

## تأثیر طول طوق بر توسعه آبستگی موضعی اطراف پایه مستطیل شکل پلها

محمد بدلی مشاهیر<sup>۱</sup>، امیر رضا زراتی<sup>۲\*</sup>، ابراهیم مکلف سربند<sup>۳</sup>

۱- دانشجوی دکتری مهندسی آب، دانشکده عمران و محیط زیست دانشگاه صنعتی امیرکبیر

۲- استاد هیدرولیک، دانشکده عمران و محیط زیست، دانشگاه صنعتی امیرکبیر

۳- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی آب، دانشکده عمران و محیط زیست دانشگاه صنعتی امیرکبیر

\* تهران، صندوق پستی ۱۵۹۱۴

zarrati@aut.ac.ir

**چکیده-** با نصب طوق بر روی پایه پل، جریان رو به پایین با برخورد به سطح طوق منحرف شده و بستر اطراف پایه در برابر آبستگی محافظت می‌شود. در تحقیق حاضر طوق‌هایی با عرض مؤثر ثابت 3B (که B عرض پایه است) و با طولهای مختلف 5B، 7B و 9B بر روی پایه مستطیل شکل با نسبت طول به عرض ۱:۳ نصب شده و عملکرد آن در ارتباط با توسعه زمانی آبستگی (شروع آبستگی در جلوی پایه) و کاهش عمق آبستگی مطالعه شده است. پایه در راستای جریان و با زوایای ۱۰ و ۲۰ درجه نسبت به جریان قرار داده شده و تمامی آزمایشها در شرایط آستانه حرکت ذرات، به‌منظور دستیابی به حداکثر عمق آبستگی انجام شده است. بر پایه این نتایج در حالت پایه قرار گرفته در راستای جریان تا ۱۸۵ ساعت، آبستگی به زیر طوق 9B نرسیده و حداکثر آبستگی در کنارهای طوق اتفاق می‌افتاد که میزان آن در حدود ۶۰ درصد کمتر از آبستگی در پایه بدون حفاظ است. وقتی پایه نسبت به راستای جریان زاویه داشته باشد، کارایی طوق در کاهش نرخ آبستگی کاهش می‌یابد. نتایج نشان می‌دهد در پایه زاویه دار عمق آبستگی پس از گذشت ۵۰ ساعت از شروع آزمایش به طور متوسط در حدود ۳۰ درصد نسبت به پایه بدون حفاظ کاهش می‌یابد. همچنین نرخ آبستگی با وجود طوق بلندتر کمتر می‌شود.

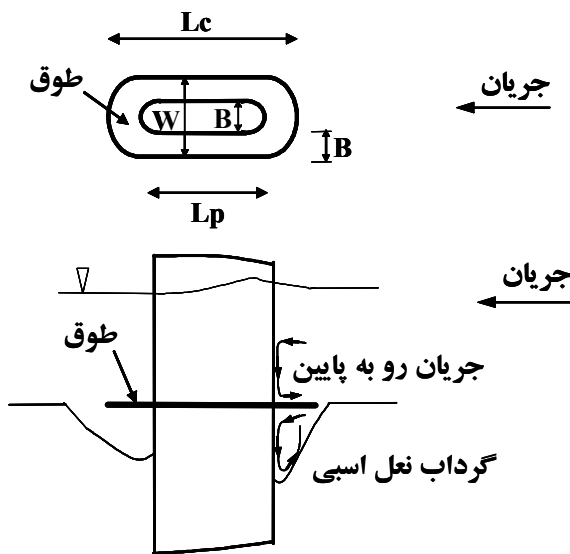
**کلید واژگان:** آبستگی، پایه پل، طوق، توسعه زمانی آبستگی.

### ۱- مقدمه

و نفوذ به داخل حفره آبستگی به طرف بالادست چرخیده و گردابی را به‌نام گرداب نعل اسبی به‌وجود می‌آورد. با پدید آمدن این گرداب، پدیده حفر گودال تسریع شده و با گود شدن آن و ریزش دیوارهای اطراف، گستره آن نیز بیشتر می‌شود. از طرفی جریان برخورد کرده به پایه در کناره آن از پایه جدا شده و گردابهای برخاستگی را تشکیل می‌دهد. این گردابها در کناره‌ها و

پلها به‌عنوان سازه‌های ارتباطی راهها از اهمیت ویژه‌ای برخوردارند. تخریب یا صدمه دیدن پی پایه‌ها بر اثر سیلاب، یکی از مسائل مهم در آسیب‌دیدگی پلهای قرار گرفته بر روی رودخانه‌ها است. به‌طور خلاصه می‌توان گفت پس از برخورد جریان آب به دماغه پایه، جریان رو به پایین در جلوی پایه ایجاد می‌شود که ضمن حفر بستر

زیر طوق عبور کند، به همان مقدار باعث ایجاد جریان روبه پایین و آبشستگی بستر می‌شود. در نتیجه کاهش آبشستگی به محل قرارگیری طوق و اندازه آن بستگی دارد (Zarrati et al., 2004). با کاهش تراز قرارگیری طوق بر روی پایه، جریان رو به پایین در جلوی پایه تضعیف شده و در نتیجه باعث کاهش شدت گرداب نعل اسبی و عمق آبشستگی می‌شود.



شکل ۱ استفاده از طوق در اطراف پایه و بر روی بستر

Zarrati et al. (2004) با نصب طوقی به عرض موثر  $W=3B$  و طول  $L_c=7B$  (عرض پایه است) (شکل ۱) بر روی پایه مستطیلی با نسبت طول به عرض ۱:۵ به بررسی اثر طوق در کاهش عمق آبشستگی پرداخته و در زوایای مختلف قرارگیری پایه مستطیلی نسبت به جریان، درصد کاهش عمق آبشستگی را مطالعه کردند. در این تحقیق طول طوق ثابت بوده و طوق در ترازهای مختلف بر روی پایه نصب شد. نتایج آزمایشهای آنان نشان داد که طوق قرار گرفته در تراز سطح بستر، نتیجه بهتری نسبت به ترازهای دیگر دارد.

