 درصد بر مبنای حداکثر عمق آبستتگی در جلوی پایه بوده است (Tafarjnoruz et al., 2012). با توجه به ایجاد حداکثر عمق آبستتگی در جلوی آستانه برای بیش‌تر آزمایش‌ها، راندمان این روش کم‌تر از 20 درصد گزارش شده است. این نکته قابل توجه است که استفاده از آستانه در شرایطی که تجمع خار و خاشاک (Debris accumulation) در بالادست پایه وجود دارد نه تنها موثر نیست بلکه باعث افزایش عمق آبستتگی نیز می‌شود (Pagliara et al., 2010).

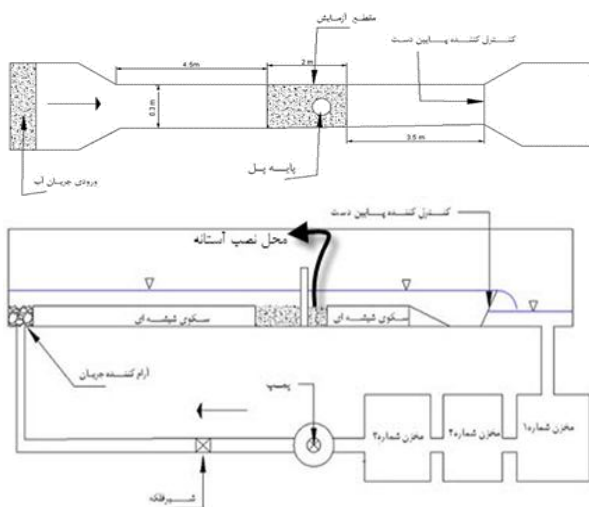


شکل 1- نمای شماتیک قرارگیری آستانه از پایه برای کاهش عمق آبستتگی

علی‌رغم مطالعات وسیع صورت گرفته در کاهش آبستتگی در اطراف پایه پل، این مطالعات محدود به شرایط ساده آزمایشگاهی با مصالح کف یکنواخت و جریان آب یکنواخت می‌باشد. در حالی که در اکثر رودخانه‌ها آبستتگی در اثر جریان سیلابی در بسترها با دانه‌بندی غیریکنواخت صورت می‌گیرد. چپو برای بررسی شرایط واقعی رودخانه‌ها، پایداری سنگ چین اطراف پایه پل‌ها را در یک کانال با فرسایش عمومی مورد بررسی قرار داد (Chiew., 2004). چپو ولیم رفتار شکست لایه سنگ چین در پایه پل‌ها را در شرایط بستر زنده مورد مطالعه قرار دادند. بیش‌تر مطالعات صورت گرفته در استفاده از روش‌های کنترل آبستتگی از جمله استفاده از آستانه در شرایط جریان یکنواخت با آب زلال صورت گرفته است که در این شرایط بستر اولیه بدون فرسایش باقی می‌ماند و هیچ رسوبی به گودال آبستتگی وارد نمی‌شود. از طرفی بیش‌ترین تغییرات بستر رودخانه‌ها در شرایط سیلابی صورت می‌گیرد که در این حالت هم‌زمان با شسته شدن اطراف پایه پل رسوبات فرسایش یافته از بالادست در جهت جایگزینی رسوبات فرسایش یافته عمل نموده و تا حدودی از میزان آبستتگی می‌کاهند (Chiew and Lim., 2000). به عنوان مثال مطالعات ملویل و هدفیل نشان می‌دهد که راندمان آرایش بهینه گروه پایه با آرایش مستطیلی در بالادست پایه در کاهش عمق آبستتگی از 41 درصد در شرایط آب زلال ( $U/U_c = 0.82$ ) سرعت متوسط جریان بالادست، و  $U_c$  سرعت بحرانی برای آستانه حرکت ذرات

(Wang., 1994 ; Haque., et al., 2007 ; Tafarjnoruz et al., 1999) نشان دهنده کاهش عمق آبستتگی تا 50 درصد اطراف پایه پل با استفاده از شمع‌ها در بالادست پایه است. نصب طوقه اطراف پایه‌ها نیز یکی از این روش‌ها می‌باشد ( ; Kumar et al., 1999 ; Ettema., 1980 ; Zarrati et al., 2004 ; Defanti et al., 2010 ; Mashahir et al., 2010 ; Tafarjnoruz et al., 2012). مطالعاتی توسط (Odgaard and Wang., 1987 ; Johnson et al., 2001) برای بررسی اثر پره‌های مستغرق در کاهش عمق آبستتگی انجام شده است. بررسی کارایی این روش توسط لوچلان (Lauchlan., 1999) در دانشگاه آکلند (Auckland) نشان داده است که استفاده از پره‌های مستغرق اطراف پایه‌ها می‌تواند عمق آبستتگی را تا 50 درصد کاهش دهد. نتایج آزمایش‌های قربانی و کل (Ghorbani and Kells., 2008) با استفاده از پره‌های تک و دوگانه کاهش عمق آبستتگی تا حدود 88 درصد را نشان می‌دهد. در حالی که مطالعات تفرج نوروز نشان دهنده راندمان کم‌تر از 20 درصد برای این روش می‌باشد که این تناقض با مطالعات قبلی به دلیل کم بودن شدت جریان و مدت زمان کوتاه آزمایش‌های قبلی می‌باشد (Tafarjnoruz et al., 2012). استفاده از پره‌ها، پره‌های متقاطع، و سرریزهای  $w$  شکل برای انتقال حفرة آبستتگی به ناحیه‌ای دور از پی پایه‌ها و کوله‌ها توسط محققین جانسون و همکاران در مطالعات آزمایشگاهی نشان می‌دهد که عمق آبستتگی به طور معمول حدود 65 تا 90 درصد بسته به شرایط جریان و وضعیت سازه کاهش یافته است (Johnson et al., 2001). استفاده از شکاف توسط کومار، چپو، حیدر پور نیز بعنوان یکی دیگر از روش‌های کاهش آبستتگی مطرح گردید (Chiew., 1992 ; Kumar et al., 1999 ; Heidarpour., 2002 ; Tafarjnoruz et al., 2012). مطالعات دیگر در همین زمینه مجدداً توسط حیدرپور و همکاران (1386) و هم‌چنین گروه پایه‌های ویژه توسط ویتال انجام شد (Vittal et al., 1994). در سال‌های اخیر استفاده از آستانه در عرض کانال و هم سطح با کف کانال به عنوان یک روش ساده و کاربردی در کاهش عمق آبستتگی مورد مطالعه قرار گرفته است (شکل 1). گرمادا نشان دادند که بهترین راندمان برای حالتی بدست می‌آید که آستانه چسبیده به پایین دست پایه قرار گیرد (Grimaldi et al., 2009). رازی و همکاران نشان دادند که فاصله آستانه از پایه پل ( $L_b$ ) نقش موثری بر میزان آبستتگی دارد. در شرایط چسبیده به پایه قرار دادن آستانه در پشت پایه باعث کاهش 29 درصدی در عمق آبستتگی شده است (Razi et al., 2012). آزمایش‌های تفرج نوروز برای این وضعیت بهینه نشان می‌دهد که حداکثر عمق آبستتگی نهایی در جلوی آستانه رخ می‌دهد. در این حالت آستانه به عنوان مانعی در مقابل انتقال رسوب، گسترش آبستتگی و نیروی فرسایشی گردابه‌های دنباله پایه عمل

کانال (30 سانتی متر) قطر پایه در این آزمایش برابر 30 میلی متر انتخاب شد که با معیارهای ذکر شده توسط محققین سازگاری داشته باشد.



