

## تعیین ابعاد مناسب طوق مستطیلی در کاهش آبشستگی پایه پل

هادی ارونقی<sup>۱\*</sup>، داود فرسادی زاده<sup>۲</sup>، علی حسین زاده دلیر<sup>۲</sup> و احمد فاخری فرد<sup>۲</sup>

تاریخ پذیرش: ۸۷/۱۰/۲۳

۱- دانشجوی دکتری سازه‌های آبی، گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز

۲- گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز

\*مسئول مکاتبه E-mail: [hadiarv@yahoo.com](mailto:hadiarv@yahoo.com)

### چکیده

روش‌های مختلفی برای جلوگیری و یا کاهش آبشستگی اطراف پایه پل ارائه شده است. استفاده از طوق از جمله روش‌هایی است که مورد توجه محققین قرار می‌گیرد. در این تحقیق با به کارگیری طوق مستطیلی در پایه استوانه‌ای، مشاهده شد طوق، سرعت آبشستگی و عمق حفره آبشستگی اطراف پایه پل را کاهش می‌دهد. ابعاد طوق نقش زیادی در کاهش آبشستگی اطراف پایه پل دارد. در تحقیق حاضر طول طوق در بالادست و پایین دست مدل پایه پل و همچنین عرض طوق مورد بررسی قرار گرفت. مقادیر مناسب طول طوق مستطیلی در بالادست و پایین دست که نسبت به بدنه مدل پایه پل اندازه‌گیری می‌شدند، به ترتیب 0/92 و 1/42 برابر قطر پایه تعیین شدند. ضمن اینکه عرض مناسب طوق نیز 3 برابر قطر پایه پل برآورد گردید. لازم به ذکر است با ابعاد فوق پس از 62 ساعت، آبشستگی ناچیزی در اطراف مدل پایه پل مشاهده گردید.

واژه‌های کلیدی: آب زلال، آبشستگی، پایه پل، سرعت بحرانی، طوق مستطیلی

## Determination of Rectangular Collar Dimensions for Reducing Scour Around Bridge Pier

H Arvanaghi<sup>1\*</sup>, D Farsadizadeh<sup>2</sup>, A Hosseinzadeh Dalir<sup>2</sup> and A Fakheri Fard<sup>2</sup>

<sup>1</sup>PhD Student, Department of Water Engineering, Faculty of Agriculture, University of Tabriz, Tabriz, Iran

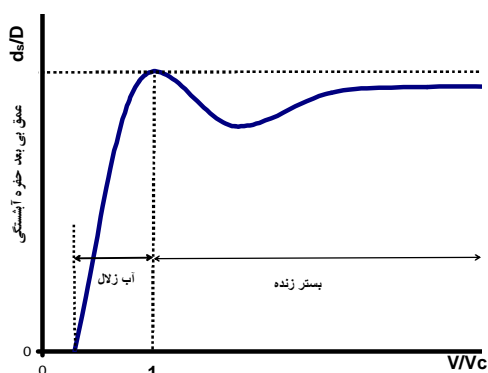
<sup>2</sup>Department of Water Engineering, Faculty of Agriculture, University of Tabriz, Tabriz, Iran

\*Corresponding author: E-mail: [hadiarv@yahoo.com](mailto:hadiarv@yahoo.com)

### Abstract

Different methods have been proposed to prevent or reduce scouring around bridge piers. Making use of collars as countermeasures has recently been noticed by researchers. Collar dimensions have great impact on reducing local scour around bridge piers. This study showed that rectangular collars around circular piers reduced both intensity of scouring and depth of scour hole. In this study the effects of collar length in up and down-stream of the pier model and also on its width were investigated. The dimensionless length of rectangular collar in upstream ( $L_u/D$ ) and downstream ( $L_d/D$ ) found to be 0.92 and 1.42, respectively, and the width of collar was estimated 3 times greater than the pier diameter. It is noteworthy to mention that with these dimensions scouring process was rarely observed around the pier model after elapsing 62 hours.

**Keywords:** Bridge pier, Clear water, Critical velocity, Rectangular collar, Scour



شکل 1- طبقه بندی آبشستگی در شرایط آب زلال و بستر زنده بر اساس سرعت جریان و عمق حفره

تاکنون محققین زیادی مسئله آبشستگی پایه های پل را مورد مطالعه قرار داده اند که به علت پیچیدگی و تعدد عوامل حاکم بر پدیده هنوز موفق به ارائه راه حل واحدی برای محاسبه عمق حفره آبشستگی و یا کاهش آن نشده اند. عواملی چون، شکل آبراهه، خصوصیات جریان، شکل و زاویه استقرار پایه ها نسبت به جریان و خصوصیات رسوب همگی از عواملی هستند که در پیچیدگی مسئله آبشستگی پایه های پل دخالت می نمایند (شفاعی بجزستان 1373).

ملویل (1997) برای آبشستگی پایه های پل رابطه زیر را مطرح کرده است:

$$d_{se} = k_{yb} \cdot k_i \cdot k_d \quad [1]$$

که  $d_{se}$ ،  $k_{yb}$ ،  $k_i$ ،  $k_d$  بترتیب عمق آبشستگی (حالت تعادل)، ضریب عمق جریان، ضریب شدت جریان، ضریب اندازه ذرات رسوبی می باشند. او برای محاسبه  $k_{yb}$  روابط زیر را پیشنهاد کرده است:

$$[2] \quad \begin{cases} k_{yb} = 2.4b & \frac{b}{y} < 0.7 \\ k_{yb} = 2(yb)^{0.5} & 0.7 < \frac{b}{y} < 5 \\ k_{yb} = 4.5y & \frac{b}{y} > 5 \end{cases}$$

## مقدمه

آبشستگی پایه های پل از مباحث مهم در هیدرولیک رسوب بشمار می رود. در اثر آبشستگی حفره ای در اطراف پایه پل ایجاد می گردد و پایداری آنرا تضعیف می کند و ممکن است در اثر یک سیل بزرگ ویران گردد. برخورد جریان آب به پایه پل و جدائی آن عوامل اصلی آبشستگی موضعی در اطراف پایه پل به حساب می آیند. در اثر برخورد آب به پایه پل به علت کاهش فشار از سطح آزاد جریان به سمت بستر، جریانات رو به پایین ایجاد می گردد و این جریانات رو به پایین پس از برخورد به بستر با جریان اصلی برخورد کرده و گرداب نعل اسبی را بوجود می آورد. گرداب های نعل اسبی بیشتر در جلو پایه پل فعالیت دارند. جدائی جریان از پایه پل، در پشت پایه گرداب برخاستگی را بوجود می آورد. علت تشکیل گرداب های برخاستگی افزایش تنش برشی در پشت پایه پل می باشد. بررسی ها نشان می دهد گرداب های نعل اسبی و برخاستگی نقش عمده ای را در ایجاد حفره آبشستگی اطراف پایه پل دارند (بروزرز و رادکیوی 1991). آبشستگی موضعی به دو حالت آبشستگی آب زلال و آبشستگی بستر زنده تقسیم بندی می شود. در آبشستگی آب زلال به علت عدم حرکت رسوبات بالادست پایه پل، حداکثر مقدار عمق حفره آبشستگی ایجاد می گردد. در آبشستگی بستر زنده، بستر بالادست پایه پل حمل رسوب دارد و به همین علت حفره آبشستگی با این رسوبات پر شده و عمق حفره آبشستگی را کاهش می دهد. با توجه به شکل 1 در صورتی که سرعت متوسط جریان ( $V$ )، از سرعت متوسط بحرانی و یا به عبارت دیگر سرعت متوسط جریان در آستانه حرکت ذرات رسوبی ( $V_c$ )، بیشتر باشد آبشستگی بستر زنده ایجاد می گردد و آبشستگی آب زلال موقعی ایجاد می گردد که سرعت متوسط جریان در محدوده  $0.3V_c < V < V_c$  باشد (ملویل و چپو 1999).