پایین دست پایه به وجود آمده و مانند گردباد، ذرات بستر را جدا کرده و در معرض جریان قرار می‌دهند. گردابهای نعل اسبی و برخاستگی، عامل اصلی آبشستگی موضعی در اطراف پایه‌های پل است (Raudkivi, 1998). با توجه به اهمیت و نقش سازه پلها، محققان در طول چند دهه اخیر مطالعات وسیعی را در ارتباط با آبشستگی اطراف کوله‌ها و پایه‌های پل انجام داده و روشهایی را برای کاهش یا مهار آبشستگی موضعی ارائه کرده‌اند. این روشها عبارتند از:

- ریختن مصالح مقاوم مانند ریپرپ در اطراف پایه (Parola, 1993; Chiew, 1995; Chiew and Lim, 2000; Richardson and Davis, 2001; Lauchlan and Melville, 2001)

- ایجاد شیار در بدنه پایه (Chiew, 1992; Kumar et al., 1999)

- نصب صفحه مستغرق در جلوی پایه (Lauchlan, 1999)

- قرار دادن شمع‌های محافظ در بالادست پایه (Melville and Hadfield, 1999)

- و نصب طوق در اطراف پایه (Tanaka and Yano, 1967; Ettema, 1980; Chiew, 1992; Kumar et al., 1999; Zarrati et al., 2004; Zarrati et al., 2006).

تحقیقات قبلی حاکی از عملکرد موفقیت‌آمیز طوق در کنترل آبشستگی است (Chiew, 1992; Zarrati et al., 2004).

نصب طوق، ضمن کاهش عمق حداکثر آبشستگی، زمان شروع آبشستگی را در جلوی پایه به مدت قابل ملاحظه‌ای به تأخیر می‌اندازد (Mashahir and Zarrati, 2002).

براساس تحقیقات انجام شده، استفاده از طوق‌های محافظ یکی از ساده‌ترین و ارزاترین روشها در مهار آبشستگی موضعی اطراف پایه و کوله پل است. با نصب طوق (شکل ۱) در اطراف پایه از برخورد جریان رو به پایین به بستر جلوگیری شده و طوق در نقش سپر محافظ در مقابل جریان روبه پایین رفتار می‌کند. اگر مقداری از جریان از

آزمایش، برای مسطح و تراز کردن سطح بستر فرسایش پذیر استفاده شد. عمق جریان و مقادیر آبرسانی با عمق سنج با دقت یک میلی متر اندازه گیری شد. پایه مورد استفاده با سطح مقطع مستطیل به عرض  $B = 5\text{cm}$  و طول ۱۵ سانتی متر از جنس پلکسی گلاس بوده و دماغه و انتهای پایه و طوقها به صورت نیم دایره در نظر گرفته شد (شکل ۱). سه طوق با طولهای 5B، 7B و 9B، عرض 3B و به ضخامت ۱/۵ میلی متر انتخاب شده و اطراف پایه و در سطح بستر نصب شدند.

در مرحله اول آزمایشها، ابتدا پایه بدون محافظت و با زاویای ۱۰ و ۲۰ درجه نسبت به راستای جریان نصب شده و حداکثر عمق آبرسانی و توسعه زمانی آن مطالعه شد. در مرحله دوم، آزمایشهای مرحله اول به همان ترتیب و با طوقهای محافظ با طولهای مختلف (در زوایای مختلف پایه مستطیلی) تکرار شد. تمامی آزمایشها در شرایط آستانه حرکت ذرات انجام شد تا حداکثر عمق آبرسانی حاصل شود (Raudkivi, 1998). معیار رسیدن به شرایط آستانه حرکت ذرات بستر، عدم تغییر بیش از ۲ تا ۳ میلی متری تراز کف بدون وجود پایه در مدت زمان حدود ۵ ساعت آزمایش بود. بدین منظور چند آزمایش با عمق و دبیهای مختلف انجام شد و آستانه حرکت ذرات با توجه به معیار فوق به دست آمد. در هر یک از شرایط فوق نسبت سرعت برشی بستر به سرعت برشی بحرانی شیلدز  $(U_* / U_{*c})$  که شاخصی از آستانه حرکت ذرات است، نیز محاسبه شد. در صورتی که بتوان شیب سطح آب را با ابزاری دقیق اندازه گرفت، سرعت برشی بستر به صورت مستقیم قابل محاسبه است. در آزمایشهای حاضر با استفاده از روش گام به گام مستقیم با اندازه گیری عمق پایاب و سراب، پروفیل سطح آب به دست آمده و سرعت برشی در محل پایه پل با استفاده از شیب سطح آب در این محل محاسبه شد. ضریب زبری بستر با مشخص

با توجه به مشاهدات، آبرسانی در حضور طوق محافظ از پایین دست شروع شده و به سمت بالادست گسترش می یابد تا جایی که به بالادست طوق رسیده و به زیر آن نفوذ می کند. با نفوذ آبرسانی به زیر طوق، عملکرد جریان رو به پایین در جلوی طوق شروع شده و عمق آبرسانی مجدداً افزایش می یابد. به این ترتیب می توان نتیجه گرفت که افزایش طول طوق می تواند به افزایش کارایی آن منجر شود. در تحقیق حاضر با نصب طوق با طولهای 5B، 7B و 9B و عرض ثابت 3B بر روی پایه مستطیلی با طول ۱۵ سانتی متر و عرض ۵ سانتی متر در زاویه برخورد جریان صفر، ۱۰ و ۲۰ درجه به بررسی کارایی آن پرداخته شده است. همچنین با توجه به نتایج تحقیقات (Zarrati et al. (2004) در تمامی آزمایشهای این تحقیق طوق در تراز سطح بستر نصب شده است.