شکل 2- نمای شماتیک از پلان و پروفیل طولی فلوم

انتخاب اندازه ذرات باید بگونه‌ای باشد که در شرایط جریان ماندگار تقریباً هیچ گونه فرم بستری تشکیل نشود، از این رو قطر متوسط ذرات بر اساس نظرات ارائه شده باید از  $0/7$  میلی متر بزرگتر باشد. همچنین برای حذف اثر اندازه رسوبات روی عمق آبشستگی قطر متوسط رسوبات بایستی در شرط  $25 \geq \frac{d}{d_{50}}$  صدق کند (Breusers and Raudkivi., 1991). با توجه به تاثیر کاهشی غیریکنواختی رسوبات بر عمق آبشستگی، سعی شده در حد امکان از رسوبات یکنواخت استفاده شود تا اثر غیریکنواختی رسوبات قابل چشم‌پوشی باشد. معیار یکنواختی رسوبات ماسه‌ای به صورت  $1.3 \leq \sigma_g$  عنوان شده است (Hoffmans and Verheij., 1997).

جدول 1- Error! No text of specified style in document.

مشخصات آب‌نمودهای مورد استفاده در آزمایش

آب‌نمود جریان ورودی	دبی اوج (لیتر بر ثانیه)	زمان پایه (ثانیه)
A1	11/6	102
A2	15/6	103
A3	18/6	102
A4	21/6	106
B1	11/6	72
B2	15/6	73
B3	18/6	73

به (بستر) 15 درصد در شرایط بستر متحرک ( $U/U_c = 1.84$ ) کاهش یافته است. از این رو جریان سیلابی و فرسایش عمومی اطراف پایه پل و آستانه و همچنین ورود رسوب از بالادست به ناحیه آبشستگی موضعی عملکرد آستانه در کاهش آبشستگی را نسبت به شرایط آب زلال متفاوت خواهد کرد (Melville and Hadfield., 1999). هدف اصلی این مطالعه بررسی کارایی استفاده از آستانه در پایین دست پایه پل در شرایط جریان آب زلال و شرایط جریان سیلابی جهت مطالعه آن بر کاهش عمق آبشستگی موضعی که تاکنون مورد توجه نبوده است می‌باشد. بدین منظور آزمایش‌هایی در شرایط مختلف جریان با دو آب‌نمود مختلف انجام شده و نتایج با آزمایش‌های جریان آب زلال مقایسه گردید.

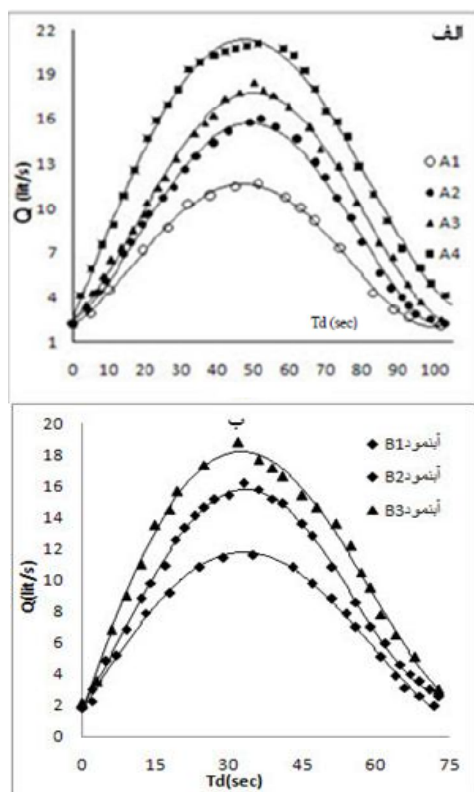
## مواد و روش‌ها

آزمایش‌های این تحقیق در یک کانال آزمایشگاهی به طول، عرض و ارتفاع بترتیب 10، 0/30 و 0/46 متر با دیواره‌های شیشه‌ای و قابلیت شیب‌پذیری انجام گرفت. حداکثر ظرفیت جریان در کانال 25 لیتر بر ثانیه می‌باشد. اندازه‌گیری دبی از طریق یک سرریز مستطیلی هم‌عرض کانال انجام و جریان‌های مورد نظر قبل از شروع آزمایشات کالیبره شدند. برای تولید جریان سیلابی از سیستم تغییر دور پمپ توسط اینورتر استفاده شد. مدل بستر با ایجاد یک چاله فرسایشی به طول 2 متر و عمق 13 سانتی متر با نصب یک کف کاذب در بالادست و پایین دست این چاله ایجاد گردید. فاصله بازه فرسایشی برای توسعه کامل جریان از ورودی بالادست 4/5 متر در نظر گرفته شد. به منظور تولید جریان سیلابی کامل لازم بود آب‌نمود جریان در ورودی کانال شکل گیرد تا از تغییرات احتمالی آن قبل ورودی پرهیز گردد، بدین ترتیب تراز سطح آب منطبق بر تراز کف کاذب در شروع هر آزمایش تنظیم گردید. شکل 2 نمایی از کانال مورد آزمایش را نشان می‌دهد. برای اندازه‌گیری عمق جریان و عمق آبشستگی، اشل‌هایی بر روی پایه و دیواره کانال نصب گردید. جهت قرائت توپوگرافی سطح بستر و حفره آبشستگی از یک عمق سنج با دقت  $\pm 0/1$  میلی متر استفاده گردید. مدل آستانه از جنس ورق پلکسی گلس به قطر 3 میلی متر هم‌عرض کانال و هم‌سطح با بستر در پایین دست پایه رسوبی نصب شد.

## معیارهای ساخت مدل آزمایشی

برای حذف اثر جدار بر میزان آبشستگی نسبت قطر پایه به عرض کانال توسط شن و ملویل کمتر از 0/1 پیشنهاد شده است (رازی و همکاران 1391). برخی پیشنهادات ارائه شده در مورد اندازه قطر پایه توسط رادکیوی و اتما 1983 می باشد که مقدار  $\frac{B}{d} \geq 6.25$  (B عرض کانال و d قطر پایه) را در نظر گرفتند. با توجه به عرض

به صورت نمایی تغییر می‌کند ابتدا بر اساس معیار ملویل وچیو (1999) زمان رسیدن به تعادل و هم‌چنین 90 درصد عمق آبشستگی تعادلی محاسبه شد (رابطه 1)



شکل 4- آب‌نمودهای ورودی به کانال الف) آب‌نمود A زمان پایه 102 ثانیه ب) آب‌نمود B زمان پایه 73 ثانیه

