

## بررسی عددی و آزمایشگاهی آبشستگی در اطراف گروه پایه کج توأم با طوق و مواد نانورس

هادی ارونقی<sup>۱\*</sup>، فاطمه جعفری<sup>۲</sup>، اکرم عباسپور<sup>۱</sup>، علی حسین زاده دلیر<sup>۳</sup>

تاریخ دریافت: ۹۸/۰۹/۱۸

تاریخ پذیرش: ۹۹/۰۸/۲۵

۱- دانشیار گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز

۲- دانشجوی دکتری سازه‌های آبی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز

۳- استاد گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز

\*مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی arvanaghi.hadi@yahoo.com

### چکیده

در رودخانه‌ها سازه‌های هیدرولیکی به صورت مانعی در برابر جریان آب قرار دارند و الگوی جریان در نزدیکی خود را تغییر داده و به صورت موضعی باعث آبشستگی در اطراف سازه می‌شوند. آبشستگی پایه پل از پدیده‌های مهم در هیدرولیک رسوب بوده که در اثر آن حفره‌ای در اطراف پایه به وجود می‌آید و پایداری آن را تضعیف می‌کند. روش‌های مختلفی برای جلوگیری یا کاهش آبشستگی موضعی ارائه شده است که در این تحقیق تأثیر طوق، مواد نانورس و زاویه پایه پل در گروه پایه‌ها مورد مطالعه واقع شده است. نتایج نشان می‌دهد پایه پل با زاویه ۱۵ درجه بیشترین کاهش عمق حفره آبشستگی را دارا می‌باشد. بررسی‌ها بیانگر آن است که در گروه پایه‌ها با زاویه کج‌شدگی ۱۵ درجه کاهش ۱۴ درصدی حفره آبشستگی و در حالت طوق دار کاهش ۸۶ درصدی وجود دارد. همچنین با استفاده از مواد نانورس عمق حفره آبشستگی در حالت بدون طوق ۱۸/۵ درصد کاهش یافته است.

واژه‌های کلیدی: آبشستگی، طوق، گروه پایه کج، مدل عددی، نانورس.

## Numerical and Experimental Investigation of Local Scour around Inclined Pier Group with Collar and Nanostructures

H Arvanaghi<sup>1\*</sup>, F Jafari<sup>2</sup>, A Abbaspour<sup>1</sup>, A Hosseinzadeh-Dalir<sup>3</sup>

Received: December 9, 2019 Accepted: November 15, 2020

<sup>1</sup> Assoc. Prof., Dept. of Water Engineering, Agric., Univ. of Tabriz, Iran

<sup>2</sup> Ph.D. Student of Water Struc., Faculty of Agric., Univ. of Tabriz, Iran

<sup>3</sup> Prof., Dept. of Water Engineering, Agric., Univ. of Tabriz, Iran

\*Corresponding Author, Email: arvanaghi.hadi@yahoo.com

### Abstract

Hydraulic structures situated as an obstacle in front of water flow that changed the flow pattern in their vicinity and causing the local scour around the structure. The scour around the bridge pier is one of the most important phenomena in sediment hydraulics, which creates a hole around the pier and undermines its stability. Different methods have been proposed to prevent or reduce the local scour. In this study, the effects of collars, nanoclay materials and angle of piers have been studied in pier group. The results show that for the pier with the angle of 15 degree was observed the greatest decrease in the depth of the scour hole. Studies show that in the group pier with inclination angle of 15 degrees, there was 14 percent scour hole reduction and with presence of a collar the reduction of scour hole was 86 percent. Also, by using nanoclay materials, the depth of the scour hole in the without collar condition was reduced by 18.5%.

**Keywords:** Collar, Inclined pier group, Nanoclay, Numerical model, Scour.

### مقدمه

گسترش می‌یابند. گرداب‌های برخاستگی در پشت پایه فعال گردیده و به سمت پایین‌دست انتقال می‌یابند. این گرداب‌ها باعث تشکیل حفره در اطراف پایه می‌شوند. دو عامل مهم دیگری که در آبشستگی اطراف گروه پایه نسبت به تک پایه مؤثر است عبارتند از عامل تقویت‌کننده و عامل حفاظت‌کننده. عامل تقویت‌کننده باعث افزایش عمق آبشستگی در پایه جلویی تحت تأثیر پایه‌های پشتی می‌باشد. عامل حفاظت‌کننده بدین معناست که پایه بالادست باعث کاهش سرعت جریان و در نتیجه کاهش آبشستگی در پایه پایین‌دست است (زمردیان و همکاران ۲۰۱۷). آبشستگی موضعی به دو حالت آبشستگی آب زلال<sup>۱</sup> و آبشستگی بستر زنده<sup>۲</sup> تقسیم‌بندی می‌شود. هرگاه سرعت جریان کمتر از سرعت

یکی از عوامل مهم در پایداری پایه‌های پل آبشستگی اطراف پایه می‌باشد که با شکل‌گیری آن حفره‌ای در اطراف پایه به وجود می‌آید و گسترش آن، باعث تخریب پایه پل می‌شود. آبشستگی را به سه دسته کلی، موضعی و آبشستگی ناشی از تنگ‌شدگی مقطع طبقه‌بندی می‌کنند. آبشستگی موضعی در اثر برخورد جریان آب به پایه و ایجاد جریان‌های روبه‌پایین به علت کاهش فشار از سطح جریان به سمت بستر به وجود می‌آید. این جریان‌های روبه‌پایین، جریان‌های ثانویه‌ای را در اطراف پایه به وجود می‌آورند که با برخورد با بستر رودخانه باعث ایجاد گرداب‌هایی در اطراف پایه می‌شوند. مهم‌ترین گرداب‌ها، گرداب‌های نعل اسبی و برخاستگی می‌باشند. گرداب‌های نعل‌اسبی بیشتر در جلو پایه ایجاد می‌شوند و به سمت کناره‌های پایه