## ۲- مدل فیزیکی و مراحل انجام آزمایشها

آزمایشها در فلوم آزمایشگاهی با طول ۱۲ متر، عرض ۰/۷۴ متر و عمق ۰/۶ متر انجام شد. برای انجام آزمایشها، کف فلوم به اندازه ۲۵ سانتی متر از کف مخزن با مصالح بنایی به جز در یک طول ۱/۵ متری به عنوان مقطع کاری بالا آورده شد. ابتدای مقطع کاری از بالادست فلوم ۷ متر فاصله داشته و با رسوبهای ماسه ای با قطر متوسط ۰/۹۵ میلی متر و ضریب انحراف معیار ۱/۳ پر شد. سطح مصالح بنایی با اندود ماسه سیمان پوشانده و صاف شد. اندازه گیری دبی توسط عمق سنج و سرریز مستطیلی لبه تیز صورت گرفت. عمق سنج در انتهای فلوم با فاصله کافی از سرریز لبه تیز مستطیلی قرار داشته و به کمک آن با دقت ۰/۱ میلی متر، عمق آب در بالادست سرریز اندازه گیری شد. برای تنظیم عمق آب از دریچه در پایاب استفاده شد. شیب بستر کاذب صفر بوده و از شمشه چوبی و تراز بنایی به طول ۰/۵ متر قبل از هر مرحله

زمان آزمایشهای غیر از این موارد، در ادامه آورده شده است.

#### ۴- شرح آزمایشها و تحلیل نتایج

##### ۴-۱- آزمایشهای مرحله اول (پایه مستطیلی بدون محافظت)

هدف از انجام آزمایشهای فاقد محافظت، مشاهده عملکرد سیستمهای گردابی و نحوه حرکت ذرات و همچنین برداشت عمق آبستگي در جلوی پایه برای مقایسه با نتایج آزمایشهای مرحله بعدی بود. در صورتی که محور طولی پایه مستطیلی با راستای عمومی جریان زاویه نداشته باشد، آبستگي از جلوی پایه، حد فاصل دماغه تا زاویه ۴۵ درجه در دو طرف پایه نسبت به محور طولی پایه بر اثر جریان رو به پایین شروع می شود. با بیشتر شدن عمق حفره آبستگي در نوک پایه، فضای مناسبی برای چرخش جریان رو به پایین در داخل حفره فوق ایجاد شده و گرداب نعل اسبی شروع به کار می کند. گردابهای برخاستگي نیز در طرفین و پایین دست پایه ها، جایی که جریان از دیوار پایه ها جدا می شود، ذرات این منطقه و همچنین مصالح انتقال یافته از جلوی پایه را به طرف بالا بلند کرده و در مسیر جریان قرار می دهند. با فعال شدن گرداب نعل اسبی در جلوی پایه، تمامی عوامل فرسایش، برداشت و انتقال مصالح کنده شده تکمیل شده و آبستگي شدیدی در این لحظات اتفاق می افتد، به صورتی که در ساعت اول آزمایش، بیش از ۵۰٪ کل آبستگي اتفاق می افتد. با عمیق تر شدن حفره آبستگي، انرژی گرداب نعل اسبی که مهمترین عامل فرسایش در جلوی پایه است، به مصرف چرخاندن حجم آب داخل حفره رسیده و مستهلک می شود. در چنین شرایطی نرخ آبستگي به طور قابل ملاحظه ای کاهش یافته و پس از حدود ۴۵ ساعت، تغییرات عمق آبستگي ناچیز شده و

بودن زبری کف محاسبه شده و اندکی تعدیل شد تا عمق سراب محاسبه شده با مقدار اندازه گیری شده، تطبیق داده شود. با محاسبه تنش برشی بستر در محل مورد نظر، عدد رینولدز برشی بستر محاسبه شده و با استفاده از آن و دیاگرام شیلدز، تنش بحرانی ذرات محاسبه شد. بر پایه این نتایج معیار آستانه حرکت ذرات برای حداکثر آبستگي در شرایط آب زلال، برابر  $U_* / U_{*c} = 0.92$  در نظر گرفته شد.

##### ۳- مدت زمان آزمایشها

آبستگي موضعی اطراف پایه های پل وابسته به زمان بوده و با آن افزایش می یابد. به ویژه در شرایط آب زلال به علت حمل نشدن رسوب از بالادست، رسوب کنده شده از حفره آبستگي جایگزین نشده و افزایش عمق آبستگي تا رسیدن به مقدار حداکثر، همچنان ادامه می یابد. در شرایط بستر زنده نیز عمق آبستگي ابتدا با سرعت بیشتری افزایش یافته و سپس حول مقدار متوسط نوسان می کند. آبستگي پس از نفوذ به زیر طوق با سرعت افزایش یافته و سپس به صورت مجانب به مقدار حداکثر نزدیک می شود. زمان مورد نیاز برای رسیدن به حداکثر آبستگي در مدل می تواند تا چند هفته باشد که البته امکان انجام چنین آزمایشهایی وجود ندارد. ضمن آنکه افزایش عمق آبستگي نیز بسیار تدریجی است. در آزمایشهای انجام شده در تحقیق حاضر با نفوذ آبستگي به زیر طوق، بیشترین آبستگي در همان روزهای اول آزمایش اتفاق می افتاد که در نتیجه چون آزمایشها جنبه مقایسه ای داشت، تمامی آزمایشهایی که در آن آبستگي به زیر طوق نفوذ کرده بود تا ۵۰ ساعت ادامه یافت. مشاهدات نیز نشان می داد پس از این زمان نرخ آبستگي بسیار کند و در حد یک میلی متر در هر ۱۰ ساعت بود.