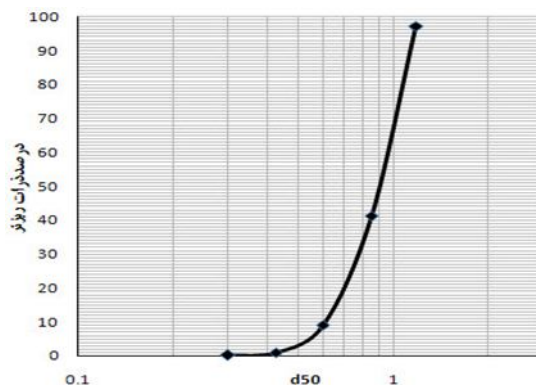
2). با توجه به این که حدود 90 درصد آبشستگی در ساعات اولیه آبشستگی اتفاق می‌افتد، جهت صرفه‌جویی در وقت، تمام آزمایشات در مدت زمان 8 ساعت انجام شدند.

$$t_c = 3.089 \left[ \left( \frac{u_c}{u_e} - 0.4 \right) \left( \frac{y}{d} \right)^{0.5} \right] \Rightarrow t_c = 2.68 \text{ day} \quad (1)$$

$$\frac{t_c}{t_{c0}} = \exp \left( -0.09 \left( \frac{u_c}{u_e} \ln \left( \frac{y}{d} \right) \right)^{1.8} \right) = 0.9 \Rightarrow t_c = 7.3 \text{ hr} \quad (2)$$

که  $u$  سرعت متوسط،  $u_e$  سرعت آستانه حرکت ذرات،  $d$  قطر پایه،  $y$  عمق جریان در بالادست،  $t_c$  زمان رسیدن آبشستگی به عمق تعادل ( $d_{eq}$ ) و  $d_{sc}$  عمق آبشستگی لحظه‌ای منحنی واسنجی سرریز انتهایی کانال و نمودار دبی اشل پس از آزمایشات اولیه مطابق شکل‌های 5 و 6 ترسیم شده است.

عمق نهایی و لحظه‌ای آبشستگی در شرایط جریان ماندگار و سیلابی در حالت پایه بدون و با حضور آستانه و پی هنگام انجام آزمایش‌ها قرائت و ثبت گردید. در نهایت عمق آبشستگی قرائت شده توسط قطر پایه بی‌بعد گردید و نسبت تغییرات عمق بی‌بعد شده



شکل 3- منحنی دانه‌بندی ذرات رسوبی

دانه‌بندی ذرات رسوبی

در تحقیق از ماسه طبیعی رودخانه‌ای با چگالی نسبی 2/65 یکنواخت با ضریب یکنواختی  $\sigma_g < 1/3$  استفاده گردید (شکل 3). در این نمودار  $d_{eq} = 0.9 \text{ mm}$  و انحراف استاندارد هندسی ذرات 1/28 محاسبه شد که با معیارهای ذکر شده مطابقت دارد. عمق جریان بایستی حداقل سه برابر قطر پایه باشد تا تأثیری بر عمق آبشستگی نداشته باشد. بر این اساس به جز در یک مورد که ارتفاع آب در دبی پیک آب‌نمود، کوچک‌تر از سه برابر قطر پایه ( $y = 2.9d$ ) بود در تمامی موارد این معیار رعایت شده است. سرعت جریان برابر نصف سرعت بحرانی آستانه که حرکت ذرات رسوبی آغاز می‌گردد و تا مادامی که سرعت متوسط جریان از سرعت متوسط آستانه حرکت ذرات تجاوز نکرده است، شرایط آب زلال حکم‌فرما می‌باشد (Lauchlan., 1999). در آزمایش‌های شرایط ماندگار حداکثر سرعت بکار رفته به منظور دست‌یافتن به حداکثر عمق آبشستگی برابر  $u_{eq} = 0.9u_e$  بوده است اما در آزمایشات سیلابی با توجه به عدم کنترل جریان در پایین‌دست، سرعت از آستانه حرکت ذرات بیش‌تر بوده و شرایط بستر متحرک فرض شده است. برای به دست آمدن سرعت آستانه حرکت ذرات آزمایشاتی بدون حضور آستانه با کاهش تدریجی عمق جریان و در دبی ثابت 11/9 لیتر بر ثانیه انجام گرفت. 0/14 متر را می‌توان عمقی دانست که ذرات در آستانه حرکت قرار گرفتند و سرعت متناظر با آن برابر 0/29 متر بر ثانیه محاسبه شد. در آزمایش‌های شرایط ماندگار به جهت بررسی بیشینه آبشستگی، سرعت جریان برابر 0/9 سرعت بحرانی یعنی 0/263 متر بر ثانیه در نظر گرفته شد. و در شرایط سیلابی در بیش‌ترین مقدار دبی، نسبت سرعت متوسط جریان به سرعت بحرانی آستانه حرکت ذرات برابر 2/01 بود. جهت انجام آزمایشات در حالت سیلابی از دو سری آب‌نمود مجزا با زمان پایه‌های متفاوت و در سه دبی متفاوت به شرح جدول 1 و شکل 4 استفاده شده است.

از آن‌جا که روند توسعه عمق آبشستگی به زمان وابسته است و

آبستنگی در برابر زمان ترسیم شد.

در جریان غیرسیلابی

$$\frac{d_s}{d}, \frac{gd}{u^2}, \frac{\mu}{\rho u d}, \frac{v_s}{u}, \frac{L}{d}, \frac{y}{d}, \frac{D^*}{d}, \frac{z}{d}, \frac{ut}{d}$$

گروه  $\frac{d_s}{d}$  بعنوان عمق نسبی آبستنگی متغیر وابسته و سایر گروه‌ها متغیرهای مستقل می‌باشند. تاثیر برخی از این پارامترها توسط محققین بررسی شده است مانند  $\frac{y}{d}$ ،  $\frac{gd}{u^2}$ ،  $\frac{\mu}{\rho u d}$ ، که جهت حذف اثر آن‌ها از ملاک‌های گفته شده استفاده گردیده است. از تقسیم دو گروه بی‌بعد  $\Pi_9$  و  $\Pi_{10}$  گروه بی‌بعد ساده‌تری به صورت  $\Pi_{11} = \frac{t}{T_d}$  حاصل می‌شود. گروه بی‌بعد  $\Pi_2$  و  $\Pi_3$  به ترتیب نمایانگر اعداد رینولدز جریان پایه و فرود جریان پایه می‌باشند. برای تشخیص میزان اثر هر یک از گروه‌های بدون بعد حاصل بر آبستنگی لازم است که تغییرات گروه بدون بعد وابسته در برابر هر یک از گروه‌های مستقل ترسیم شوند آنگاه بسادگی می‌توان میزان تاثیر آن‌ها را در روند آبستنگی تشخیص داد. در این مطالعه تاثیر  $\frac{z}{d}$  و  $\frac{Q_p}{d^2 u_c}$  مورد بررسی قرار گرفته است. فرانتزی و همکاران تاثیر گذشت زمان بر عمق نهایی آبستنگی حول پایه پل با مقطع دایره‌ای را مطالعه کرده و تابعی نمایی را در این خصوص پیشنهاد کردند (رابطه 5) (Franzetti et al., 1982).

$$\frac{z}{d} = 1 - e^{-0.028 \left( \frac{Q_p}{d^2 u_c} \right)^2} \quad (5)$$

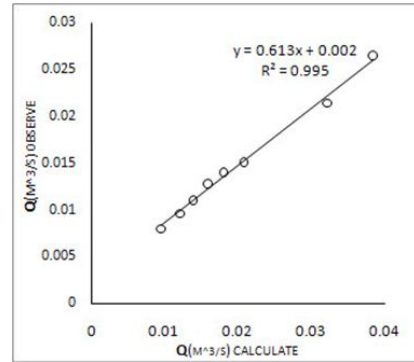
که در آن  $d_{s,z}$  عمق آبستنگی در زمان  $t$ ، حداکثر عمق آبستنگی،  $d$  قطر پایه  $u$  سرعت جریان می‌باشد (Franzetti et al., 1982).