<sup>1</sup> Clear water scour

<sup>2</sup> Live bed scour

حفاظتی، زاویه پایه پل و مواد نانو اشاره کرد. در زیر به برخی از نتایج ارزیابی این روش‌ها اشاره می‌شود. کریمی‌طبرستانی و زراتی (۲۰۱۵) سنگچین را اطراف پایه‌های پل مستطیلی به کار بردند. آن‌ها با استفاده از ۱۹۰ داده آزمایشگاهی تأثیر عمق جریان، اندازه ذرات سنگچین و عرض پایه را در پایداری سنگچین مطالعه کرده‌اند. کریمی‌طبرستانی و زراتی (۲۰۱۵) بیشترین کمترین تأثیر را در پایداری سنگچین، به ترتیب عرض پایه و عمق جریان معرفی کرده‌اند. نصب طوق در اطراف پایه جلوی جریان‌های روبه‌پایین را می‌گیرد و فعالیت گرداب‌های نعل اسبی را تضعیف می‌کند. هم‌چنین در پایه‌های طوق‌دار سرعت آبشستگی کاهش یافته و زمان شروع آبشستگی به تأخیر می‌افتد. همتی و همکاران (۲۰۱۶) با استفاده از طوق مشبک کاهش آبشستگی پایه پل استوانه‌ای را مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها پایه استوانه‌ای به قطر ۶۰ میلی‌متر، طوق به قطرهای ۱/۵، ۲، ۲/۵، ۳ برابر قطر پایه با سه تراز کارگذاری طوق در زیر بستر 0.1D، 0.5D، D را به کار بردند. نتایج بررسی‌ها نشان داد طوق به قطرهای 2.5D و 3D که در تراز 0.1D قرار دارد، عمق آبشستگی را ۷۳ درصد کاهش داده است. طوق به قطرهای 1.5D و 2D در تراز 0.5D، حدود ۴۰ درصد کاهش عمق آبشستگی داشته است. حجم آبشستگی اطراف پایه پل با قرارگیری طوق در ترازهای 0.1D، 0.5D، D به ترتیب در حدود ۵۸، ۶۰ و ۱۰ درصد کاهش داشته است. هم‌چنین آن‌ها راندمان و کارایی طوق مشبک را ۲۰ درصد بیشتر از طوق غیرمشبک معرفی کرده‌اند. حیدرپور و همکاران (۲۰۱۰) کاهش آبشستگی اطراف دو پایه و سه پایه را با استفاده از طوق دایره‌ای مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها فاصله بین پایه‌ها را ۳ و ۴ برابر قطر پایه و عرض طوق را ۲ و ۳ برابر قطر پایه در نظر گرفتند. حیدرپور و همکاران (۲۰۱۰) تأثیر طوق را در پایه‌های پشتی نسبت به پایه اول بیشتر دانستند. طوق در پایه اول تأثیری در کاهش آبشستگی نداشته و در ابتدای آبشستگی عمق

آستانه حرکت رسوبات باشد نوع آبشستگی، آبشستگی آب زلال و در غیر این صورت آبشستگی بستر زنده است (ارونقی و همکاران ۲۰۰۶).

مطالعات زیادی در مورد آبشستگی موضعی اطراف پایه‌های پل انجام شده است. اکثر مطالعات در ارتباط با مکانیسم آبشستگی، پارامترهای مؤثر در آبشستگی، توسعه زمانی آبشستگی و هم‌چنین، کاهش آبشستگی موضعی در اطراف پایه‌های پل می‌باشد. ملویل (۱۹۹۷) با بررسی پارامترهای مؤثر در آبشستگی رابطه ۱ را برای تخمین عمق حفره آبشستگی ارائه داده است:

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

که  $d_{se}$ ،  $k_{yD}$ ،  $k_i$  و  $k_d$  به ترتیب عمق آبشستگی (حالت تعادل)، ضریب عمق جریان، ضریب شدت جریان، ضریب اندازه ذرات رسوبی می‌باشد. وی برای پارامترهای فوق روابطی را ارائه داده است.

عمق تعادل آبشستگی عمقی است که از آن عمق به بعد افزایش محسوسی در آن دیده نشود و زمان مربوط به چنین عمقی را زمان تعادل می‌گویند. محققین تعاریف گوناگونی برای زمان تعادل معرفی کرده‌اند. کومار و همکاران (۱۹۹۹) زمانی را به عنوان زمان تعادل آبشستگی مطرح کردند که سه ساعت بعد از آن، عمق آبشستگی کمتر از یک میلی‌متر تغییر کند. هم‌چنین ملویل و چپو (۱۹۹۹) زمانی را به عنوان زمان تعادل عمق آبشستگی می‌دانند که تغییرات عمق آبشستگی نسبت به زمان از ۵ درصد قطر پایه یا عرض پایه در ۲۴ ساعت تجاوز نکند. آن‌ها با استفاده از تعریف فوق روابطی را برای محاسبه زمان تعادل ارائه داده‌اند. روش‌های مختلفی برای کاهش عمق حفره آبشستگی توسط محققین ارائه شده است که در دو گروه عمده مقاومت‌سازی بستر و تغییرات الگوی جریان خلاصه می‌شوند. از مهم‌ترین روش‌های کاهش عمق حفره آبشستگی می‌توان به استفاده از سنگچین، استفاده از طوق، ایجاد شکاف در پایه، به‌کارگیری شمع‌های

انجام داده‌اند. آن‌ها فاصله بهینه قرارگیری شمع‌ها در جلو پایه اصلی را 2.95D به دست آوردند. با افزایش قطر شمع‌ها تا فاصله بهینه، عمق آبشستگی کاهش می‌یابد. همچنین، کارایی شمع‌ها با بیشتر شدن فاصله و افزایش قطر کمتر می‌شود.