انتقال می‌یابد. نتایج بدست آمده با نتایج تحقیقات Laursen and Toch (1956) در جدول ۱ مقایسه شده است. این جدول نشان می‌دهد که نتایج حاصل از تحقیق حاضر تقریباً مشابه نتایج آنان است. نمودارهای توسعه زمانی آبشستگی در محل حداکثر آبشستگی پایه مستطیلی بدون محافظت در زوایای مختلف قرارگیری در شکل ۲ آورده شده است.

#### ۲-۴- آزمایشات مرحله دوم (پایه مستطیلی با محافظت توسط طوق های مختلف)

در این مرحله از آزمایشها طوقهایی با طول 5B، 7B و 9B و عرض مؤثر 3B در اطراف پایه مستطیلی با طول ۱۵ سانتیمتر و عرض ۵ سانتیمتر در زوایای صفر، ۱۰ و ۲۰ درجه پایه نصب شده و نتایج حاصل بررسی شده است.

#### الف) پایه مستطیلی قرار گرفته در راستای جریان

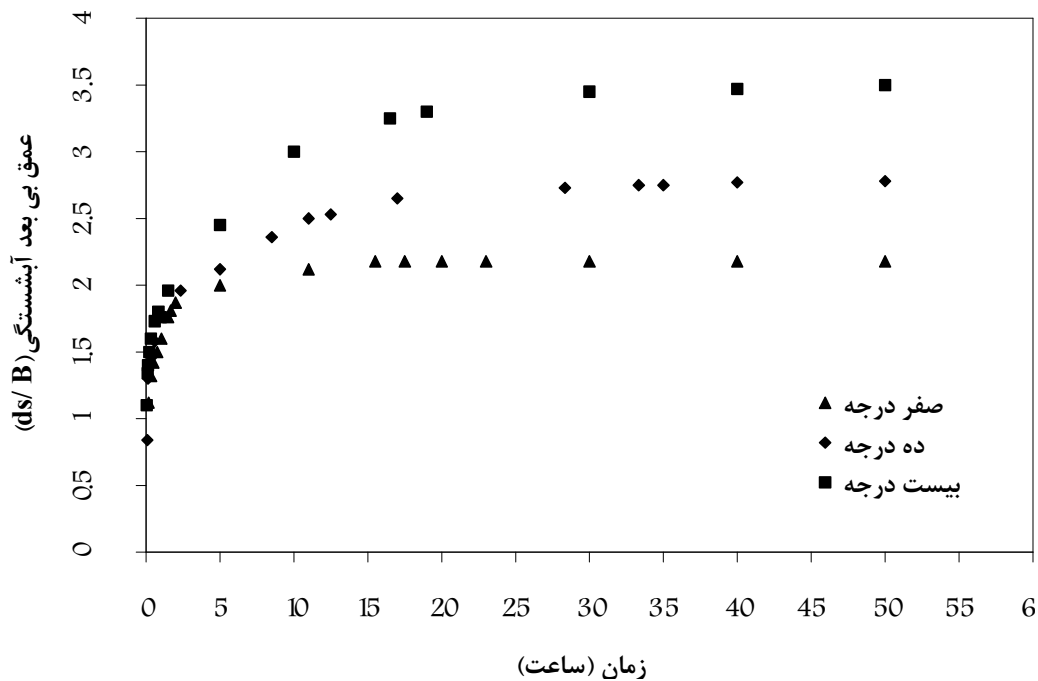
در حالتی که پایه مستطیلی در راستای جریان قرار داشته باشد، اولین نشانه‌های آبشستگی در پایین دست طوق بر اثر عملکرد گرداب‌های برخاستگی ظاهر می‌شود. در واقع بر خلاف حالت بدون طوق، گرداب نعل اسبی در ابتدای آزمایش مشاهده نشده و آبشستگی در جلوی پایه اتفاق نمی‌افتد. به تدریج و با گذشت زمان، در دو طرف پایه در لبه‌های طوق (متمایل به سمت بالادست) نیز به دلیل بالا بودن تنش‌های برشی شیارهایی تشکیل می‌شوند که محل شروع این شیارها در دو طرف طوق بوده و مستقل از حفره پایین دست طوق هستند (منطقه ۱ در شکل ۳).

آزمایش به حالت تعادل می‌رسد. عمق بی بعد آبشستگی  $(d_s/B)$  در این آزمایش برابر ۲/۱۶ مشاهده شد (جدول ۱). این نتیجه با روابط ارائه شده توسط محققان قبلی مانند Laursen and Toch (1956) و Melville and Sutherland (1988) همخوانی نزدیکی دارد.