مولویل و چپو روابط زیر را برای تعیین زمان تعادل آبستنگی موضعی اطراف پایه‌های پل ارایه کردند:

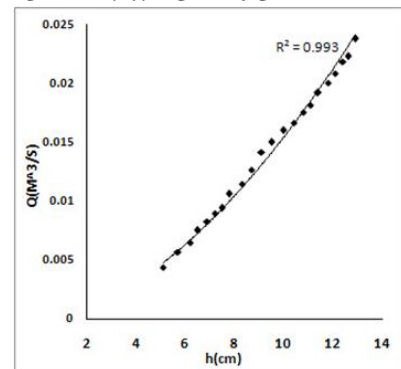
$$t_c = 48.26 \left[ \frac{z}{d} - 0.4 \right] f_{0.7} \frac{z}{d} > 6 \quad (6)$$

$$t_c = 30.89 \left[ \frac{z}{d} - 0.4 \right] \left( \frac{z}{d} \right)^{0.75} f_{0.7} \frac{z}{d} < 6 \quad (7)$$

$t_c$  زمان تعادل برحسب روز،  $u$ : سرعت جریان،  $u_c$ : سرعت بحرانی در آستانه حرکت برحسب متر بر ثانیه،  $d$ : قطر پایه برحسب متر،  $y$  عمق اولیه جریان می‌باشد که طبق تعریف زمانی عمق تعادل آبستنگی حاصل می‌شود که نرخ یا سرعت توسعه آبستنگی در 24 ساعت متجاوز از 5 درصد قطر پایه نشود (Melville and cheiw., 1999). پژوهش‌های انجام شده توسط سایر محققین جهت محاسبه و دست یافتن به حداکثر عمق آبستنگی، تاثیر متغیرهای مختلف مانند شکل پایه، زاویه برخورد، دانه‌بندی ذرات و... مورد بررسی قرار گرفته و جهت از بین بردن تاثیر هر کدام از این عوامل معیاری بیان شده است. همچنین برای کنترل و کاهش آبستنگی در شرایط آب



شکل 5- منحنی واسنجی سرریز مستطیلی



شکل 6- منحنی دبی اشل کانال مورد آزمایش

### تحلیل ابعادی

در این تحقیق روش پای باکینگ‌هام برای تحلیل ابعادی مورد استفاده قرار گرفت. متغیرهای موثر بر آبستنگی در شرایط ماندگار به شرح معادله 3 می‌باشد.

$$f(d_s, g, \rho, \mu, u, v_s, L, y, d, d_{50}, t, D^*, Z) = 0 \quad (3)$$

به طریق مشابه پارامترهای موثر بر آبستنگی در جریان سیلابی در رابطه 4 مشخص گردید.

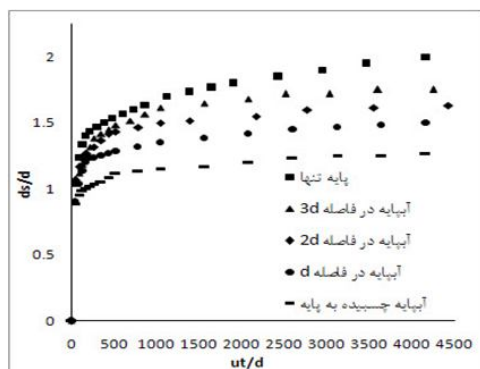
$$f(d_s, g, \rho, \mu, Q_p, u, v_s, L, y, d, d_{50}, T_d, D^*, Z, t) = 0 \quad (4)$$

در روابط فوق،  $d_s$  عمق آبستنگی،  $g$  شتاب ثقل،  $\rho$  جرم مخصوص آب،  $\mu$  لزجت آب،  $u$  سرعت متوسط جریان،  $u_c$  سرعت بحرانی آستانه حرکت ذرات،  $L$  فاصله قرارگیری آستانه،  $y$  عمق جریان،  $d$  قطر پایه،  $d_{50}$  اندازه ذرات رسوبی،  $t$  زمان،  $D^*$  قطر پی،  $Z$  تراز قرارگیری سطح بالایی پی،  $Q_p$  دبی بیسینه،  $T_d$  زمان پایه سیلاب. سه پارامتر  $u$  و  $p$  و  $d$  به عنوان پارامتر جریان، سیال و هندسی در نظر گرفته شدند. گروه‌های بدون بعد حاصل به شرح زیر می‌باشند

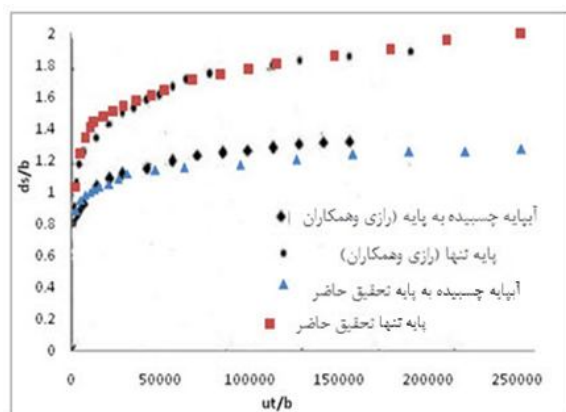
$$\frac{d_s}{d}, \frac{gd}{u^2}, \frac{\mu d}{\rho Q_p}, \frac{Q_p}{d^2 u_c}, \frac{L}{d}, \frac{y}{d}, \frac{D^*}{d}, \frac{z}{d}, \frac{Q_p T_d}{d^3}, \frac{Q_p t}{d^3}, \frac{d_{50}}{d}$$

آب زلال 7 مشاهده می‌شود تغییرات آبستتگی بعد از زمان 8 ساعت  $(\frac{u}{td} = 4500)$  با شیب بسیار آرامی صورت می‌گیرد به طوری که در مدت زمان ادامه یافته بعد از مدت مذکور تا انتهای آزمایش، تنها کم‌تر از  $0/1d$  (قطر پایه) تفاوت در میزان عمق آبستتگی دیده می‌شود. بنابراین تغییرات عمق نسبی آبستتگی (تغییرات عمق آبستتگی به قطر پایه) در مدل پایه استوانه‌ای بدون آستانه و در پایه استوانه‌ای با حضور آستانه در پایین دست مدل پایه پل در مدت 8 ساعت و تقریباً 90 درصد آبستتگی نهایی در حالت جریان ماندگار و در سرعت  $0/9$  سرعت بحرانی  $(u = 0.9u_c)$  ذرات رسوب بررسی شد.