زمردیان و همکاران (۲۰۱۷) شمع‌های حفاظتی، طوق مربعی و کاربرد توأم آن‌ها را در کاهش آبشستگی به کار بردند. آن‌ها گروه پایه دوتایی و سه‌تایی را در یک امتداد و با فاصله 2.5D مورد بررسی قرار دادند. زمردیان و همکاران (۲۰۱۷) استفاده از شمع‌های حفاظتی را علت کاهش آبشستگی در پشتی معرفی کردند. تأثیر طوق در کاهش آبشستگی در پایه جلویی در گروه پایه دوتایی و سه‌تایی به ترتیب به میزان ۶۹/۲۳ و ۷۲/۲۲ درصد می‌باشد و کاربرد توأم آن‌ها بیشترین کاهش را در آبشستگی تک‌تک پایه‌ها دارد. با پیشرفت فناوری طراحی و ساخت سازه‌ها، پل‌ها با شکل‌های گوناگونی ساخته می‌شوند که از آن‌ها می‌توان به گروه پایه کج اشاره کرد. اسمعیلی‌ورکی و سعادت‌پاچه‌کناری (۲۰۱۵) قرارگیری پایه‌های پل با زاویه‌های مختلف (قائم، ۲۸، ۳۸ و ۴۵ درجه) را بر روی فونداسیون به صورت آزمایشگاهی بررسی کردند. آزمایش‌ها در سرعت‌های نسبی ۰/۸ و ۰/۹۵ (نسبت سرعت جریان به سرعت آستانه حرکت) و سه رقوم نسبی کارگذاری فونداسیون مختلف (فاصله روی فونداسیون تا سطح بستر نسبت به عرض آن برابر با ۱-، ۰/۵- و صفر) صورت گرفت. آن‌ها در شرایط قرارگیری پایه‌ها به صورت قائم و در تراز کارگذاری فونداسیون صفر که سطح فونداسیون نقش طوق را ایفا می‌کند، کمترین عمق آبشستگی را به دست آوردند. اسمعیلی‌ورکی و سعادت‌پاچه‌کناری (۲۰۱۵) بیشترین و کمترین عمق آبشستگی را در تراز کارگذاری ۱- و ۰/۵- در زاویه‌های ۲۸ و ۳۸ درجه معرفی کردند.

بوزکوش و چشمه (۲۰۱۰) زاویه پایه پل را در کاهش آبشستگی مورد مطالعه قرار دادند. آن‌ها از دو

آن را کاهش داده است. راندمان طوق در کاهش آبشستگی برای پایه سوم به دلیل پدیده حمایتی پایه دوم برای پایه سوم بیشتر می‌باشد. مونکادا و همکاران (۲۰۰۹) برای کاهش عمق آبشستگی تأثیر طوق و شکاف مستطیلی را در اطراف پایه بررسی کردند. قطر پایه دایره‌ای ۷/۳ سانتی‌متر بوده و عدد فرود جریان بین ۰/۲ تا ۰/۳۲ می‌باشد. عرض طوق ۱۴/۶ و ۲۱/۹ سانتی‌متر و عرض شکاف ۱/۸ سانتی‌متر در نظر گرفته شد. آن‌ها به این نتیجه رسیدند قرارگیری طوق روی سطح بستر کمترین عمق آبشستگی را دارد و با افزایش قطر طوق عمق آبشستگی کاهش می‌یابد. شکاف قرار گرفته نزدیک سطح بستر محل مناسبی برای کاهش آبشستگی است و هرچه ابعاد شکاف افزایش یابد کاهش بیشتری دارد. با ترکیب طوق و شکاف عمق آبشستگی اطراف پایه تقریباً حذف می‌شود.

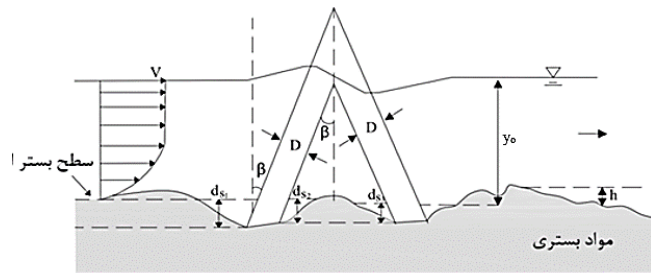
حکیم‌زاده و همکاران (۲۰۱۲) تأثیر شکاف را در کاهش آبشستگی پایه مخروطی شکل بررسی کردند. دو سری آزمایش به مدت ۸ ساعت با شیب‌های جانبی مختلف انجام دادند. نتایج آزمایش‌ها نشان داده است که با افزایش زاویه کج‌شدگی، عمق حفره آبشستگی کاهش می‌یابد. به طوری که با زاویه کج‌شدگی ۱۱/۳۱ درجه، عمق حفره آبشستگی ۳۱/۷ درصد کاهش یافته است. همچنین ترکیب شکاف و پایه مخروطی شکل عمق آبشستگی را ۵۵ درصد کاهش داده‌اند. این نتایج نشان می‌دهند ترکیب شکاف و پایه مخروطی شکل در کاهش آبشستگی مؤثر بوده‌اند.

از روش‌های محافظت پایه‌های پل می‌توان به استفاده از شمع‌های حفاظتی اشاره کرد. این شمع‌ها الگوی جریان را در جلو پایه تغییر داده و با کاهش شدت گردابه‌های ایجاد شده در اطراف پایه، عمق آبشستگی را کاهش می‌دهند. آزم و قمشی (۲۰۱۳) آزمایش‌هایی با شمع‌های حفاظتی به قطرهای ۲۰، ۲۷ و ۳۲ میلی‌متری و در فواصل 2.8D، 2.95D، 3.1D و 3.4D از پایه اصلی در سرعت‌های نسبی ۰/۶۷، ۰/۸۱ و ۰/۹۴