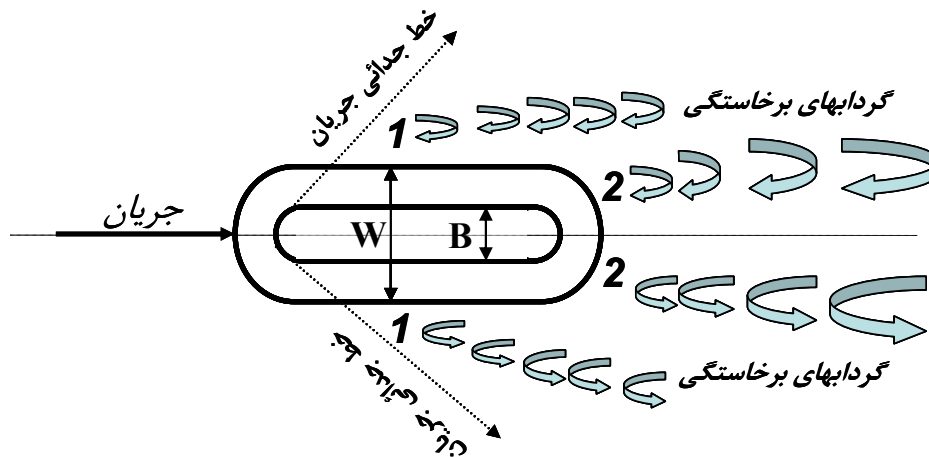
با زاویه‌دار شدن محور طولی پایه نسبت به راستای جریان، عرض پایه قرارگرفته در برابر جریان نسبت به پایه در راستای جریان افزایش یافته و در نتیجه آن، عمق آبشستگی به دلیل تشدید قدرت گرداب نعل اسبی در جلو و دو طرف پایه و گرداب برخاستگی در پشت پایه به مقدار زیادی افزایش می‌یابد. در شروع آزمایش با افزایش تدریجی دبی و در نتیجه تنش برشی بستر و نزدیک شدن آن به تنش آستانه حرکت، آبشستگی ابتدا در پشت جبهه جریان و تحت تأثیر گرداب‌های برخاستگی شروع می‌شود. سپس آبشستگی در قسمت جبهه جریان (سمتی از پایه که جریان مستقیم به پایه برخورد می‌کند) فعال می‌شود. با گذشت زمان، نرخ آبشستگی در این سمت نسبت به حالت بدون زاویه بیشتر می‌شود، به طوری که در قسمت جبهه جریان شیار سریعاً در عمق و عرض رشد کرده و کف آن پس از مدت زمان کوتاهی افقی می‌شود؛ اما در پشت پایه با دور شدن گرداب‌های برخاستگی از پایه به دلیل زاویه دار بودن پایه، تپه‌ای از مصالح بستر در نزدیکی انتهای پایه تشکیل می‌شود که با گذشت زمان ارتفاع این تپه کاهش می‌یابد. در زاویه برخورد ۱۰ و ۲۰ درجه، محل حداکثر عمق آبشستگی از جلوی پایه به انتهای پایه در سمت جبهه جریان

جدول ۱ نتایج حاصل از آزمایشهای تحقیق حاضر در حالت پایه بدون طوق محافظ

زاویه برخورد (درجه)	۲۰ درجه	۱۰ درجه	صفر درجه
عمق آبشستگی بی بعد $(d_s/B)$ ، تحقیق حاضر	۳/۵۴	۲/۷۸	۲/۱۶
عمق آبشستگی بی بعد $(d_s/B)$ بر اساس نتایج تحقیقات Laursen and Toch (1956)	۳/۲۱	۲/۷۱	۲/۱۶
محل حداکثر عمق آبشستگی	انتهای پایه	انتهای پایه	جلوی پایه



شکل ۲ توسعه زمانی حداکثر عمق آبستگي در زوایای مختلف و بدون طوق



شکل ۳ محل شروع شیارها در اطراف طوق بر روی پایه قرارگرفته در راستای جریان

می‌شود. بدین ترتیب افزایش نرخ آبستگي در جلوی پایه و زیر طوق نسبت به پایه بدون محافظ، با یک تأخیر زمانی (زمان لازم برای رسیدن شیارها به جلوی پایه) انجام می‌شود. میزان تأخیر زمانی شروع آبستگي در جلوی پایه‌ها به طول طوق بستگی دارد. البته میزان تنش برشی بستر یا به عبارتی نسبت  $U^*/U_{*c}$  نیز بر این تأخیر

با رسیدن شیارها به یکدیگر در جلوی طوق و نفوذ جریان به زیر طوق، در نهایت آبستگي به جلو پایه رسیده و زیر طوق در جلوی پایه با گذشت زمان خالی می‌شود. از این لحظه به بعد با نفوذ جریان به زیر طوق، جریان روبه پایین و گرداب نعل اسبی در جلوی پایه تشکیل شده و نرخ آبستگي در زیر طوق تشدید

از تأثیر محسوس طول طوق بر توسعه زمانی آبشستگی اطراف پایه است. توسعه زمانی حداکثر عمق آبشستگی برای طوق 5B در شکل ۵ ارائه شده است.

### ب) پایه مستطیلی با زوایای مختلف نسبت به راستای جریان

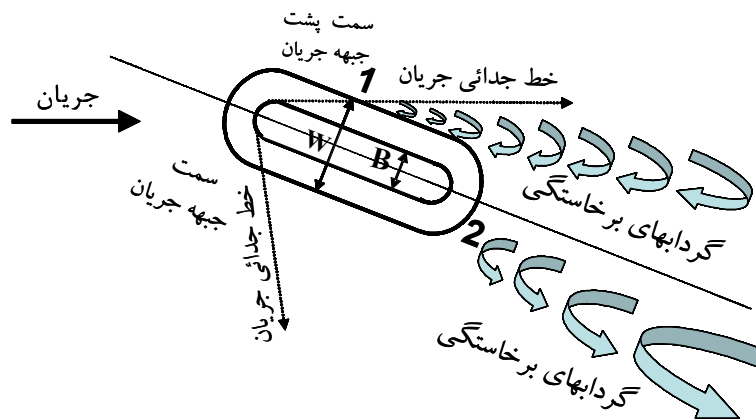
با نصب طوق بر روی پایه زاویه‌دار (زوایای ۱۰ و ۲۰ درجه نسبت به جریان)، نرخ آبشستگی در دقایق اولیه آزمایش نسبت به حالت بدون طوق کند می‌شد. در اثر تمرکز نیرو در سمت پشت جبهه جریان متمایل به نوک پایه و در کنار طوق، شیاری تشکیل شده و با سرعت قابل ملاحظه‌ای خود را به نوک طوق می‌رساند. شیار ایجاد شده در پشت جبهه جریان (شکل ۴، منطقه ۱)، نوک طوق را به سمت مقابل دور می‌زد. همزمان با آن، در سمت جبهه جریان (مقابل جریان) نیز، یک حفره آبشستگی در اثر گرداب‌های برخاستگی در پایین دست طوق تشکیل می‌شد (شکل ۴، منطقه ۲). این حفره موازی دیواره طولی پایه در سمت جبهه جریان و از کنار طوق به سمت بالادست آن توسعه می‌یافت. همزمان با رسیدن این شیار به شیار پشت جبهه جریان (شکل ۴، منطقه ۱)، آبشستگی به جلوی پایه در زیر طوق می‌رسید. با نفوذ جریان به زیر طوق و فعال شدن جریان رو به پایین و در پی آن گرداب نعل اسبی در قسمت جبهه جریان، نرخ آبشستگی به‌طور چشمگیری افزایش یافته و حفره ایجاد شده در قسمت جبهه جریان به میزان زیادی در عرض و عمق در طول دیوار پایه توسعه پیدا می‌کرد. در قسمت پشت جبهه جریان نیز، پشته‌ای از مصالح بستر در انتهای پایه و زیر طوق باقی می‌ماند. با گذشت زمان، ارتفاع پشته مصالح در سمت پشت جبهه جریان کاهش می‌یافت و از طرفی کف حفره در قسمت جبهه جریان افقی شده و به حفره پشت طوق متصل می‌شد.