محققین برای جلوگیری و کاهش آبشستگی اطراف پایه پل روش‌های مختلفی را ارائه کرده‌اند که از مهمترین آنها می‌توان به استفاده از سنگچین، صفحات مستغرق، شمع‌های حفاظتی، شکاف و طوق اشاره کرد. نصب طوق در اطراف پایه پل جلوگیری از حرکت ذرات رسوبی را می‌گیرد و فعالیت گرداب‌های نعل‌اسبی را تضعیف می‌کند. همچنین در پایه‌های طوقدار سرعت آبشستگی کاهش یافته و یا بعبارت دیگر زمان شروع آبشستگی به تاخیر می‌افتد. لارسن و توچ (1956) را می‌توان از محققین پیشگام در این رابطه دانست. آنها از وسیله‌ای شبیه طوق برای جلوگیری از آبشستگی پایه پل استفاده کردند و به این نتیجه رسیدند که این روش آبشستگی اطراف پایه پل را ضعیف می‌سازد. توماس (1967) برای جلوگیری و کاهش آبشستگی اطراف پایه پل تحقیقاتی انجام داد. وی مشاهده کرد، عمق و توسعه حفره آبشستگی بوسیله طوق کاهش می‌یابد. توماس آزمایشهای خود را بر روی پایه استوانه‌ای به قطر 50 میلیمتر انجام داد و از طوقهای 100 و 150 میلیمتری برای کاهش آبشستگی استفاده کرد. وی گزارش کرد طوق 150 میلیمتری در نزدیکی‌های بستر کاهش محسوسی را نشان داده است. لذا او قطر طوق و موقعیت آنرا در کاهش آبشستگی حائز اهمیت بیان کرده است. اتما (1980) آزمایش‌های خود را در یک کانال آزمایشگاهی به عرض 46 سانتیمتر انجام داد. وی از پایه استوانه‌ای به قطر 45 میلیمتر استفاده کرد و آزمایشهای خود را در شرایط آبشستگی آب زلال و در حالت  $\frac{V}{V_c} = 0.90$  انجام داد. اتما (1980) از طوقی به عرض دو برابر قطر پایه ( $W_c = 2D$ ) و با ضخامت 0/4 میلیمتر ( $e_c = 0.4mm$ ) استفاده کرد و موقعیت قرارگیری طوق از بستر را به صورت زیر انتخاب کرد:

$$\frac{y_c}{D} = 0.5, 0, -0.5, -0.1$$

همچنین برای محاسبه پارامتر شدت جریان، ملویل (1997) روابط زیر را استخراج کرده است:

[3]

$$\begin{cases} k_i = \frac{V}{V_c} & \frac{V}{V_c} < 1 \\ k_i = 1 & \frac{V}{V_c} \geq 1 \end{cases}$$

در رابطه 3،  $V$  سرعت متوسط جریان و  $V_c$  سرعت متوسط بحرانی (سرعت در آستانه حرکت ذرات رسوبی) می‌باشند. ضریب اندازه ذرات رسوبی در رابطه ملویل بصورت زیر محاسبه می‌شود:

[4]

$$\begin{cases} k_d = 0.57 \log(2.24 \frac{b}{d_{50}}) & , \frac{b}{d_{50}} < 25 \\ k_d = 1 & , \frac{b}{d_{50}} > 25 \end{cases}$$

در رابطه فوق  $d_{50}$  اندازه متوسط ذرات رسوبی و  $b$  عرض یا قطر پایه می‌باشند. شپارد و میلر (2006) رابطه زیر را برای محاسبه عمق تعادلی حفره آبشستگی در شرایط آبشستگی آب زلال ارائه داده‌اند:

[5]

$$\frac{d_{se}}{D} = 2.5 f_1(\frac{y}{D}) \cdot f_2(\frac{D}{d_{50}}) \cdot \left\{ 1 - 1.75 \left[ \ln\left(\frac{V}{V_c}\right) \right]^2 \right\}$$

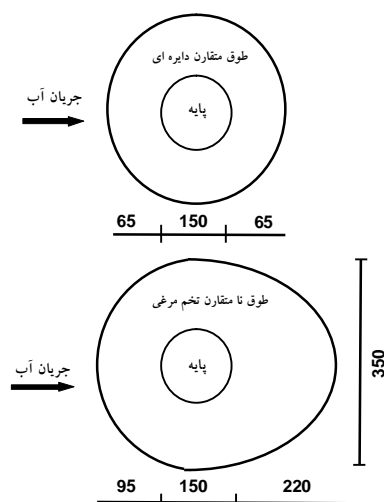
فوق  $D$  قطر پایه می‌باشد. توابع  $f_1$  و  $f_2$  از رابطه 6 محاسبه می‌شوند و بقیه پارامترها قبلاً تعریف شده‌اند.

[6]

$$\begin{cases} f_1(\frac{y}{D}) = \tanh\left[\left(\frac{y}{D}\right)^{0.4}\right] \\ f_2(\frac{D}{d_{50}}) = \frac{\frac{D}{d_{50}}}{0.4\left(\frac{D}{d_{50}}\right)^{1.2} + 10.6\left(\frac{D}{d_{50}}\right)^{-0.13}} \end{cases}$$

حالی بود که طوق به تنهایی 20 در صد عمق حفره آبشستگی را کاهش داده بود.

زراتی و عزیزی (1376) با استفاده از طوقی به پهنای عرض مدل پایه پل توانستند آبشستگی را 80 درصد کاهش دهند. آنها مدل پایه پل را با سطح مقطع مستطیلی و با دماغه گرد انتخاب کردند. پارسابصیر و همکاران (1383) برای کاهش آبشستگی در اطراف پایه پل از سنگچین و طوق بصورت همزمان استفاده کردند. آنها با استفاده از طوق‌هایی به قطر 2 و 3 برابر قطر مدل پایه پل و 8 اندازه مختلف برای دانه‌های سنگچین آزمایش‌هایی انجام دادند. آنها به این نتیجه رسیدند که با استفاده همزمان طوق و سنگچین می‌توان آبشستگی را به حداقل رساند. همچنین تاثیر طوق بزرگ را در این زمینه مثبت بیان کردند.