شکل 8 نیز روند تغییرات زمانی آبستتگی را در تحقیق حاضر با سایر محققین نشان می‌دهد چنان که ملاحظه می‌شود روند تغییرات زمانی با سایر محققین تشابه تقریباً یکسانی دارد. تفاوت موجود در اندازه ذرات انتخابی در تحقیقات مختلف می‌باشد. شکل 9 ابعاد حفره آبستتگی را در دو موقعیت قرارگیری آب‌پایه نشان داده است نزدیکی فاصله آب‌پایه به پایه کاهش ابعاد و حجم حفره آبستتگی را در پی دارد. جدول 3 بخش بیشتری از نتایج استخراج شده سایر محققین با نتایج این تحقیق را نشان می‌دهد.



شکل 7- تغییرات عمق نسبی آبستتگی در حالات مختلف



شکل 8- مقایسه نتایج این تحقیق حاضر با نتایج رازی و همکاران (1391)

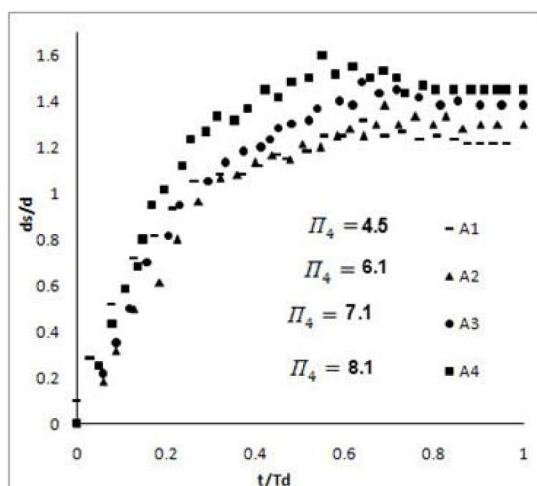
زلزال کوشش‌های فراوانی صورت گرفته است مانند استفاده از ریپ‌رپ، طوقه، شکاف و... با وجود این تاثیر یک سیلاب ناگهانی بر روی پایه پل تاکنون مطالعه نشده است. در این تحقیق سعی خواهد شد با ایجاد سیلاب در شرایط آزمایشگاهی به مطالعه تاثیر تغییر زمانی جریان بر آبستتگی پایه پل پرداخته شود. همچنین کارایی سازه‌های کنترل و کاهش آبستتگی در شرایطی که سرعت متوسط جریان از سرعت آستانه حرکت ذرات بیشتر گردد مورد بررسی قرار نگرفته است. در این تحقیق با پذیرش معیارهای رسیدن به حداکثر عمق آبستتگی با حذف عواملی هم‌چون اندازه پایه، دانه‌بندی ذرات به مقایسه نتیجه مطالعه حاضر با سایر تحقیقات در زمینه پرداخته شده است. بخش قابل توجهی از مطالعات به بررسی آبستتگی در شرایط ماندگار یا آب زلال پرداخته است اما در شرایط سیلابی یا جریان غیر دایمی تحقیقات بسیار محدودی صورت گرفته است.

## نتایج و بحث

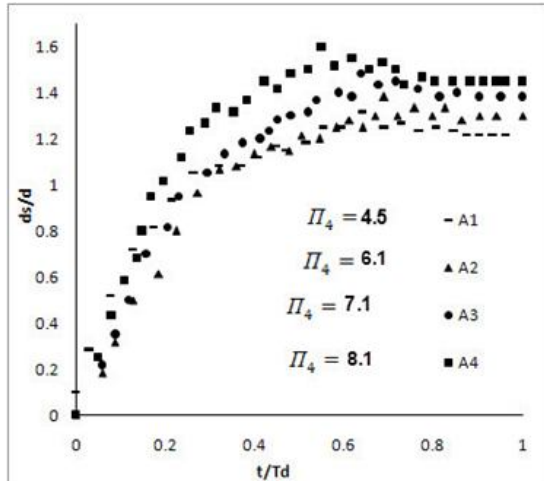
تغییرات زمانی آبستتگی در حالت ماندگار و آبستتگی نهایی و نیز در حالت سیلابی بدون و با حضور آستانه مورد بررسی قرار گرفته است. در این راستا فاکتورهای مهم حاکم بر کاهش عمق آبستتگی از قبیل فاصله آستانه از پایه پل در توجیه میزان کاهش عمق آبستتگی مورد بررسی قرار گرفته است.

### پایه استوانه‌ای (آب زلال)

جهت بررسی تغییرات آبستتگی یک آزمایش به مدت زمان 14 ساعت انجام گردید. همان‌طور که در شکل 9- خطوط هم عمق آبستتگی در فواصل مختلف آب پایه، چسبیده  $2d$



شکل 10 - توسعه عمق نسبی آبستتگی با زمان در جریان سیلابی جدول 3- مقایسه نتایج اثر آب پایه در تحقیقات مختلف در حالت



شکل 10- توسعه عمق نسبی آبشستگی با زمان در جریان سیلابی

جدول 3- مقایسه نتایج اثر آب پایه در تحقیقات مختلف در حالت آب زلال

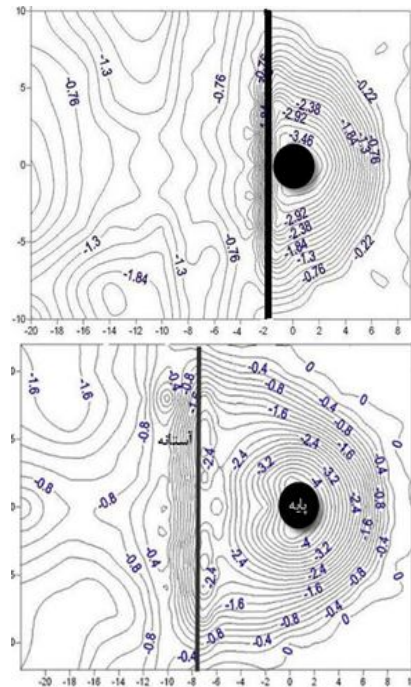
نام محقق	موقعیت آب- پایه (cm)	عمق آبشستگی (cm)	در صد کاهش عمق آبشستگی
گریمالدی و همکاران	چسبیده به پایه	9/01	25/8
سینا رازی و همکاران	چسبیده به پایه	-	29
تحقیق حاضر	چسبیده به پایه	3/8	36
گریمالدی و همکاران	L=3/8	10/38	14/5
سینا رازی و همکاران	L=3	-	14
تحقیق حاضر	L=3	4/5	24/7
گریمالدی و همکاران	L=7/5	10/34	14/8
تحقیق حاضر	L=6	4/9	18
گریمالدی و همکاران	L=15	10/6	12/7
تحقیق حاضر	L=9	5/25	12/2

درصد آبشستگی بیشینه در مدت زمانی برابر با 0/8 زمان رسیدن به دبی اوج آب نمود صورت گرفته است. در واقع در ابتدای پروسه آبشستگی سرعت توسعه عمقی حفره آبشستگی بسیار بالا بوده و بعد از رسیدن به زمان تقریبی 0/8 برابر زمان دبی اوج، سرعت توسعه عرضی حفره آبشستگی افزایش می یابد.