کاهش عمق آبشستگی پایین دست صفحات مشبک را بررسی کردند. برای کاهش عمق آبشستگی از رس و ترکیب رس-نانومونت موریلونیت استفاده کردند. رسوب بستر پایین دست صفحات مشبک را با رس و ماده نانو ساختار رس مخلوط نمودند. رضایی و همکاران (۲۰۱۸) مشاهده کردند با افزودن رس و ترکیب رس و نانومونت موریلونیت کاهش طول آبشستگی ۳۳ درصد و کاهش عمق آبشستگی به ترتیب ۳۹ و ۶۶ درصد می‌باشد. قادری و همکاران (۲۰۱۸) کاهش آبشستگی در پایین دست سرریزهای پلکانی را با استفاده از ساختار میکروسیلیس و مواد نانو بررسی کردند. آن‌ها تأثیر تعداد پله‌ها و رژیم جریان را در آبشستگی پایین دست سرریز مطالعه کردند. قادری و همکاران (۲۰۱۸) به این نتیجه رسیدند افزایش تعداد پله‌ها در رژیم جریان غیرریزشی عمق و طول آبشستگی پایین دست سرریز را افزایش می‌دهد. با استفاده از مخلوط نانورس و میکروسیلیس طول و عمق آبشستگی به ترتیب  $48/74$  و  $46/38$  درصد کاهش داشتند. مخلوط رس با مواد رسوبی طول و عمق آبشستگی به ترتیب  $35/63$  و  $20/88$  درصد کاهش یافته است. همچنین با استفاده از رس و نانورس کاهش طول و عمق آبشستگی  $41/41$  و  $37/75$  درصد بوده است. این نتایج تأثیر مثبت رس، نانورس و مواد میکروسیلیس را در کنترل آبشستگی سازه‌های هیدرولیکی نشان می‌دهد.

امروزه برای بررسی جریان آشفته و انتقال رسوب در اطراف پایه پل شبیه‌سازی‌های عددی به صورت گسترده‌ای استفاده می‌شوند. حسن‌زاده و همکاران (۲۰۱۱) جریان سه‌بعدی اطراف پایه پل را با استفاده از نرم‌افزار فلونتت شبیه‌سازی کرده‌اند. مقاطع پایه به شکل دایره، دوکی، بیضی، مستطیلی، مربعی و مستطیلی گرد گوشه بودند. تأثیر تغییرات پروفیل سطح آب و تغییر شکل پایه‌ها در میزان تنش برشی بررسی شده‌اند. در مدل‌های سه‌بعدی مقطع دوکی و بیضی

پایه پل به قطر  $D$  استفاده کردند و شرایط آبشستگی آب زلال را به کار بردند (شکل ۱).



شکل ۱- دو پایه کج استفاده شده در آزمایش بوزکوس و چشمه (۲۰۱۰).

بوزکوش و چشمه (۲۰۱۰) زاویه پایه پل یا کج-شدگی پایه پل و شدت جریان  $(u/u_c)$  را در عمق حفره آبشستگی مؤثر دانسته و سپس رابطه ۲ را برای محاسبه عمق حداکثر حفره آبشستگی معرفی کرده‌اند.

در رابطه ۲،  $y_0$  عمق جریان،  $D$  قطر پایه،  $d_{se}$  عمق حداکثر حفره آبشستگی،  $u$  سرعت متوسط جریان،  $u_c$  سرعت در آستانه حرکت ذرات رسوبی و  $\alpha$  متمم زاویه پایه پل بر حسب رادیان می‌باشند ( $\beta$  زاویه پایه پل و متمم آن می‌باشد).

چنانچه از رابطه ۲ و شکل ۱ مشاهده می‌شود با افزایش  $\beta$  و به تبع آن کاهش  $\alpha$  عمق حفره آبشستگی کاهش می‌یابد.

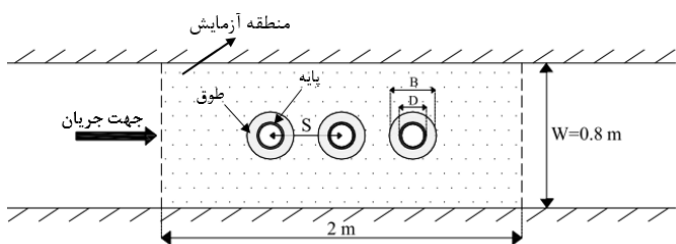
یکی روش‌های جدید برای کاهش عمق آبشستگی استفاده از مواد نانورس می‌باشد. مواد نانو در اندازه  $10^{-9}$  متر می‌باشند که در علوم مختلف مهندسی کاربرد وسیعی دارند. قاسمی و همکاران (۲۰۱۷) برای کنترل آبشستگی اطراف پایه‌های پل از مواد نانو ساختار به دلیل داشتن خاصیت ضد آب استفاده کردند. آن‌ها رسوبات بستر را با مواد نانورس مخلوط کرده و به این نتیجه رسیدند در دبی جریان ۱۶ لیتر بر ثانیه با کاربرد نانورس بیشترین کاهش آبشستگی حدود  $58/3$  درصد می‌باشد همچنین در دبی ۴ لیتر بر ثانیه عمق آبشستگی  $41/6$  درصد کاهش می‌یابد. رضایی و همکاران (۲۰۱۸)

شد. منطقه بین سکوها به طول ۲ متر و در فاصله ۲ متری از ابتدای کانال برای انجام آزمایش‌ها در نظر گرفته شد. این منطقه به ارتفاع سکوها از رسوبات غیرچسبنده پر شد و بستر متحرک به وجود آمد (شکل ۲). برای حذف اثر غیریکنواختی ذرات رسوبی بر آبخستگی لازم است انحراف معیار هندسی بررسی گردد. در این تحقیق پس از رسم منحنی دانه‌بندی ذرات رسوبی، انحراف معیار هندسی به صورت زیر استخراج گردید:

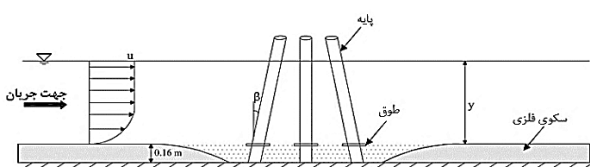
$$\sigma_g = \left( \frac{d_{84}}{d_{16}} \right)^{0.5} = 1.25$$

در مصالح بستر یکنواخت  $\sigma_g < 1.5$  بوده و لایه محافظ تشکیل نمی‌شود و در  $\sigma_g \geq 2$  مصالح بستر غیریکنواخت می‌باشد (شفاعی‌بجستان ۲۰۰۵). بنابراین با  $\sigma_g = 1.25$ ، رسوبات بستر یکنواخت بوده و در کاهش آبخستگی تأثیری نخواهند داشت. اندازه متوسط ذرات رسوبی  $(d_{50})$  ۰/۸ میلی‌متر در نظر گرفته شد. با توجه به این‌که اندازه متوسط ذرات رسوبی بیشتر از ۰/۷ میلی‌متر می‌باشد، لذا شکل بستر مسطح مانده و از تشکیل ریپل جلوگیری می‌شود. در چنین حالتی حداکثر مقدار عمق آبخستگی تشکیل می‌گردد (رادکیوی و اتما ۱۹۸۳).