شکل 2- طوق‌های متقارن و نامتقارن

تحقیقات صورت گرفته عملکرد طوق در کاهش سرعت و عمق آبشستگی را نشان می‌دهند. مسئله‌ای که حائز اهمیت است شکل طوق و تعیین ابعاد آن می‌باشد که تحقیقات ناچیزی روی آن صورت گرفته است. هدف از این تحقیق بررسی عملکرد طوق‌های مستطیلی و تعیین ابعاد مناسب آن، در کاهش عمق و سرعت آبشستگی پایه پل استوانه‌ای می‌باشد.

$y_c$  فاصله طوق از بستر، علامت منفی بیانگر نصب طوق در زیر بستر می‌باشد)

وی در حالت  $\frac{y_c}{D} = 0.5$  کاهش‌ی را در عمق حفره آبشستگی مشاهده نکرد و عملکرد طوق در بالای بستر را رد کرد و بکارگیری طوق در نزدیکی‌های بستر را توصیه کرده و خاطر نشان کرده است که پایه‌های طوقدار سرعت آبشستگی را کاهش می‌دهند. درگاهی (1987) تحقیقاتی در زمینه مکانیزم آبشستگی اطراف پایه پل و چگونگی تاثیر طوق در عملکرد جریان‌ات رو به پایین و در نهایت کاهش آبشستگی پایه پل انجام داد. درگاهی از دو طوق دایره‌ای و تخم‌مرغی استفاده کرد (شکل 2) و موقعیت طوق‌ها را از بستر به صورت زیر انتخاب کرد:

$$\frac{y_c}{y} = 0.25, 0.05, -0.015, -0.05$$

آزمایش‌های درگاهی در شرایط زیر انجام گرفته است:

$$d_{50} = 0.36 \text{ mm}, D = 0.15 \text{ m}, y = 0.2 \text{ m}$$

$$V = 0.26 \frac{\text{m}}{\text{s}}, \frac{V}{V_c} = 0.85$$

درگاهی کاهش سرعت آبشستگی را در حالت طوقدار مشاهده کرد و گزارش کرد که شکل طوق و موقعیت آن نمی‌توانند تغییری در مکانیزم آبشستگی داشته باشند. همچنین وی به کارگیری طوق در بالای بستر را رد کرد و نتایج محققین قبلی در این مورد را تأیید نمود. درگاهی بیشترین کاهش عمق حفره آبشستگی را در حالت

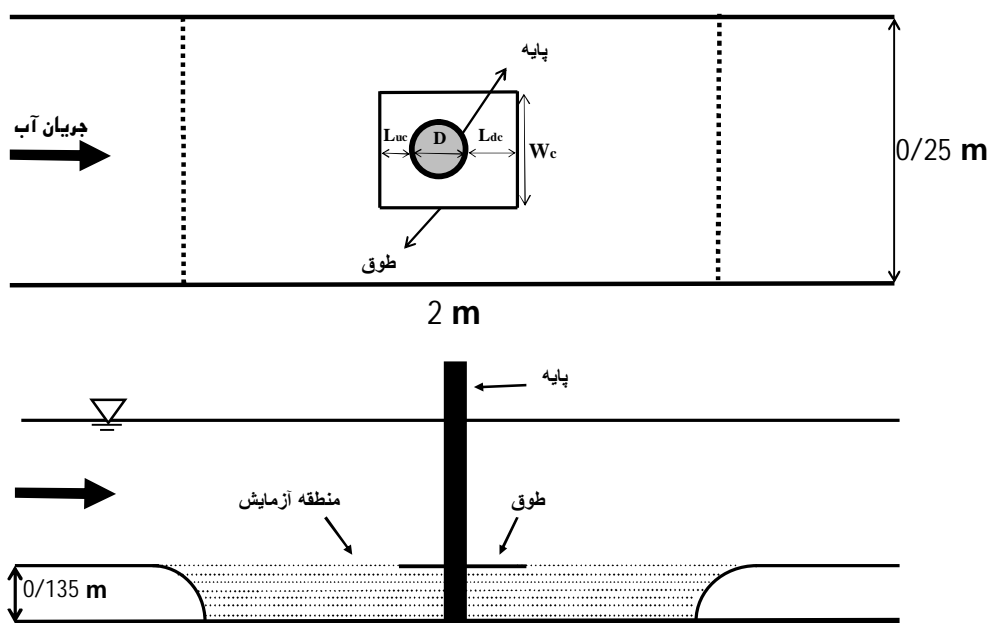
$$\frac{y_c}{y} = -0.015 \text{ مشاهده کرد. حداکثر مقدار کاهش عمق}$$

حفره آبشستگی در این حالت 50 و 70 در صد، بترتیب در بالادست و پایین‌دست پایه پل و با طوق تخم‌مرغی (نامتقارن) می‌باشد. وی با طوق دایره‌ای توانست عمق آبشستگی را در حدود 40 کاهش دهد. لازم به ذکر است که مدت زمان انجام آزمایش‌های درگاهی 12 ساعت بوده است. چپو (1992) با استفاده همزمان طوق و شکاف توانست عمق حفره آبشستگی را به صفر برساند این در

## مواد و روش‌ها

است که بوسیله آن می‌توان سرعت جریان و عمق آب را تنظیم کرد. با توجه به نوع آزمایش‌ها و همچنین کانال آزمایشگاهی لازم بود تغییراتی بر روی آن داده شود. کف کانال توسط سکوها فلزی به ارتفاع 13/5 سانتیمتر بالا آورده شد و منطقه‌ای بین سکوها به طول 2 متر و در فاصله 3 متری از ابتدای کانال به عنوان منطقه آزمایش منظور شد. این منطقه به ارتفاع سکوها از رسوبات غیر چسبنده پر شد و بستر متحرک ایجاد گردید (شکل 3).

آزمایش‌ها در آزمایشگاه هیدرولیک گروه مهندسی آب دانشگاه تبریز انجام گردید. در این آزمایشگاه کانال آزمایشگاهی با کف فلزی و دیواره‌های شیشه‌ای به طول 9 متر، عرض 25 سانتیمتر، ارتفاع 50 سانتیمتر و شیب 0/0022 می‌باشد. در انتهای کانال حوضچه ای وجود دارد که یک سرریز مثلثی در آن تعبیه شده است تا بتوان دبی جریان را با دقت 0/1 لیتر بر ثانیه اندازه گرفت. انتقال آب از مخزن اصلی آزمایشگاه به کانال در یک مدار بسته توسط دو دستگاه پمپ به صورت نوبتی انجام می‌گیرد. یک دریچه کشویی قابل تنظیم در پایین دست کانال نصب شده



شکل 3- پلان و پروفیل کانال آزمایشگاهی

بنابراین با  $S_g = 1/47$ ، رسوبات بستر تأثیری در کاهش عمق آبشستگی ندارد.