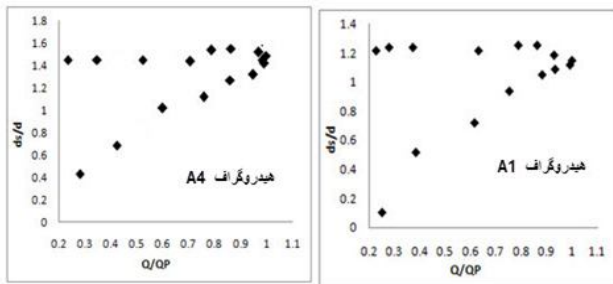
در شکل 12 روند تغییرات عمق بی بعد شده آبشستگی و دبی بی- بعد شده بخوبی حاکی از اثر جریان سیلابی در شرایط متغیر چاله آبشستگی می باشد که یک منحنی رفت و برگشتی را نشان می دهد.

### تغییرات آبشستگی در جریان سیلابی

در جریان سیلابی همانند حالت جریان ماندگار (آب زلال) ابتدا تغییرات حفره آبشستگی نسبت به زمان در مورد پایه استوانه ای بدون آستانه و سپس قرار گیری آستانه در فواصل ذکر شده مورد بررسی قرار گرفت. همان طور که پیش تر عنوان شد جریان سیلابی با تولید دو سری آب نمود، که سری اول با سه دبی اوج متفاوت بوده و سری دوم با همان دبی ها اما زمان پایه متفاوت، مورد بررسی قرار گرفت. در شکل 10 نمودار توسعه عمق نسبی حفره آبشستگی نسبت به زمان نشان می دهد که سری آب نمودهایی که دارای زمان پایه برابر و اما دبی اوج متفاوت هستند با افزایش دبی بر میزان عمق آبشستگی افزوده می شود. از این سری نمودارها به عنوان نمودارهای شاهد در تمامی آزمایشات استفاده گردید. پارامتر بی بعد دبی از تقسیم دبی لحظه ای بر دبی حداکثر آب نمود به دست می آید. با رسم تغییرات نسبت بی بعد شده عمق آبشستگی با زمان و آب نمود ورودی جریان با نسبت بی بعد شده دبی در یک دستگاه مختصات اقدام شد. همان طور که در شکل 11 مشخص است بیش ترین عمق آبشستگی در بازه زمانی 1/1 تا 1/5 برابر زمان رسیدن به دبی اوج آب نمود اتفاق افتاده است. و بعد آن تقریباً تغییرات ناچیز و گاهی روند آبشستگی نزولی می باشد. که به دلیل فرو ریختن دیواره های کناری حفره و عدم تخلیه رسوبات حمل شده توسط جریان و باقیماندن آن ها در داخل حفره می باشد. چنین استنباط می شود که نقش شاخه صعودی آب نمود در ایجاد حفره آبشستگی نسبت به شاخه نزولی آب نمود موثرتر است. همان طور که از شکل 11 پیدا است در حدود 80



شکل 9- خطوط هم عمق آبشستگی در فواصل مختلف آب پایه چسبیده 2d،

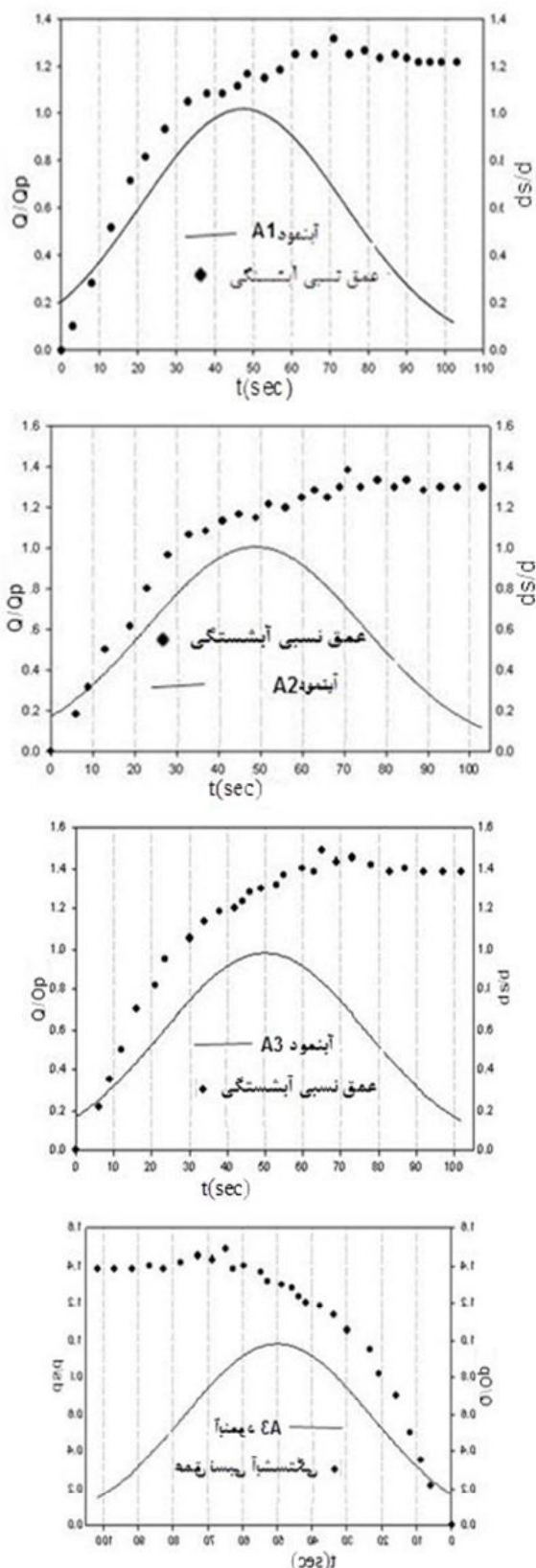


شکل 12- تغییرات عمق نسبی آبستگي نسبت به پارامتر Q/QP

نکته قابل توجه این که تحت شرایط جریان سیلابی ممکن است اصولاً کاهش آبستگي به اندازه‌ی قابل توجهی نباشد. در شکل 13 تفاوت تاثیر زمان پایه آب نمود بر آبستگي پایه پل ترسیم شده است. آب نمود B با زمان پایه کم تر و شیب بیش تر بازوی بالا رونده نسبت به آب نمود A توانسته آبستگي بیش تری را در دروه افزایش جریان ایجاد نماید. در عین حال نتایج نشان می‌دهد این افزایش عمق آبستگي فقط در مدت زمان دبی اوج بوده و سپس حفره آبستگي با جایگزینی رسوبات کوچک می‌شود و تقریباً در پایان هر دو آب نمود نتایج آزمایشگاهی نشان دهند وضعیت چاله آبستگي تقریباً بر هم منطبق می‌باشند.