(الف)



(ب)



شکل ۲- الف) پلان ب) پروفیل طولی کانال آزمایشگاهی.

بقیه شرایط برای دستیابی به حداکثر عمق

شکل بهترین مقطع بوده و در کاهش تنش برشی و در نتیجه کاهش آبخستگی اطراف پایه تأثیر بسزایی داشتند. طبق نتایج آن‌ها، در مقاطع دوکی شکل و بیضی جریان اطراف پایه به آرامی می‌گذرد و آشفستگی زیادی ایجاد نمی‌شود.

ارونقی و همکاران (۲۰۱۱) پروفیل توزیع سرعت و میدان فعالیت جریان‌های ثانوی در اطراف پایه را با CFD<sup>1</sup> مطالعه کردند. جریان‌های ثانوی اطراف پایه اکثراً گرداب‌ها بوده که شعاع فعالیت گرداب‌ها در ۵ برابر قطر پایه رخ داده و در بررسی پارامترهای آبخستگی حداقل عرض کانال آزمایشگاهی ۱۰ برابر قطر پایه ایجاد گردید.

در این تحقیق، تأثیر طوق و مواد نانو ساختار و تغییر زاویه کج‌شدگی پایه برای کاهش آبخستگی اطراف گروه پایه در نظر گرفته شده است. همچنین با استفاده از مدل عددی نیز الگوی جریان در تک پایه با زاویه کج‌شدگی مختلف بررسی شده است.

### مواد و روش‌ها

#### مدل آزمایشگاهی

آزمایش‌ها در آزمایشگاه هیدرولیک گروه مهندسی آب دانشگاه تبریز انجام شد. کانال آزمایشگاهی دارای کف فلزی و دیواره‌هایی از جنس شیشه است. طول، عرض و ارتفاع کانال به ترتیب ۶ متر، ۸۰ سانتی‌متر و ۵۰ سانتی‌متر می‌باشد. شیب کف کانال نیز صفر در نظر گرفته شد. در انتهای کانال حوضچه‌ای وجود دارد که یک سرریز مستطیلی در آن تعبیه شده و دبی جریان را با آن می‌توان اندازه گرفت. پمپی با دبی ۱۲۰ لیتر بر ثانیه آب موردنیاز فلوم را تأمین می‌کند. دریچه قابل تنظیم در پایین‌دست کانال وجود دارد که سرعت جریان و عمق آب را با آن می‌توان کنترل کرد. برای انجام آزمایش‌ها در کانال آزمایشگاهی لازم بود تغییراتی روی آن صورت پذیرد. بنابراین کف کانال به ارتفاع ۱۶ سانتی‌متر توسط سکوها فلزی بالا آورده

<sup>1</sup> Computational fluid dynamics



توضیحات داده شده شرایط هیدرولیکی به صورت جدول ۱ در نظر گرفته شد:

جدول ۱- شرایط هیدرولیکی جریان در فلوام آزمایشگاهی.

Q (L s <sup>-1</sup> )	y (m)	u (m s <sup>-1</sup> )	u/u <sub>c</sub>
۳۳/۵	۰/۱۴۱	۰/۲۹۷	۰/۹

- با توجه به این که یکی از اهداف این تحقیق بررسی زاویه پایه پل بر روی آبشستگی است لذا برای این کار زوایای کج شدگی (β) ۵، ۱۰ و ۱۵ درجه انتخاب گردید. همچنین فاصله بین پایه‌ها (S) ۳ و ۴ برابر قطر پایه در نظر گرفته شد. لازم به ذکر است صفحات طوق به شکل دایره و با دو اندازه ۳ و ۴ برابر قطر پایه اصلی تعیین گردید و در روی بستر قرار داده شد (شکل ۲).

- برای برداشت توپوگرافی سطح بستر در اطراف پایه و محل آبشستگی از متر لیزری با دقت ۱ میلی‌متر استفاده گردید. در آزمایش‌های رسوب با مواد نانورس، از یک نوع نانورس با نام تجاری کلوزیت استفاده شد. مشخصات نانورس به صورت جدول ۲ می‌باشد.

جدول ۲- مشخصات ماده نانورس مورد استفاده در این تحقیق.

کشور	چگالی	اندازه ذرات	نانورس
چین	۶۰۰ (گرم/سانتی متر مکعب)	۲-۱ نانومتر	مونت موریلونیت

### مدل عددی

در این تحقیق، برای بررسی و مطالعه الگوی جریان اطراف پایه پل با کج شدگی پایه به سمت پایین- دست کانال از نرم افزار انسیس فلوئنت<sup>۱</sup> استفاده گردید. در این نرم افزار از معادلات ناویراستوکس رینولدزی برای تحلیل جریان استفاده می‌شود. فلوئنت قابلیت حل مسائل دوبعدی و سه بعدی را دارد. با استفاده از مدل‌های آشفتگی و روش‌های مدل‌سازی متنوع، امکان

آبشستگی به صورت زیر در نظر گرفته شد:

- قطر پایه‌های پل باید به گونه‌ای انتخاب شود که دیواره‌های کانال بر روی آبشستگی تأثیر نگذارد. مطابق مطالعات ارونقی و همکاران (۲۰۰۶) در صورتی که  $\frac{D}{W} < 0.11$  (نسبت قطر پایه به عرض کانال) باشد عمق آبشستگی تحت تأثیر عرض کانال آزمایشگاهی قرار نمی‌گیرد و حداکثر عمق آبشستگی تشکیل می‌گردد. بنابراین با توجه به این شرط قطر پایه‌های پل ۳/۴ سانتی‌متر در نظر گرفته شد. لازم به ذکر است با انتخاب مقادیر اندازه متوسط ذرات رسوبی و قطر پایه‌های پل شرط  $\frac{D}{d_{50}} > 25$  نیز برقرار می‌گردد و لایه محافظ تشکیل نمی‌گردد (ملویل ۱۹۹۷).