در آزمایش‌ها برای رسیدن به حداکثر مقدار عمق آبشستگی موارد زیر به دقت رعایت می‌شد:

الف) در انتخاب قطر یا عرض مدل پایه پل باید تأثیر عرض کانال آزمایشگاهی ( $W$ ) در نظر گرفته شود. نتایج تحقیقات پیشین که بر روی همین کانال

شکل 4 منحنی دانه بندی ذرات رسوبی را نشان می‌دهد. انحراف معیار ذرات رسوبی برابر است با:

$$S_g = \left( \frac{d_{84.1}}{d_{15.9}} \right)^{0.5} = 1.47$$

در صورتی که  $S_g < 1/5$  باشد، مصالح بستر را می‌توان یکنواخت فرض نمود و برای  $S_g \geq 2$  مصالح بستر غیر یکنواخت در نظر گرفته می‌شود (شفاعی بجمستان، 1373).

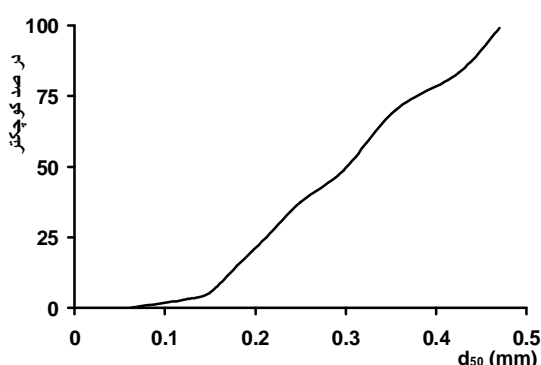
$$q_c = 0.0019d_{50}^{-0.384}, \quad d_{50} < 0.0009 \quad [8]$$

با توجه به اینکه برقراری حالت  $\frac{V}{V_c} = 1$  و کنترل آن

مشکل است در تمامی آزمایشها حالت  $\frac{V}{V_c} = 0.90$

و  $\frac{V}{V_c} = 0.95$  لحاظ گردید.

در آزمایشها مدل پایه پل در ناحیه ۲ متری کانال آزمایشگاهی (بستر متحرک) و در وسط آن نصب گردید و طوق‌های مستطیلی نیز از جنس پلاستیک سخت و به ضخامت ۰/۶ میلیمتر انتخاب شدند. شایان ذکر است طوق‌های مستطیلی در تراز بستر (روی بستر) قرار می‌گرفتند و نسبت به عرض کانال آزمایشگاهی حالت تقارن داشتند.



شکل ۴- منحنی دانه‌بندی ذرات رسوبی در آزمایشها

### نتایج و بحث

آبشستگی مدل پایه پل در حالت بدون طوق

با توجه به اهداف این تحقیق، ابتدا آزمایش‌های بدون طوق انجام شد. برای این منظور آزمایش‌هایی با  $\frac{V}{V_c}$  های ۰/۹۰ و ۰/۹۵ انجام گرفت. در این آزمایشها آبشستگی از جلو پایه شروع و سپس آبشستگی به طرفین پایه کشیده می‌شد و پس از مدت کوتاهی آبشستگی به پایین دست پایه می‌رسید. سرعت آبشستگی در آزمایش‌های بدون طوق در لحظات اولیه

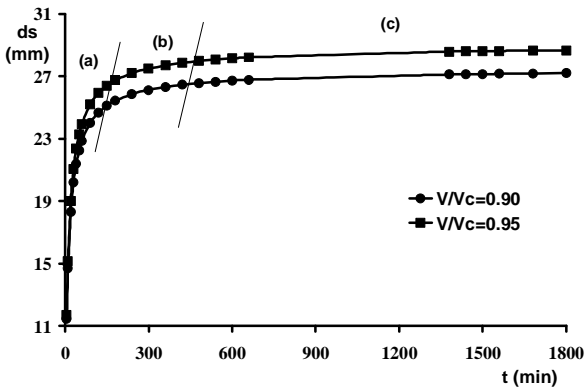
انجام یافته است نشان داده که اگر  $\frac{D}{W} < 0.11$  باشد عمق آبشستگی تحت تاثیر عرض کانال آزمایشگاهی قرار نمی‌گیرد و حداکثر مقدار عمق آبشستگی ایجاد می‌شود (ارونقی و همکاران، ۱۳۸۵). برای این منظور مدل پایه پل با مقطع دایره‌ای و به قطر ۱۲ میلیمتر انتخاب گردید. (ب) قطر متوسط ذرات رسوبی باید بگونه‌ای باشد که حداکثر مقدار عمق آبشستگی ایجاد شود. ملویل (۱۹۹۷) برای این موضوع شرط  $\frac{D}{d_{50}} > 25$  را مطرح کرده است. در این تحقیق شرط مذکور برقرار بود. با توجه به شکل ۴ و قطر مدل پایه پل خواهیم داشت:

$$D = 12\text{mm}, \quad d_{50} = 0.3\text{mm} \Rightarrow \frac{D}{d_{50}} = 40$$

(ج) عمق جریان آب در کانال آزمایشگاهی یکی از کمیت‌هایی است که در صورت درست انتخاب نکردن آن حداکثر مقدار عمق آبشستگی ایجاد نمی‌شود. در آزمایشها شرط  $\frac{D}{y} < 0.7$  به دقت رعایت می‌شد تا عمق حفره آبشستگی تحت تاثیر عمق جریان قرار نگیرد (ملویل ۱۹۹۷). (د) با توجه به اینکه حداکثر مقدار عمق آبشستگی در حالت آبشستگی آب زلال و در حالت  $\frac{V}{V_c} = 1$  ایجاد می‌شود، مدل برای حالت آبشستگی آب زلال طراحی شد. سرعت بحرانی جریان با برقراری دبی ثابت و کاهش تدریجی عمق جریان در چند مرحله محاسبه گردید و سپس درستی آن با روابط تجربی مقایسه شد. نیل (۱۹۷۳) برای محاسبه سرعت بحرانی رابطه زیر را مطرح کرده است:

$$V_c = q_c^{1/2} K_u^{1/6} 31.08 y^{1/6} d_{50}^{1/3} \quad [7]$$

در این رابطه،  $V_c$  سرعت بحرانی بر حسب متر بر ثانیه،  $y$  عمق آب بر حسب متر،  $d_{50}$  اندازه متوسط ذرات رسوبی بر حسب متر و  $K_u$  ضریب ثابتی است که مقدار آن در سیستم امریکایی یک و در سیستم انگلیسی ۱/۸۱ می‌باشد. برای محاسبه پارامتر شیلدز بحرانی ( $q_c$ )، مولر (۱۹۹۶) رابطه زیر را توسعه داده است:



شکل 5- تغییرات زمانی عمق آبستگی

جدول 1- زمان و عمق تعادل آبستگی

$\frac{V}{V_c}$	$d_{se}$ (mm)	$\frac{d_{se}}{D}$	$t_e$ (hr)
۰/۹۰	۲۶/۹۸	۲/۲۵	۱۷
۰/۹۵	۲۸/۴۶	۲/۳۷	۱۷/۸

عمق بی بعد آبستگی  $\left(\frac{d_{se}}{D}\right)$  در جدول 2 با روابط ارائه شده توسط ملویل (1997) و شپارد و میلر (2006) مقایسه گردیده است. به طوریکه در جدول مشخص است نتایج آزمایش‌های تحقیق حاضر هم-خوانی خوبی را نشان می‌دهند.