زمانی تأثیر می‌گذارد (Mashahir et al., 2007). نتایج آزمایشهای پایه مستطیلی در راستای جریان همراه با طوقهای مختلف در جدول ۲ ارائه شده است. بر پایه این نتایج عمق بی‌بعد آبشستگی  $(d_s/B)$  در جلوی پایه در پایان آزمایشها برای طوقهای 5B و 7B به ترتیب برابر ۱/۵۸ و ۱/۵۹ و صفر بوده که در نتیجه عمق آبشستگی اطراف پایه با وجود طوقهای 5B و 7B در حدود ۲۶ درصد نسبت به حالت بدون طوق کاهش یافته است. در حالت طوق 9B پس از ۱۸۵ ساعت آزمایش (حدود ۸ روز)، آبشستگی به زیر طوق نرسیده و در نتیجه در جلوی پایه آبشستگی اتفاق نمی‌افتاد و  $(d_s/B)$  در شیار کنار طوق برابر ۰/۸۷ اندازه‌گیری شده که نسبت به حالت بدون طوق حدود ۶۰ درصد کاهش آبشستگی را نشان می‌دهد. حفره آبشستگی در پشت طوق نیز تا پایان آزمایش مستقل از شیارهای کناری طوق بوده و عمق آبشستگی آن نیز تقریباً برابر عمق شیارهای کنار طوق بوده است.

در این آزمایشها توسعه زمانی آبشستگی نیز بررسی شده و زمان مورد نیاز برای رسیدن شیارهای کنار طوق به جلوی پایه در طوقهای مختلف مقایسه شده است (جدول ۲). با توجه به این نتایج می‌توان گفت که در حالت قرارگیری پایه مستطیلی در راستای جریان، با افزایش طول طوق، زمان لازم برای رسیدن شیارهای اطراف طوق به زیر طوق در جلوی پایه و شروع عمل گرداب نعل اسبی افزایش می‌یابد، به‌طوری‌که با طوقهای 5B و 7B، زمان لازم برای رسیدن شیارهای اطراف طوق به جلوی پایه به ترتیب برابر ۸ و ۲۴ ساعت است. همچنین برای طوق 9B پس از ۱۸۵ ساعت آزمایش، هنوز شیارهای اطراف طوق به زیر طوق در جلوی پایه نرسیده و آبشستگی در جلوی پایه شروع نمی‌شود. این نتایج حاکی

جدول ۲ نتایج حاصل از آزمایشهای تحقیق حاضر با وجود طوق

طول طوق			در راستای جریان
5B	7B	9B	
۱/۵۸، جلوی پایه	۱/۵۹، جلوی پایه	۰/۸۷، شیار کنار طوق	d/B و محل آن
۸ ساعت	۲۴ ساعت	پس از ۱۸۵ ساعت اتفاق نیفتاد	زمان شروع آبستگي در جلوی پایه
۵۰	۷۰	۱۸۵	زمان آزمایش (hr)
۲۷ درصد	۲۶ درصد	۶۰ درصد	درصد کاهش آبستگي
۱/۸۳، جلوی پایه	۱/۸۲، انتهای پایه	۱/۸۰، انتهای پایه	d/B و محل آن
۳۰ دقیقه	۳ ساعت	۱۵ ساعت	زمان شروع آبستگي در جلوی پایه
۵۰	۵۰	۵۰	زمان آزمایش (hr)
۳۴ درصد	۳۴ درصد	۳۵ درصد	درصد کاهش آبستگي
۲/۵۰، انتهای پایه	۲/۵۴، انتهای پایه	۲/۵۵، انتهای پایه	d/B و محل آن
۱۲ دقیقه	۲۵ دقیقه	۶۰ دقیقه	زمان شروع آبستگي در جلوی پایه
۵۰	۵۰	۵۰	زمان آزمایش (hr)
۲۹ درصد	۲۸ درصد	۲۸ درصد	درصد کاهش آبستگي
زاویه ۱۰ درجه			
زاویه ۲۰ درجه			



شکل ۴ محل شروع شیارها در اطراف طوق بر روی پایه زاویه‌دار

پایه به همراه طوق با طول ثابت کاهش پیدا می‌کند (شکل ۵). بر طبق مشاهدات آزمایشگاهی شدت گردابه‌های برخاستگی که بر اثر جدایی خطوط جریان از دیوار پایه در دو طرف آن به وجود آمده و باعث ایجاد شیار در دو طرف طوق و حفره‌ای در پایین دست طوق می‌شود، وقتی پایه زاویه‌دار باشد بیشتر بوده و باعث تشدید آبستگي و

نتایج حاصل از این آزمایشات در جدول ۲ آورده شده است. در این جدول عمق حداکثر آبستگي و محل آن، درصد کاهش آبستگي و همچنین زمان لازم برای شروع آبستگي در جلوی پایه در هر یک از حالتها ارائه شده است. بر اساس نتایج به دست آمده با افزایش زاویه قرارگیری پایه، تأخیر زمانی شروع آبستگي در جلوی