- حداکثر مقدار عمق آبشستگی در حالت آبشستگی آب زلال و در حالت  $\frac{u}{u_c} = 1$  ایجاد می‌شود بنابراین آزمایش‌ها در حالت آبشستگی آب زلال انجام شد. سرعت در آستانه حرکت ذرات رسوبی با برقرار کردن دبی ثابت و کاهش تدریجی عمق جریان به دست آمد و درستی آن با رابطه ملویل (۱۹۹۷) بررسی شد. روابط ملویل (۱۹۹۷) به صورت زیر ارائه شده است:

$$u_{*c} = 0.0115 + 0.0125 d_{50}^{1.4}, \quad 0.1 \text{mm} < d_{50} < 1 \text{mm} \quad [۳]$$

$$u_{*c} = 0.0305 d_{50}^{0.5} - 0.0065 d_{50}^{-1}, \quad 1 \text{mm} < d_{50} < 100 \quad [۴]$$

$$u_c = 5.75 u_{*c} \log \left( \frac{5.53 y_0}{d_{50}} \right) \quad [۵]$$

در روابط:  $d_{50}$  اندازه ذرات بر حسب میلی‌متر،  $u_{*c}$  سرعت برشی آستانه حرکت بر حسب متر بر ثانیه و  $u_c$  سرعت در آستانه حرکت ذرات رسوبی می‌باشند.

در آزمایش آستانه حرکت، سرعت آستانه حرکت ذرات رسوبی، ۰/۳۳ متر بر ثانیه به دست آمد. با توجه به این که برقراری حالت  $\frac{u}{u_c} = 1$  و کنترل آن مشکل می‌باشد، لذا در تمامی آزمایش‌ها حالت  $\frac{u}{u_c} = 0.9$  برقرار گردید.

- عمق جریان آب از کمیت‌هایی است که با صحیح انتخاب نکردن آن بیشترین عمق آبشستگی مشاهده نمی‌گردد. با شرط  $\frac{y}{D} > 3.5$ ، عمق حفره آبشستگی تحت تأثیر عمق جریان قرار نمی‌گیرد (چیو و ملویل ۱۹۸۷). با

<sup>1</sup> Ansys Fluent

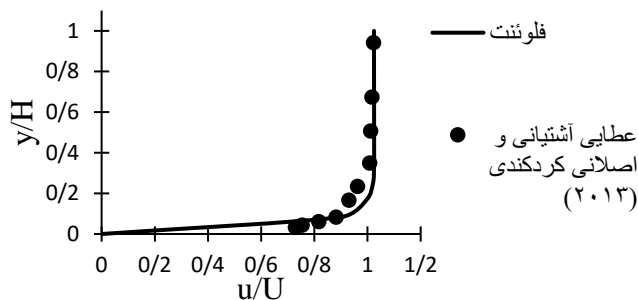
صورت رابطه ۶ تعریف شده است (بی‌نام ۲۰۱۳).

$$I \equiv \frac{u'}{u_{avg}} = 0.16(Re_{DH})^{-1/8} \quad [6]$$

که در آن  $u'$ : ریشه دوم مجذور نوسانات سرعت،  $u_{avg}$ : سرعت متوسط جریان،  $Re_{DH} = \frac{D_h u_{avg}}{\nu}$ : عدد رینولدز بر پایه قطر هیدرولیکی می‌باشند.

### نتایج و بحث

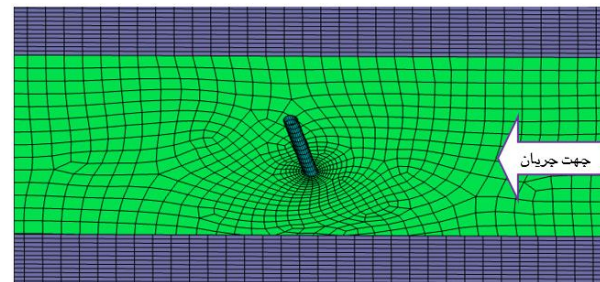
برای مقایسه نتایج توزیع سرعت حاصل از مدل عددی داده‌های عطایی آشتیانی و اصلانی کردکندی (۲۰۱۳) استفاده گردید. در شکل ۴ توزیع سرعت به دست آمده از مدل عددی با نتایج آزمایشگاهی عطایی آشتیانی و اصلانی کردکندی (۲۰۱۳) به صورت بی‌بعد مقایسه شده است. محور افقی نسبت سرعت به سرعت متوسط ( $u/U$ ) و محور قائم نسبت فاصله از سطح بستر به عمق جریان ( $y/H$ ) است. چنانچه شکل ۴ نشان می‌دهد فلوننت توانسته توزیع سرعت را به خوبی شبیه سازی کند هم‌چنین با بررسی نتایج خطای نسبی ۷ درصد استخراج شد.



شکل ۴- مقایسه توزیع سرعت مدل عددی و داده‌های آزمایشگاهی عطایی آشتیانی و اصلانی کردکندی (۲۰۱۳)

شکل ۵ توزیع سرعت در جلوی پایه به قطر ۳/۴ سانتی‌متر با زوایای کج‌شدگی ۰، ۳، ۵، ۷، ۱۰، ۱۳ و ۱۵ درجه به فاصله ۵ سانتی متری از مرکز پایه را نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل دیده می‌شود توزیع سرعت در پایه قائم (زاویه صفر درجه) سرعت کمتری دارد. با افزایش زاویه کج‌شدگی از ۰ درجه تا ۱۵ درجه سرعت جریان افزایش می‌یابد و در زاویه ۱۵ درجه

مدل‌سازی هرگونه جریان و پدیده‌ای مانند جریان‌های تحت‌فشار، جریان‌های با سطح آزاد و لایه‌ای، جریان‌های حاوی ذرات رسوبی و حباب معروف به جریان‌های چندفازی را فراهم کرده است. بررسی‌ها و اجراهای متعدد انجام شده از مدل‌های آشفتگی نشان داده است که مدل آشفتگی k-ε RNG مناسب است. برای استفاده از نرم‌افزار فلوننت، ابتدا مدل هندسی توسط خود نرم‌افزار طراحی شد. پس از بررسی‌های لازم برای شبیه‌سازی‌های عددی طول کانال ۳ متر، عرض ۸۰ سانتی‌متر و ارتفاع ۱۷/۸ سانتی‌متر در نظر گرفته شد. بعد از تولید هندسه و شبکه‌بندی مناسب، شرایط مرزی حاکم بر روی هندسه معرفی گردید. در مرز ورودی، شرط مرزی velocity inlet، در مرز خروجی، شرط مرزی outflow، دیواره‌ها و کف و پایه پل از نوع wall و برای صفحه بالایی از نوع symmetry استفاده شد. شکل ۳ هندسه کانال و شبکه‌بندی اطراف پایه را نشان می‌دهد.