جدول 2- مقایسه عمق بی بعد آبستگی  $\left(\frac{d_{se}}{D}\right)$  با روابط محققین

$\frac{V}{V_c}$	$\frac{D}{d_{50}}$	$\frac{y}{D}$	$\frac{d_{se}}{D}$ ملویل (1997)	$\frac{d_{se}}{D}$ شپارد و میلر (2006)	$\frac{d_{se}}{D}$ تحقیق حاضر
0/90	40	17/63	2/16	2/45	2/25
0/95	40	16/66	2/28	2/48	2/37

منظور آزاد گذاشتن فعالیت گرداب‌های برخاستگی در پایین‌دست پایه و تضعیف کردن گرداب‌های نعل‌اسبی و کاهش انرژی جریان‌ات رو به پایین در جلو پایه می‌باشد. در این آزمایش‌ها برای طول طوق در پایین-

آزمایش بیشتر بود و سپس بتدریج کم می‌گردید. در طی آزمایش‌های انجام گرفته عمق آبستگی در جلو پایه پل و در فاصله 2 میلیمتری از پایه در زمانهای مشخص اندازه-گیری می‌گردید. توسعه زمانی عمق آبستگی در جلو پایه پل در شکل 5 نشان داده شده است.

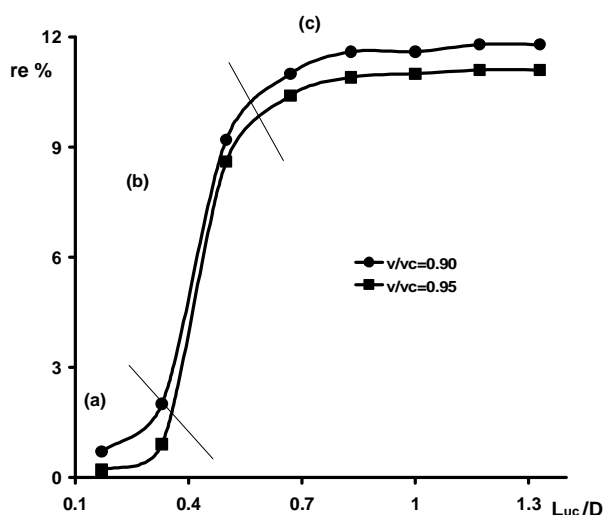
در 2 ساعت اول سرعت آبستگی بیشتر بود بطوریکه بیش از 80 درصد عمق آبستگی در این فاصله زمانی صورت می‌گرفت (قسمت a منحنیها). در قسمت b منحنیها افزایش عمق آبستگی نسبتا کم بود. هم‌چنانکه در قسمت c منحنیها مشاهده می‌شود تغییرات عمق آبستگی بسیار ناچیز است لذا از این قسمت می‌توان زمان تعادل عمق آبستگی را محاسبه کرد. خلاصه نتایج آزمایش‌ها در جدول 1 نشان داده شده است.

در این جدول  $t_e$  زمان تعادل عمق آبستگی و  $d_{se}$  عمق تعادل آبستگی می‌باشند.

آبستگی مدل پایه پل در حالت طوق یک‌طرفه

در آزمایش‌های این قسمت و به منظور برآورد طول مناسب طوق در بالادست  $(L_{inc})$  از طوق‌های مستطیلی یک-طرفه استفاده شد (شکل 6). انتخاب طوق‌های یک‌طرفه به

شکل 7 تغییرات درصد کاهش عمق آبشستگی را با طول بی بعد طوق در بالادست پایه  $\left(\frac{L_{uc}}{D}\right)$ ، نشان می-دهد.



شکل 7- تغییرات درصد کاهش عمق آبشستگی با طول بی بعد طوق در بالادست.

منحنی‌های این شکل به سه قسمت تقسیم شده است. در قسمت a طول طوق نتوانسته است عمق آبشستگی را به خوبی کاهش دهد. در قسمت b طول طوق عمق آبشستگی را کاهش داده است ولی مقدار کاهش روند صعودی دارد. در قسمت c طول طوق بالادست عمق آبشستگی را کاهش داده است ولی افزایش  $\frac{L_{uc}}{D}$  تغییرات محسوسی را در کاهش عمق آبشستگی ایجاد نکرده است چرا که منحنی‌های این قسمت حالت افقی دارند. با استفاده از جدول 3 و مشخصات قسمت c شکل 7 طول مناسب طوق در بالادست پایه 11 میلیمتر محاسبه می‌شود. بنابراین طول مناسب طوق در بالادست پایه و مقدار بی بعد آن به صورت زیر خواهند شد:

$$L_{uc} = 11\text{mm} \quad , \quad \frac{L_{uc}}{D} = 0.92$$

دست  $(L_{dc})$  مقدار ناچیزی در نظر گرفته شد و طول طوق در بالادست نیز به تدریج افزایش می‌یافت. پس از اتمام آزمایش عمق آبشستگی در جلو پایه اندازه‌گیری می‌شد و درصد کاهش عمق آبشستگی در مقایسه با حالت بدون طوق محاسبه می‌گردید. افزایش طول طوق در بالادست تا جایی ادامه پیدا می‌کرد که پس از آن مقدار تغییر محسوسی در عمق آبشستگی ایجاد نگردد. در این آزمایش‌ها مشخصات طوق و جریان به صورت زیر می‌باشند:

$$L_{dc} = 2\text{mm} \quad ,$$

$$L_{uc} = 2, 4, 6, 8, 10, 12, 14, 16\text{mm}$$

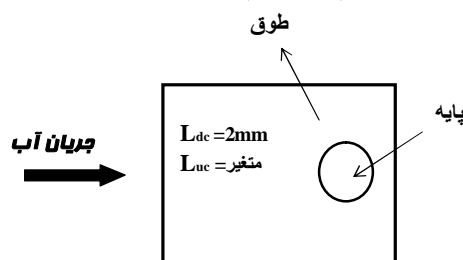
$$W_c = 24\text{mm} \quad , \quad e_c = 0.6\text{mm} \quad ,$$

$$\frac{V}{V_c} = 0.90, 0.95$$

( $W_c$  عرض طوق و  $e_c$  ضخامت طوق می‌باشند)

لازم به ذکر است مکانیزم آبشستگی در طوق‌های یک‌طرفه مشابه حالت بدون طوق بود. در آزمایش‌های این قسمت آبشستگی حداکثر پس از 0/5 ساعت به جلو مدل پایه پل می‌رسید به عبارت دیگر حداکثر 0/5 ساعت طول می‌کشید تا زیر طوق از رسوبات خالی شود و پس از آن زمان به اندازه زمان تعادل عمق آبشستگی، آزمایش‌ها ادامه پیدا می‌کرد. خلاصه آزمایش‌ها در جدول 3 نشان داده شده است. در این جدول  $re$  درصد کاهش عمق آبشستگی و  $d'_{se}$  عمق آبشستگی در حالت طوق‌دار می‌باشند. با استفاده از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$re = \left(1 - \frac{d'_{se}}{d_{se}}\right) \times 100 \quad [9]$$