جدول 4- میزان تاثیر آستانه در آب نمودهای نوع A

Y(cm)	$\frac{t_{in}}{t_{out}}$	درصد کاهش حجم حفره	درصد کاهش عمق آبستگي	موقعیت قرارگیری آستانه	آب-نمود
		-	-	L=3d	
		28	4/2	L=2d	
8/5	1/55	40	10/5	L=d	A1
		62	20/5	L=0	
		-14	-4	L=3d	
		16	7/7	L=2d	
10/3	1/7	19/5	15	L=d	A2
		60	20/5	L=0	
		-18	-6	L=3d	
		10	8/4	L=2d	
11/3	1/9	23	13/5	L=d	A3
		48	20	L=0	
		-	-	L=3d	
		-	9	L=2d	A4
12	2/02	-	16	L=d	
		-	20/7	L=0	



شکل 11- تغییرات عمق بی بعد شده آبستگي و دبی بی بعد شده برای آب نمودهای انتخابی



عمق آبشستگی تقریباً به  $1/6$  رسیده که این مقدار در جریان سیلابی با زمان پایه خیلی کم‌تر و به عبارتی در مدت زمان کوتاهی همان عمق نهایی آبشستگی حالت جریان زلال را تجربه کرده است. افزایش نقطه اوج سیلاب به‌خصوص در جریان‌های سیلابی سریع تاثیر بیش‌تری بر آبشستگی دارد. چنان‌که نتایج نشان داد زمان اوج سیلاب هرچه کوتاه‌تر گردد خطر آبشستگی بیش‌تر خواهد شد. این امر حاکی از اهمیت کنترل اطراف پایه پل در مقابله با آبشستگی در شرایط طبیعی که سیل‌های سریع ناشی از رگ‌بارهای با شدت زیاد و زمان پایه کوتاه رخ می‌دهد را ضروری می‌نماید. احداث موانع کنترل‌کننده هم‌چون آب‌پایه در شرایطی که به پایه چسبیده باشد در این امر نیز مفید بوده است. طبیعتاً شکل آب‌پایه و عمق نسب و ارتفاع آن در کنترل آبشستگی نقش موثری دارند که نتایج تحقیقات قبلی انجام شده در حالت آب زلال و قرار دادن آب‌پایه طوقی شکل در مقابل پایه خواهد توانست از میزان آبشستگی بکاهد.

### منابع

حیدرپور، م، افضلی مهر، ح، خدارحمی، ز. 1386. حفاظت گروه پایه‌های استوانه‌ای پل در برابر آبشستگی موضعی با استفاده از شکاف. مجله علوم کشاورزی و منابع طبیعی.

رازی، س، دلیر، ع، ح، سلماسی، ف، فرسادی زاده، د. 1391. تاثیر توام آستانه و طوق در کاهش عمق آبشستگی اطراف پایه‌های پل استوانه‌ای. نشریه آب و خاک. 26: 3. 597

Arneson, L.A., Zevenbergen, L.W., Lagasse, P.F and Clopper, P.E. 2012. Evaluating scour at bridges (HEC-18), Technical Rep. No. FHWA (Federal Highway Administration) HIF-12-003, Washington, DC.

Breusers, H.N.C and Raudkivi, A. J. 1991. Scouring. Hydraulic structure design manual, No 2 IAHR. Balkema. 143p.

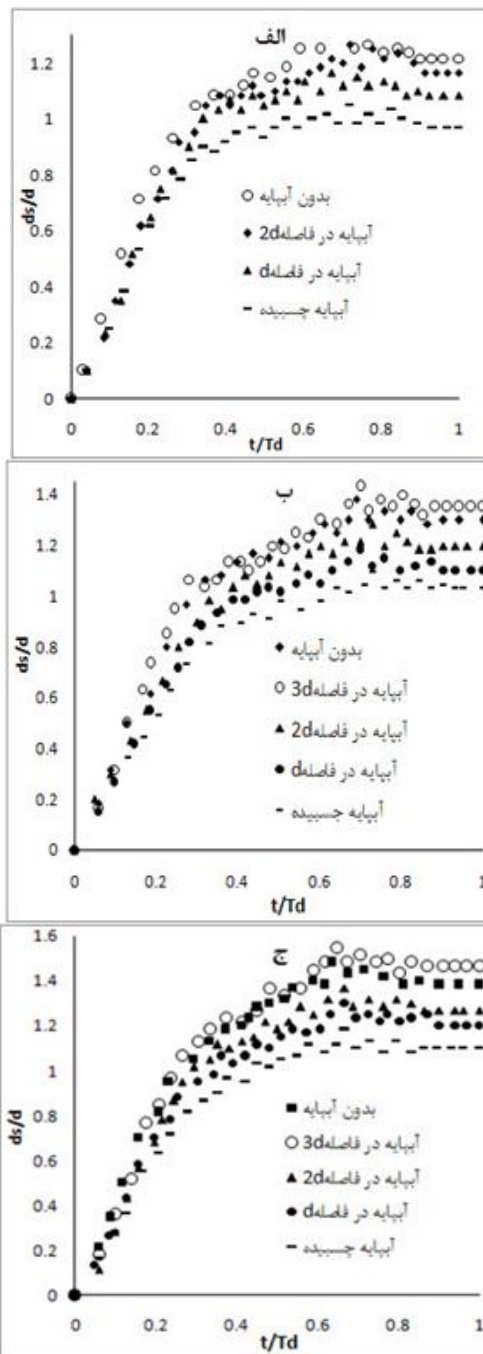
Chiew, Y.M. 1995. Mechanics of riprap failure at bridge piers, Journal of Hydraulic Engineering. 121.9: 635-643.

Chiew, Y.M. 1992. Scour protection at bridges pier Journal of Hydraulic Engineering. 118.9: 1260-1269.

Chiew, Y.M and Lim, F.H. 2000. Failure behavior of riprap layer at bridge piers under live-bed conditions, Journal of Hydraulic Engineering. 126.1: 43-55.

Chabert, J and Engeldinger, P. 1956. Etude des affouillements autour des piles de ponts, Laboratoire National d'hydraulique, Chatou, France.

Dey, S and Rajkumar, V.R. 2007. Clear-water scour at piers in sand beds with an armor layer of gravels. Journal of Hydr. Eng., ASCE, Vol. 133, No. 6, pp.



شکل 13 - عمق نسبی آبشستگی در دو حالت با آستانه و بدون آستانه (الف) آب‌نمود A1 (ب) آب‌نمود A2 (ج) آب‌نمود A3

### نتیجه‌گیری

بررسی آبشستگی در شرایط طبیعی امری تقریباً ناممکن بوده و فعالیت‌های آزمایشگاهی در این راستا غالباً به همین دلیل می‌باشد. مجموعه نتایج بدست آمده حاکی از آن است که شرایط سیلابی جریان تاثیر بسیار زیادی بر عمق آبشستگی دارد به گونه‌ای که در آزمایشات آب زلال یا شرایط ماندگار با زمان 8 ساعت نسبت بی‌بعد