شکل ۳- شبکه‌بندی اطراف گروه پایه کج.

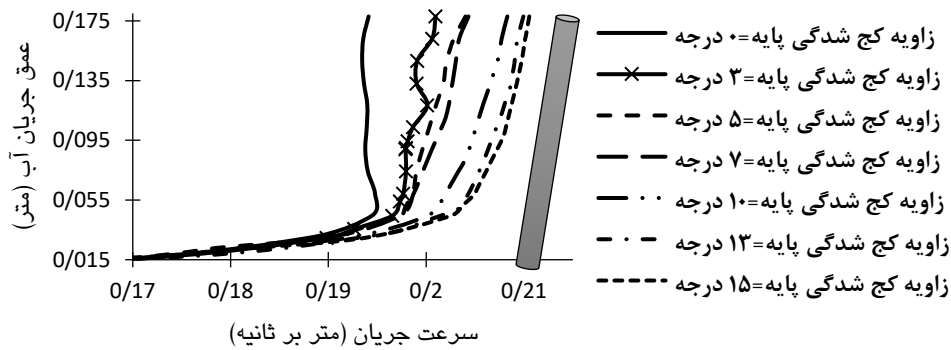
برای صحت‌سنجی مدل عددی از داده‌های آزمایشگاهی ارونقی (۲۰۰۹) استفاده شد. شرایط هیدرولیکی در نظر گرفته شده برای مدل عددی به عمق آب ۰/۱۷۸ متر و سرعت جریان ۰/۲۱ متر بر ثانیه می‌باشد. پس از صحت‌سنجی مدل، الگوی جریان شامل توزیع سرعت و شدت تلاطم بررسی شد.

وقتی جریان وارد مجرای آب می‌شود برای تعیین مقدار تلاطم ایجاد شده می‌توان از پارامتر شدت تلاطم استفاده کرد. در انسیس فلوننت شدت تلاطم به



است. لازم به ذکر است در پایه‌های کج جریان‌های رو-به‌پایین تضعیف شده و عمق حفره آبشستگی کاهش می‌یابد. لذا همواره افزایش سرعت نمی‌تواند سبب افزایش عمق حفره آبشستگی گردد.

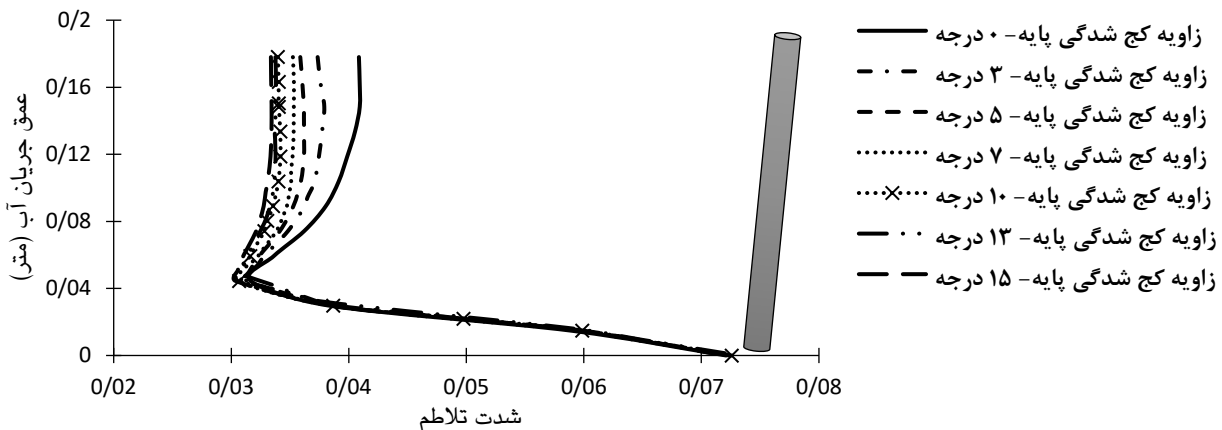
بیشترین سرعت به‌دست آمده است. همچنین مشاهده می‌شود که با افزایش زاویه کج‌شدگی تغییرات سرعت کاهش می‌یابد. بنابراین با توجه به این شکل و بررسی منابع زاویه ۱۵ درجه در آزمایش‌ها مدنظر قرار گرفته



شکل ۵- تأثیر زاویه کج‌شدگی روی توزیع سرعت جریان در بالادست پایه.

زوایا شدت تلاطم روی سطح بستر دارای بیشترین مقدار بوده و سپس تا نسبت عمقی  $y/H=0.25$  کاهش یافته و دارای کمترین مقدار در این نقطه می‌باشد و سپس دوباره روند افزایشی داشته و تا سطح آب ادامه می‌یابد. نسبت عمقی  $y/H=0.25$  برای تمامی زوایای کج شدگی پایه یکسان می‌باشد.