شکل 6- طوق یک‌طرفه



آبستگی مدل پایه پل در حالت طوق دو طرفه

در تمامی آزمایشهای این قسمت طول طوق در بالادست پایه برابر با مقدار مناسب آن ( $L_{uc} = 11mm$ ) در نظر گرفته شد (شکل 8). به منظور برآورد طول مناسب طوق در پایین دست پایه ( $L_{dc}$ ) مقدار آن بتدریج افزایش داده می شد. این روند تا جایی ادامه پیدا می کرد که افزایش طول طوق در پایین دست پایه تاثیر محسوسی در کاهش عمق

آبستگی نداشته باشد. همه آزمایشها تحت شرایط آبستگی آب زلال و در دو مقدار  $\frac{V}{V_c}$  انجام گرفت. مدت زمان آزمایشها در ارتباط با زمان تعادل عمق آبستگی در نظر گرفته شد. مشخصات طوق و جریان در این آزمایشها بصورت زیر می باشند:

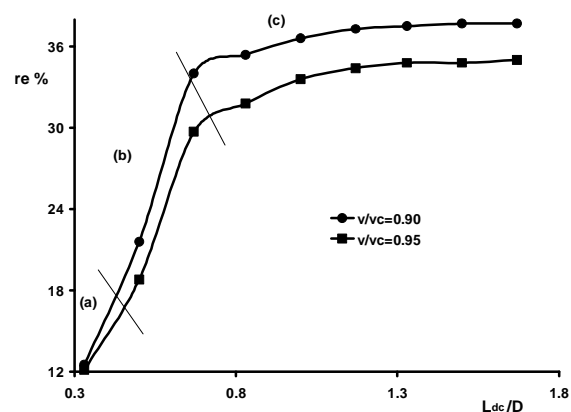
جدول 3- مشخصات آزمایشهای آبستگی مدل پایه پل در طوق یک طرفه

$Q$ ( $lits^{-1}$ )	$y$ ( $cm$ )	$V$ ( $ms^{-1}$ )	$V_c$ ( $ms^{-1}$ )	$\frac{V}{V_c}$	$e_c$ ( $mm$ )	$W_c$ ( $mm$ )	$L_{dc}$ ( $mm$ )	$L_{uc}$ ( $mm$ )	$\frac{L_{uc}}{D}$	$d'_{se}$ ( $mm$ )	$\frac{d'_{se}}{D}$	$re$ %
6/41	13/42	0/191	0/21	0/91	0/6	24	2	2	0/17	26/8	2/23	0/7
6/45	13/65	0/189	0/21	0/90	0/6	24	2	4	0/33	26/45	2/2	2
6/51	13/92	0/187	0/21	0/89	0/6	24	2	6	0/5	24/5	2/04	9/2
6/53	13/53	0/193	0/21	0/92	0/6	24	2	8	0/67	24	2	11
6/47	13/83	0/187	0/21	0/89	0/6	24	2	10	0/83	23/85	1/99	11/6
6/58	13/92	0/189	0/21	0/90	0/6	24	2	12	1	23/85	1/99	11/6
6/51	14/07	0/185	0/21	0/88	0/6	24	2	14	1/17	23/8	1/98	11/8
6/42	13/44	0/191	0/21	0/91	0/6	24	2	16	1/33	23/8	1/98	11/8
6/4	12/67	0/202	0/21	0/96	0/6	24	2	2	0/17	28/4	2/37	0/2
6/41	12/88	0/199	0/21	0/95	0/6	24	2	4	0/33	28/2	2/35	0/9
6/51	13/08	0/199	0/21	0/95	0/6	24	2	6	0/5	26	2/17	8/6
6/53	13/25	0/197	0/21	0/94	0/6	24	2	8	0/67	25/5	2/12	10/4
6/45	13/23	0/195	0/21	0/93	0/6	24	2	10	0/83	25/35	2/11	10/9
6/5	13/19	0/197	0/21	0/94	0/6	24	2	12	1	25/32	2/11	11
6/47	13	0/199	0/21	0/95	0/6	24	2	14	1/17	25/3	2/11	11/1
6/41	12/88	0/199	0/21	0/95	0/6	24	2	16	1/33	25/3	2/11	11/1

دهد و مقدار مناسب حاصل شده است. بنابراین با استفاده از جدول 4 و مشخصات قسمت C شکل 9 طول مناسب طوق در پایین دست پایه 17 میلیمتر محاسبه می شود. بنابراین طول مناسب طوق در پایین دست پایه و مقدار بی بعد آن بصورت زیر خواهند شد:

$$L_{dc} = 17mm \quad , \quad \frac{L_{dc}}{D} = 1.42$$

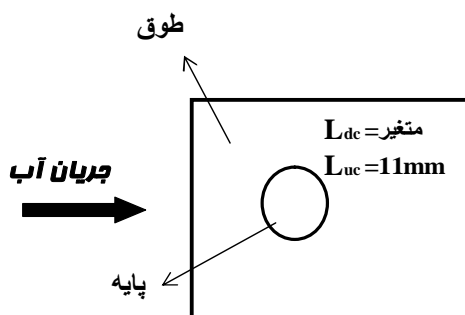
با انجام آزمایش های این قسمت عملکرد طوق های مستطیلی نامتقارن در کاهش عمق آبشستگی آشکار گردید (جدول 4). بنابراین می توان گفت عملکرد طوق های نامتقارن بهتر از طوق های متقارن است و این موضوع با نتیجه درگامی (1987) همخوانی دارد (منظور از طوق نامتقارن طوقی است که طول آن در بالادست و پایین دست مدل پایه پل برابر نباشد).



شکل 9- تغییرات درصد کاهش عمق آبشستگی با طول بی بعد طوق در پایین دست

### تاثیر عرض طوق در آبشستگی مدل پایه پل

بعد از برآورد طول مناسب طوق در بالادست و پایین دست مدل پایه پل، آزمایش هایی جهت برآورد عرض مناسب طوق صورت گرفت. در این آزمایشها طول طوق در بالادست و پایین دست پایه برابر با مقادیر مناسب آنها در نظر گرفته شد (شکل 10). آزمایش ها بیانگر این موضوع بودند که افزایش عرض طوق سرعت آبشستگی را به شدت کاهش می دهد به طوری که در طوقی به عرض سه برابر قطر پایه پس از



شکل 8- طوق دو طرفه

$$L_{uc} = 11mm \quad , \quad L_{dc} = 4, 6, 8, 10, 12, 14, 16, 18, 20mm$$

$$W_c = 24mm \quad , \quad e_c = 0.6mm \quad ,$$

$$\frac{V}{V_c} = 0.90, 0.95$$

مکانیزم آبشستگی در حالت طوق های دوطرفه با حالت بدون طوق و همچنین حالت طوق های یکطرفه متفاوت بود. در آبشستگی طوق های دوطرفه آبشستگی در پشت پایه و از لبه های طوق آغاز می گردید و سپس به آرامی پس از عبور از زیر طوق به جلو پایه می رسید بعبارت دیگر در این آزمایش ها برخلاف حالت های قبلی ابتدا گرداب های برخاستگی و سپس گرداب های نعل اسبی فعالیت داشتند. مدت زمان خالی شدن رسوبات زیر طوق بسته به شرایط جریان و ابعاد طوق از 0/5 ساعت تا 10 ساعت تغییر می کرد این بدان معنی است که در طوق های دوطرفه سرعت آبشستگی کاهش می یابد. خلاصه آزمایشها در جدول 4 نشان داده شده است.