- Lauchlan, C.S. and Melville, B.W. 2001. Riprap protection at bridge piers. *Journal of Hydraulic Engineering*. 127.5: 412–418.
- Melville, B.W. and Hadfield, A.C. 1999. Use of sacrificial piles as pier scour countermeasures. *Journal of Hydraulic Engineering*. 125.11: 1221–1224.
- Mashahir, M.B., Zarrati, A.R., Mokallaf, E. 2010. Application of riprap and collar to prevent scouring around rectangular bridge piers. *Journal of Hydraulic Engineering*. 136.3: 183–187.
- Melville, B.W., Coleman, S.E. 2000. *Bridge scour*, Water Resources Publications, Littleton, CO.
- Odgaard, A.J., Wang, Y. 1987. Scour prevention at bridge piers, Conference, Virginia. 523–527.
- Parker, G., Toro-Escobar, C., Voigt, R.L. 1998. Countermeasures to protect bridge piers from scour, Final Rep. prepared for National Highway Research Program, Transportation Research Board, National Research Council, University of Minnesota, Minneapolis and December.
- Pagliara, S., Carnacina, I., Cigni, F. 2010. Sills and gabions as countermeasures at bridge pier in presence of debris accumulations. *Journal of Hydraulic Research*. 48.6: 764–774.
- Razi, S., Salmasi, F., Dalir, A.H., Farsadizaeh, D. 2012. Application of Bed Sill to Control Scouring Around Cylindrical Bridge Piers, *Journal of Civil Engineering and Urbanism*. 2: 115–121
- Rudkivi, A.J. Ettema, R. 1983. Clear-water scour at cylindrical piers. *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, 109.3: 339–350.
- Sheppard, D.M., Melville, B., Demir, H. 2014. Evaluation of existing equations for local scour at bridge piers *Journal of Hydraulic Engineering* 10.1061: 14–23.
- Tafarojnoruz, A., Gaudio, R., Calomino, F. 2012. Evaluation of Flow-Altering Countermeasures against Bridge Pier Scour, *Journal of Hydraulic Engineering*. 138.3: 297–305.
- Vittal, N., Kothiyari, U.C., Haghghat, M. 1994. Clear water scour around bridge pier group. *Journal of Hydraulic Engineering*. 120.11: 1309–1319.
- Yoon, T.H. 2005. Wire Gabion for Protecting Bridge Piers. *Journal of Hydraulic Engineering*. 131.11: 942–949.
- Wang, T.W. 1994. A study of pier scouring and scour reduction. Proceeding. 9th Congress., Asia Pacific Div., IAHR, Int. Assoc. for Hydraulic Research, Delft, The Netherlands, Singapore. 18–28.
- Zarrati, A.R., Gholami, H., Mashahir, M.B. 2004. Application of collar to control scouring around rectangular bridge piers, *Journal of Hydraulic Research*. 42.1: 97–103.
- 703–711.
- Defanti, E., Di Pasquale, G., Poggi, D. 2010. An experimental studies of scour at bridge piers: Collars as a countermeasure, Proceeding 1<sup>st</sup> IAHR European Congress, Heriot-Watt University, Edinburgh, UK.
- Ding, B., Chiew, Y.M., Tang, H.W. 2006. Scour Protection around Bridge Piers Using Tetrahedron Frames, Proceedings Third International Conference on Scour and Erosion, November 1-3
- Ettema, R. 1980. Scour at bridge piers, Report. No. 112, Dept. of Civil Engineering, University of Auckland, Auckland, New Zealand.
- Franzetti, S., Larcán, E. and Mignosa, P. 1982. Influence of tests duration on the evaluation of ultimate scour around circular piers. Pp. 381–396. International Conference on the Hydraulic Modeling of Civil Engineering Structures. September 22- 24, University of Warwick, Coventry, England.
- Ghorbani, B., Kells, J.A. 2008. Effect of submerged vanes on the scour occurring at a cylindrical pier *Journal of Hydraulic Research*. 46.5: 610–619.
- Grimaldi, C., Gaudio, R., Calomino, F., Cardoso, A.H. 2009. Control of scour at bridge piers by a downstream bed sill, *Journal of Hydraulic Engineering*. 135.1: 13–21
- Heidarpour, M. 2002. Control and reduction of local scour at bridge piers by using slot, Proceeding. River Flow 2002. Louvain-la-Neuve, A. A. Balkema, Rotterdam, The Netherlands. 2: 1069–1072.
- Hoffmans, G.J. and Verheij, H.J. 1997. *Scour manual*. 5th ed., London. Balkema Publishing. 205p.
- Johnson, P.A., Hey, R.D., Brown, E.R., Rosgen, D.L. 2002. Stream restoration in the vicinity of bridges, *Journal American Water Resource Association* 38.1: 55–67.
- Johnson, P.A. 1995. Comparison of Pier-Scour Equations Using Field Data, *Journal of Hydraulic Engineering*. 8: 626–629
- Johnson, P.A., Hey, R.D., Tessier, M., Rosgen, D.L. 2001. Use of vanes for control of scour at vertical wall abutments, *Journal of Hydraulic Engineering*. 127.9: 772–778.
- Kumar, V., RangaRaju, K.J., Vittal, N. 1999. Reduction of local scour around bridge piers using slots and collars. *Journal of Hydraulic Engineering*. 125.12: 1302–1305.
- Lim, F.H. and Chiew, Y.M. 2001. Parametric study of riprap protection around bridge piers *Journal of Hydraulic Research*. 39.1: 61–72.
- Lauchlan, C.S. 1999. Pier scour countermeasures, Univ. of Auckland, School of Engineering, Rep. No. 590, Auckland, New Zealand.

## The Effect of Sill to Reduce Scour Around Bridge Piers in Flood Flow Conditions

H.A. Arab<sup>1</sup>, K. Esmaili<sup>2\*</sup>, A.A. beheshti<sup>3</sup>, M.R. akbarzadeh<sup>4</sup>

Received: Apr.19, 2016

Accepted: Jan.03, 2017

### Abstract

Scouring around bridge piers due to strong storm currents is a main threat to the stability of bridges in rivers. Hence, in this conditions the protection against excessive scouring is required. Attempts have been made by several investigators to reduce scour depth using several devices around bridge piers. One of the successful methods for reduction of scouring was the application of bed sills. In this study, the effect of applying bed sill at the downstream of the pier in reducing the scour around bridge piers under strong storm currents is studied. For this purpose, experiments were conducted by placement of bed sills at the downstream of the pier throughout the flume width with its top position at the bed level and by varying the distance between bridge pier and bed sill. The experimental tests were done under uniform flow with clear water condition and storm currents. Storm currents were simulated by two group of hydrographs with different base time and three different peak flow. A circular pier was installed on the bed with uniform sediments and final scour depth was measured in different flow conditions. The results under uniform flow showed that the efficiency of the bed sill is reduced by increasing the distance between the bed sill and the base of pier. The placement of a bed sill sticking to the pier resulted in the most significant scour reduction of about 36 and 77 % in depth and volume, respectively. This result confirms the findings of previous studies. Under storm flow condition, the placement of bed sill at distances smaller than three times of the pier diameter resulted in the reduction of scour depth and volume. The results show that the efficiency of the bed sill is reduced significantly by increasing the distance from the pier and it results in the increase of scour depth at the distance of three pier diameter. The maximum reduction in scour depth and volume was observed about 25 and 48 %, respectively, at the condition with the bed sill sticking to the pier. Based on these findings, it can be concluded that the efficiency of the bed sill is reduced under storm flow conditions when compared with its efficiency under uniform flow with clear water condition.

**Key words:** Bed sill, Bridge pier, Scour, Storm flow

1 - Graduate of water science and Engineering, College of Agriculture, Ferdowsi University of Mashhad

2 - Associate professor Department. water science and Engineering, College of Agriculture, Ferdowsi University of Mashhad

3 - Assistant professor Department. water science and Engineering, College of Agriculture, Ferdowsi University of Mashhad

4 - Assistant professor Department. water science and Engineering, College of Agriculture, Ferdowsi University of Mashhad

(\*Corresponding Author Email: Esmaili@um.ac.ir)