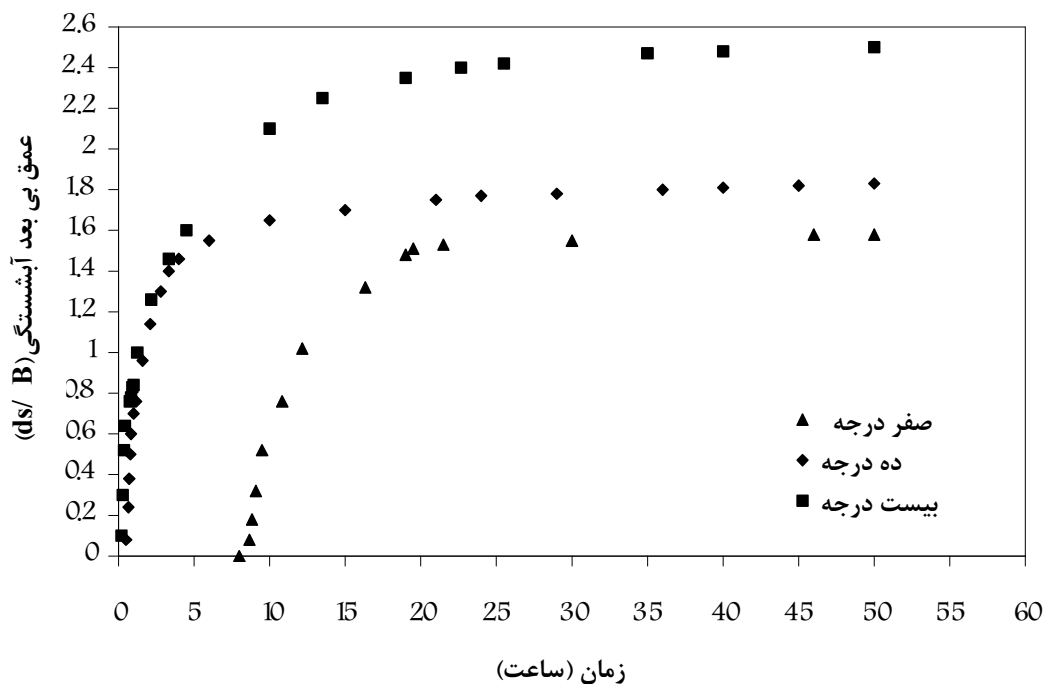
تأخیر انداختن زمان شروع آبشستگی در زیر طوق است که در عمل حائز اهمیت است. البته در زاویه ۲۰ درجه این تأثیر نسبتاً کاهش می‌یابد که علت آن تشدید گرداب‌های برخاستگی در منطقه پشت و کنارهای طوق در این زوایا است.

با توجه به نتایج به دست آمده کارائی طوق‌های 5B و 7B برای زوایای صفر و ۱۰ درجه مشابه است. البته با توجه به انتقال محل حداکثر آبشستگی به انتهای پایه در زاویه ۱۰ درجه کارایی طوق کمی بیشتر می‌شود. در طوق 9B در زاویه صفر درجه از آنجا که زیر طوق پس از ۱۸۵ ساعت از شروع آزمایش خالی نمی‌شود، طوق کارایی بسیار بیشتری را از خود نشان می‌دهد.

با افزایش زاویه برخورد جریان از ۱۰ به ۲۰ درجه به دلیل عملکرد شدید گرداب‌های برخاستگی و افزایش تمرکز تنش در بستر کارایی طوق کاهش می‌یابد (جدول ۲).

کاهش زمان خالی شدن زیر طوق می‌شود. به‌طور مثال در حالت استفاده از طوق 9B در اطراف پایه در حالی که در زاویه صفر درجه تا پایان آزمایش (۱۸۵ ساعت) هیچگونه آبشستگی در جلوی پایه مشاهده نمی‌شود، در زاویه‌های ۱۰ و ۲۰ درجه آبشستگی در جلوی پایه به ترتیب در مدت زمان ۱۵ و ۱ ساعت شروع می‌شود.

نتایج آزمایشها نشان می‌دهد که با افزایش طول طوق در زاویه ثابت، شیارهای دو طرف طوق دیرتر به جلوی پایه در زیر طوق رسیده و در نتیجه آبشستگی در جلوی پایه که ناشی از جریان رو به پایین و گرداب نعل اسبی است، دیرتر شروع می‌شود (جدول ۲). بر طبق نتایج به دست آمده در زاویه ۱۰ درجه با افزایش طول طوق از 5B به 7B و 9B زمان شروع آبشستگی در جلوی پایه به ترتیب از ۰/۵ ساعت به ۳ و ۱۵ ساعت افزایش می‌یابد. این نتایج برای زاویه ۲۰ درجه به ترتیب برابر ۱۲، ۲۵ و ۶۰ دقیقه است. نتایج حاصله حاکی از تأثیر قابل توجه طول طوق در به



شکل ۵ توسعه زمانی حداکثر عمق آبشستگی پایه به همراه طوق با طول 5B در زوایای مختلف

تأخیر در زاویه ۲۰ درجه نسبتاً کم بوده که ناشی از عملکرد شدید گرداب‌های برخاستگی در کنارهای طوق و پایین‌دست آن است. کارایی طوق در حالت پایه زاویه‌دار در تمامی طولهای طوق یکسان و در مدت زمان آزمایشها در حدود ۳۰ درصد است. نتایج این تحقیق اهمیت نقش دیوارهای هدایت را در پلها نشان می‌دهد. با توجه به مطالب فوق می‌توان گفت که در صورت وجود دیوارهای هدایت و هدایت جریان موازی پایه با انتخاب طوق با طول بیشتر، امکان به تأخیر انداختن و کاهش قابل ملاحظه آبستگي موضعی در اطراف پایه فراهم می‌شود.

نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که با اضافه کردن طول طوق برای محافظت از آبستگي اطراف پایه‌های مستطیل شکل پلها می‌توان زمان خالی شدن زیر طوق و ایجاد حفره آبستگي اطراف پایه را به تأخیر انداخته و در نتیجه در بیشتر سیلابها، خسارت وارد شده به پل را به حداقل مقدار ممکن رساند. البته در حین انتخاب طول طوق مسائل اجرایی را نیز باید در نظر گرفت. از طرفی با فروکش کردن سیلاب می‌توان اطراف پایه‌ها را بازدید کرده و حفره‌های آبستگي احتمالی اطراف طوق را با مصالح رودخانه‌ای پر کرد.

## ۵- نتیجه‌گیری

در تحقیق حاضر سه طوق با طولهای 5B، 7B و 9B و به عرض 3B بر روی پایه مستطیلی به عرض ۵ سانتیمتر و طول ۱۵ سانتیمتر در زوایای قرارگیری صفر، ۱۰ و ۲۰ درجه در سطح بستر نصب شده و آزمایشهای آبستگي در شرایط آستانه حرکت ذرات انجام شده است. نتایج حاصل حاکی از آنست که طول طوق و همچنین زاویه قرارگیری پایه بر کارایی طوق تأثیر قابل توجهی دارد. در صورتی که پایه در راستای جریان نصب شود، افزایش طول طوق باعث می‌شود که شروع آبستگي در جلوی پایه به مقدار زیادی به تعویق بیفتد. بر طبق این نتایج شروع آبستگي در جلوی پایه برای طوق با بیشترین طول (9B) تا ۱۸۵ ساعت نیز اتفاق نمی‌افتد. در این حالت حداکثر آبستگي در کنارهای طوق رخ داده و نسبت به پایه محافظت نشده ۶۰٪ کاهش نشان می‌دهد. با نفوذ آبستگي به زیر طوق‌های با طول کمتر کارایی طوق پس از ۵۰ ساعت آزمایش به حدود ۲۵٪ می‌رسد. در حالت پایه زاویه‌دار نیز با افزایش طول طوق در زاویه ثابت، زمان شروع آبستگي در زیر طوق و جلوی پایه به تأخیر افتاده و آبستگي دیرتر شروع می‌شود. این

## ۶- فهرست علائم

B	عرض پایه
$d_s$	عمق نهایی آبستگي
$d_s/B$	عمق بی بعد آبستگي
Lc	طول طوق
$U^*$	سرعت برشی بستر
W	عرض طوق

## ۷- منابع

- Chiew, Y.M. (1992). "Scour protection at bridge piers". J. of Hyd. Eng., 18(11), pp. 1260-1269.
- Chiew, Y. M. (1995). "Mechanics of riprap failure at bridge pier". J. Hyd. Eng., 121(9), pp. 635-643.
- Chiew, Y. M., and Lim, F. H. (2000). "Failure behavior of riprap layer at bridge piers under live-bed condition". J. Hyd. Eng., 126(1), pp. 43-55.
- Ettema, R.E. (1980). "Scour at bridge piers". PhD thesis, University of Auckland, Auckland, New Zealand.
- Kumar, V., Ranga Raju, K. G., and Vittal, N. (1999). "Reduction of local scour around bridge

- Melville, B.W., and Sutherland, A.J. (1988). "Design method for local scour at bridge piers". J. of Hyd. Eng., 114(10), pp. 1210-1226.
- Parola, A.C. (1993). "Stability of riprap at bridge piers". J. of Hyd. Eng., 119(10), pp. 1080-1093.
- Raudkivi, A. J. (1998). Loose boundary hydraulics. Balkema, Rotterdam. The Netherlands.
- Richardson, E. V., and Davis, S. R. (2001). "Evaluating scour at bridges". Hyd. Eng. Circular, No. 18 (HEC-18 Fourth Edition), FHWA NHI 01-001, Federal Highway Administration, Washington, D.C.
- Tanaka, S. and Yano, M. (1967). "Local scour around a circular cylinder". Proc. 12th IAHR Congress, Delft, The Netherlands, 3, pp. 193-201.
- Zarrati, A.R., Gholami, H., and Mashahir, M.B. (2004). "Application of collar to control scouring around rectangular bridge piers". Journal of Hydraulic Research, 42(1), pp. 97-103.
- Zarrati, A. R., Nazariha, M., and Mashahir, M. B. (2006). "Reduction of local scour in the vicinity of bridge pier groups using collars and riprap". J. Hyd. Eng., 132(2), pp. 154-162.
- piers using slot and collar". J. Hyd. Eng., 125(12), pp. 1302-1305.
- Lauchlan, C. S. (1999). "Pier Scour Countermeasures". Rep. No. 590, School of Engineering, University of Auckland, Auckland, New Zealand.
- Lauchlan, C. S., and Melville, B. W. (2001). "Riprap protection at bridge piers". J. Hyd. Eng., 127(5), pp. 412-418.
- Laursen, E.M., and Toch, A. (1956) "Scour around bridge piers and abutments". Bulletin No. 4, Iowa Highway Res. Board.
- Mashahir M. B., Zarrati, A. R. and Mokallaf, E. (2007). "Effect of bed shear stress on development of scouring around bridge piers protected by a collar". 32nd Congress of IAHR, Venice, Italy.
- Mashahir, M.B., and Zarrati, A.R. (2002). "Effect of collar on time development of scouring around rectangular bridge piers". 5th International Conference on Hydrosience and Engineering, Warsaw, Poland.
- Melville, B.W., and Hadfield, A.C. (1999). "Use of sacrificial piles as pier scour countermeasures." J. of Hyd. Eng., 125(11), pp. 1221-1224.