شکل 9 تغییرات درصد کاهش عمق آبشستگی را با طول

بی بعد طوق در پایین دست پایه  $\left(\frac{L_{dc}}{D}\right)$ ، نشان می دهد.

منحنی های این شکل به سه قسمت تقسیم شده است. قسمت a بیانگر این است که طول طوق در پایین دست پایه نتوانسته است آبشستگی را به خوبی کاهش دهد چرا که مقادیر آن به مقدار مناسب طوق در حالت یکطرفه نزدیک است. در قسمت b افزایش طول طوق در پایین دست پایه نتوانسته است عمق آبشستگی را به خوبی کاهش دهد به طوری که منحنی کاهش عمق آبشستگی در این قسمت سیر صعودی دارد. در قسمت c درصد کاهش عمق آبشستگی تقریباً به مقدار ثابتی رسیده یعنی اینکه دیگر افزایش طول طوق در پایین دست پایه نمی تواند عمق آبشستگی را کاهش

مکانیزم آبخستگی در این گروه از آزمایش‌ها همانند آبخستگی طوق‌های دوطرفه بود. مدت زمان آزمایش‌ها بستگی به زمان خالی شدن رسوبات زیر طوق و زمان تعادل عمق آبخستگی داشت به بیان دیگر آزمایش‌ها پس از خالی شدن رسوبات زیر طوق به اندازه زمان تعادل عمق آبخستگی ادامه پیدا می‌کرد. خلاصه آزمایش‌ها در جدول 5 نشان داده شده است.

62 ساعت آبخستگی در اطراف مدل پایه پل مشاهده نشد. مشخصات طوق و جریان در این آزمایش‌ها بصورت زیر می‌باشند:

$$L_{uc} = 11mm \quad , \quad L_{dc} = 17mm$$

$$W_c = 18, 24, 30, 36mm \quad ,$$

$$e_c = 0.6mm \quad ,$$

$$\frac{V}{V_c} = 0.90, 0.95$$

جدول 4- مشخصات آزمایش‌های آبخستگی مدل پایه پل در طوق دوطرفه

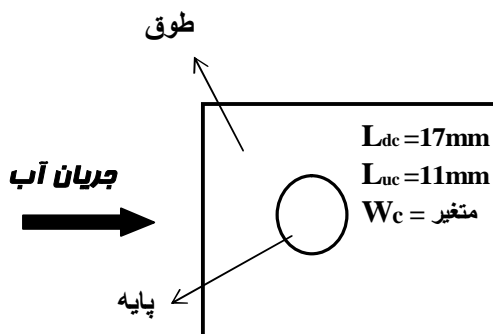
$Q$ ( $lits^{-1}$ )	$y$ ( $cm$ )	$V$ ( $ms^{-1}$ )	$V_c$ ( $ms^{-1}$ )	$\frac{V}{V_c}$	$e_c$ ( $mm$ )	$W_c$ ( $mm$ )	$L_{uc}$ ( $mm$ )	$L_{dc}$ ( $mm$ )	$\frac{L_{dc}}{D}$	$d'_{se}$ ( $mm$ )	$\frac{d'_{se}}{D}$	$re$ %
6/5	13/75	0/189	0/21	0/90	0/6	24	11	4	0/33	23/6	1/97	12/5
6/45	13/5	0/191	0/21	0/91	0/6	24	11	6	0/5	21/15	1/76	21/6
6/51	13/92	0/187	0/21	0/89	0/6	24	11	8	0/67	17/8	1/48	34
6/47	13/41	0/193	0/21	0/92	0/6	24	11	10	0/83	17/42	1/45	35/4
6/51	13/92	0/187	0/21	0/89	0/6	24	11	12	1	17/1	1/42	36/6
6/5	13/75	0/189	0/21	0/90	0/6	24	11	14	1/17	16/9	1/41	37/3
6/47	13/69	0/189	0/21	0/90	0/6	24	11	16	1/33	16/85	1/4	37/5
6/41	13/71	0/187	0/21	0/89	0/6	24	11	18	1/5	16/8	1/4	37/7
6/55	13/71	0/191	0/21	0/91	0/6	24	11	20	1/67	16/8	1/4	37/7
6/61	13/42	0/197	0/21	0/94	0/6	24	11	4	0/33	25	2/08	12/1
6/55	13/3	0/197	0/21	0/94	0/6	24	11	6	0/5	23/1	1/92	18/8
6/43	12/73	0/202	0/21	0/96	0/6	24	11	8	0/67	20	1/67	29/7
6/55	12/84	0/204	0/21	0/97	0/6	24	11	10	0/83	19/4	1/62	31/8
6/57	13/47	0/195	0/21	0/93	0/6	24	11	12	1	18/9	1/57	33/6
6/5	13/06	0/199	0/21	0/95	0/6	24	11	14	1/17	18/65	1/55	34/4
6/51	13/08	0/199	0/21	0/95	0/6	24	11	16	1/33	18/65	1/55	34/4
6/48	13/15	0/197	0/21	0/94	0/6	24	11	18	1/5	18/55	1/54	34/8
6/42	12/71	0/202	0/21	0/96	0/6	24	11	20	1/67	18/5	1/54	35

عرض مناسب طوق را می‌توان سه برابر قطر پایه معرفی کرد یعنی:

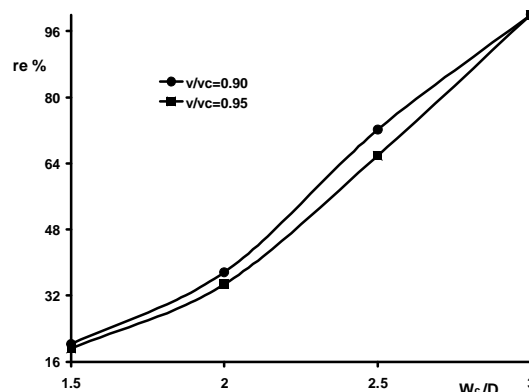
$$W_c = 36mm \quad , \quad \frac{W_c}{D} = 3$$

شکل 11 درصد کاهش عمق آبخستگی را با عرض بی بعد طوق  $\left(\frac{W_c}{D}\right)$ ، نشان می‌دهد. چنانچه از منحنیهای این شکل مشاهده می‌شود افزایش عرض طوق عمق آبخستگی را کاهش می‌دهد. بطوریکه در حالت  $W_c = 3D$  پس از 62 ساعت، میزان آبخستگی در اطراف پایه بسیار کم می‌باشد. با بررسی این شکل و همچنین اطلاعات مربوط به جدول 5

در آبشستگی پایه طوقدار مکانیزم آبشستگی و الگوی جریان متفاوت از حالت بدون طوق بود. در پایه بدون طوق ابتدا گردابه‌های نعل‌اسبی و سپس گردابه‌های برخاستگی فعالیت داشتند همچنین آبشستگی در این حالت از جلو پایه پل آغاز می‌شد. در پایه طوقدار ابتدا گردابه‌های برخاستگی و سپس گردابه‌های نعل‌اسبی فعالیت داشتند، همچنین آبشستگی در این حالت از لبه طوق آغاز می‌شد و سپس به طرف پایه پل گسترش می‌یافت. در آزمایش‌های انجام گرفته مشاهده گردید که افزایش ابعاد طوق عمق آبشستگی را بیشتر کاهش می‌دهد، بنابراین این موضوع نتایج توماس (1967) را تأیید می‌کند. با استفاده از جداول 4، 5 و همچنین شکل‌های 9، 11 ملاحظه می‌شود که طوق‌های نامتقارن عملکرد بهتری را نسبت به طوق‌های متقارن در کاهش عمق آبشستگی دارند که این نتیجه با نتیجه درگاهی (1987) مطابقت دارد.



شکل 10- طوق دو طرفه با عرض متغیر



شکل 11- تغییرات درصد کاهش عمق آبشستگی در طوق دو طرفه با عرض متغیر

جدول 5- مشخصات آزمایش‌های آبشستگی مدل پایه پل در طوق دوطرفه با عرض متغیر

$Q$ ( $lits^{-1}$ )	$y$ ( $cm$ )	$V$ ( $ms^{-1}$ )	$V_c$ ( $ms^{-1}$ )	$\frac{V}{V_c}$	$e_c$ ( $mm$ )	$L_{uc}$ ( $mm$ )	$L_{dc}$ ( $mm$ )	$W_c$ ( $mm$ )	$\frac{W_c}{D}$	$d'_{se}$ ( $mm$ )	$\frac{d'_{se}}{D}$	$re$ %
6/46	13/53	0/191	0/21	0/91	0/6	11	17	18	1/5	21/5	1/79	20/3
6/41	13/71	0/187	0/21	0/89	0/6	11	17	24	2	16/8	1/4	37/7
6/57	13/61	0/193	0/21	0/92	0/6	11	17	30	2/5	7/5	0/62	72/2
6/58	13/92	0/189	0/21	0/90	0/6	11	17	36	3	0	0	100
6/46	12/79	0/202	0/21	0/96	0/6	11	17	18	1/5	23	1/92	19/2
6/51	13/08	0/199	0/21	0/95	0/6	11	17	24	2	18/55	1/54	34/8
6/42	12/71	0/202	0/21	0/96	0/6	11	17	30	2/5	9/7	0/81	65/9
6/54	13/41	0/195	0/21	0/93	0/6	11	17	36	3	0	0	100

چشمگیری کاهش می‌دهد چرا که در آزمایش‌های درگاهی (1987) با طوق دایره‌ای، پس از 12 ساعت عمق آبشستگی 40 درصد کاهش یافته است این در

### نتیجه گیری

آزمایش‌های پایه طوقدار موید این موضوع بودند که بکارگیری طوق‌های مستطیلی سرعت آبشستگی را بطور

ابعاد فوق پس از 62 ساعت آبشستگی ناچیزی در اطراف مدل پایه پل مشاهده گردید.

#### تشکر و قدردانی

این مقاله مستخرج از گزارش نهایی طرح پژوهشی شماره 27/2292/د مورخ 87/8/5 می باشد که از محل اعتبارات پژوهشی دانشگاه تبریز اجرا گردیده است. بدین وسیله از حمایت مالی دانشگاه تبریز تشکر و قدردانی می شود.

حالی است که با طوق مستطیلی (تحقیق حاضر) پس از گذشت تقریباً 10 ساعت از شروع آزمایش آبشستگی اصلی شروع می گردد یعنی اینکه در 10 ساعت عمق آبشستگی صفر می باشد و این موضوع بیانگر کاهش سرعت آبشستگی با طوق مستطیلی می باشد. با انجام آزمایش های متعدد و تحت شرایط هیدرولیکی مختلف ابعاد مناسب طوق برآورد گردید. در این آزمایش ها طول طوق مستطیلی در بالادست و پایین دست نسبت به بدنه مدل پایه پل اندازه گیری گردید و مقادیر مناسب آنها بترتیب 0/92 و 1/42 برابر قطر پایه برآورد شد. ضمن اینکه عرض مناسب طوق نیز 3 برابر قطر پایه پل معرفی گردید. لازم بذکر است با

#### منابع مورد استفاده

- ارونقی ه، حسین زاده دلیرع، فاخری فرد الف و فرسادی زاده د، 1385. بررسی آزمایشگاهی تاثیر دیواره های جانبی کانال بر روی عمق حفره آبشستگی اطراف پایه های پل. مجله دانش کشاورزی، جلد 16، شماره 2. صفحه های 1 تا 11.
- پارسابصیر ه، چمنی م و زراتی الف، 1383. حفاظت پایه های پل در مقابل آبشستگی موضعی با استفاده توام از سنگچین و طوق پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، 127 صفحه.
- شفاعی بجستان م، 1373. هیدرولیک رسوب. انتشارات دانشگاه شهید چمران اهواز.
- زراتی الف و عزیززی م، 1376. بررسی روشهای کنترل و کاهش آبشستگی پایه های پل. صفحه های 261 تا 267. مجموعه مقالات اولین کنفرانس هیدرولیک ایران. 11 - 13 شهریور، دانشگاه تهران، تهران.
- Breusers NHC and Raudkivi AJ, 1991. Scouring. 2<sup>nd</sup> hydraulic structures design manual. Balkema, Rotterdam, The Netherlands.
- Chiew YM, 1992. Scour protection at bridge piers. J Hyd Eng ASCE, 118( 11): 1260-1269.
- Dargahi B, 1987. Flow field and local scouring around a cylinder. Bullten No.137 . R Inst Tech Hydr Lab Stockholm ,Sweden.
- Ettema R, 1980. Scour at bridge piers. Report No.216, University of Auckland, New Zeland.
- Laursen EM and Toch A, 1956. Scour around bridge piers and abutments. Iowa Highway Research Board, Bulletin 4, Bureau of Public Roads, Iowa.
- Melvill BW, 1997. Pier and abutment scour : Integrated approach. J Hyd Eng ASCE, 132 (2) : 125-136.

- Melvill BW and Chiew YM, 1999. Time scale for local scour at bridge piers. J Hyd Eng ASCE, 125 ( 1 ) : 59-65.
- Muller DS, 1996. Local scour at bridge piers in nonuniform sediment under dynamic conditions. Ph.D dissertation, Department of Civil Engineering, Colorado State University.
- Neill CR, 1973. Guide to bridge hydraulics. University of Toronto press, Toronto, Canada.
- Sheppard DM and Miller Jr W, 2006. Live-bed local scour experiments. J Hyd Eng ASCE, 132 (7) : 635-642.
- Thomas Z, 1967. An interesting hydraulic effect occurring at local scour. Pp.125-134 Proceeding of the 12<sup>th</sup> IAHR Congress. September 11-14, Colorado, USA.