در شکل ۶ توزیع شدت تلاطم در بالادست پایه روی بستر صلب با زوایای کج‌شدگی ۰، ۳، ۵، ۷، ۱۰، ۱۳ و ۱۵ درجه نشان داده شده است. با کج‌شدن پایه فاصله بین پایه و مقطع تعیین شده برای بررسی شدت تلاطم بیشتر شده و نوسانات سرعت کاهش می‌یابد و منجر به کاهش شدت تلاطم می‌گردد. در تمامی



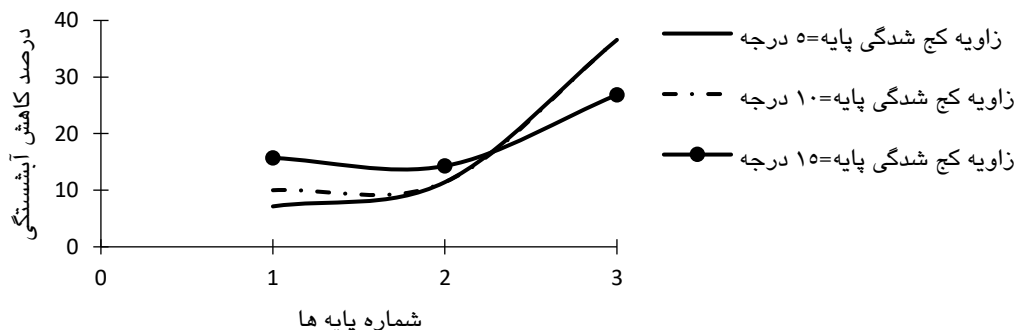
شکل ۶- تأثیر زاویه کج‌شدگی پایه روی شدت تلاطم در بالادست پایه.

آن پرداخته می‌شود.

شکل ۷ درصد کاهش آبشستگی با زوایای کج-شدگی ۵، ۱۰ و ۱۵ درجه برای فاصله بین پایه‌های 3D

در بررسی‌های عددی زاویه کج‌شدگی ۱۵ درجه به عنوان مناسب‌ترین زاویه حاصل شد. برای تأیید این نتیجه آزمایش‌هایی نیز صورت پذیرفت که در ادامه به

عامل حمایتی پایه اول برای پایه‌های دوم و سوم و پایه دوم برای پایه سوم است. بنابراین پایه سوم کمترین عمق آبستگي را نسبت به دو پایه دیگر دارد. در حالی که پایه اول به علت قرارگیری در جلوی جریان و به عنوان محافظ برای پایه‌های دوم و سوم بیشترین عمق آبستگي را دارد. عمق آبستگي برای پایه با زاویه ۱۵ درجه نسبت به زاویه ۵ درجه در پایه کج اول و پایه قائم به ترتیب ۸/۵ و ۲/۸ درصد کاهش داشته است و برای پایه کج دوم ۹/۷ درصد افزایش نشان می‌دهد. برای زاویه کج‌شدگی ۱۵ درجه درصد کاهش آبستگي در پایه کج اول و دوم به ترتیب ۱۵/۷ و ۲۶/۸۵ درصد حاصل شد که این نتیجه با نتایج تحقیقات آقای شلمانی و حکیم‌زاده (۲۰۱۴) همخوانی دارد. لازم به ذکر است در شکل‌ها درصد کاهش آبستگي نسبت به پایه قائم (تک پایه) محاسبه شده است.



شکل ۷- درصد کاهش آبستگي برای گروه پایه کج با زوایای کج‌شدگی ۵، ۱۰ و ۱۵ درجه.

پایه قائم کمتر است. رسوبات حاصل از حفره آبستگي ایجاد شده در اطراف پایه‌ها در فاصله کمی در پشت پایه کج دوم جمع شده است و ارتفاع بالاتری را نشان می‌دهد. با توجه به توضیحات داده شده و همچنین شکل‌های ۷ و ۸ زاویه کج‌شدگی ۱۵ درجه برای کاهش آبستگي مناسب می‌باشد.

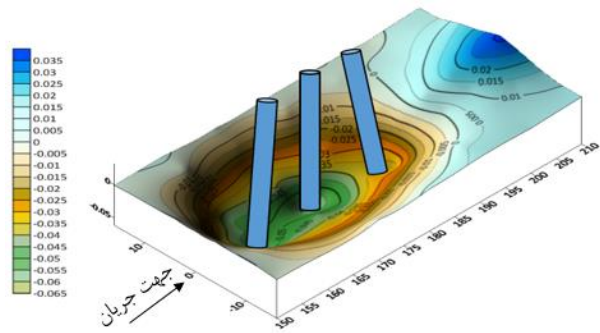
را نشان می‌دهد. پایه کج اول با شماره ۱، پایه قائم (پایه میانی) با شماره ۲ و پایه کج دوم با شماره ۳ مشخص شده است. نتایج بررسی‌ها نشان می‌دهد در پایه کج اول که کج‌شدگی پایه به سمت پایین دست جریان می‌باشد عمق حفره آبستگي نسبت به پایه‌های پشتی بیشتر است و این به دلیل عامل تقویتی پایه‌های دوم و سوم می‌باشد. همچنین با افزایش زاویه کج‌شدگی عمق آبستگي کمتر شده است. در پایه قائم (پایه دوم) درصد کاهش آبستگي برای زوایای ۵ و ۱۰ درجه یکسان می‌باشد و برای زاویه ۱۵ درجه درصد کاهش آبستگي بیشتر است. برای پایه کج دوم که کج‌شدگی آن به سمت بالادست جریان می‌باشد در زوایای ۵ و ۱۰ درجه درصد کاهش آبستگي بیشتری بوده و در زاویه ۱۵ درجه به علت کج‌شدگی به طرف بالادست جریان درصد کاهش کمتر است. همچنین درصد کاهش آبستگي برای پایه‌ها روند صعودی دارد که به علت

در شکل ۸ توپوگرافی ایجاد شده اطراف گروه پایه کج همراه با منحنی تراز عمق آبستگي در اطراف سه پایه کج نشان داده شده است. همان‌طور که دیده می‌شود عمق آبستگي در پایه کج اول به دلیل عامل تقویتی پایه‌های پشتی بیشتر است. در پایه کج دوم نیز عمق آبستگي به دلیل عامل حمایتی پایه‌های کج اول و

به وجود می آمد. به دلیل قطر بیشتر طوق، گسترش عرضی حفره نیز بیشتر بود. ابعاد حفره در بالادست طوق نصب شده روی پایه کج دوم به دلیل کج شدگی به سمت بالادست جریان بیشتر می باشد.

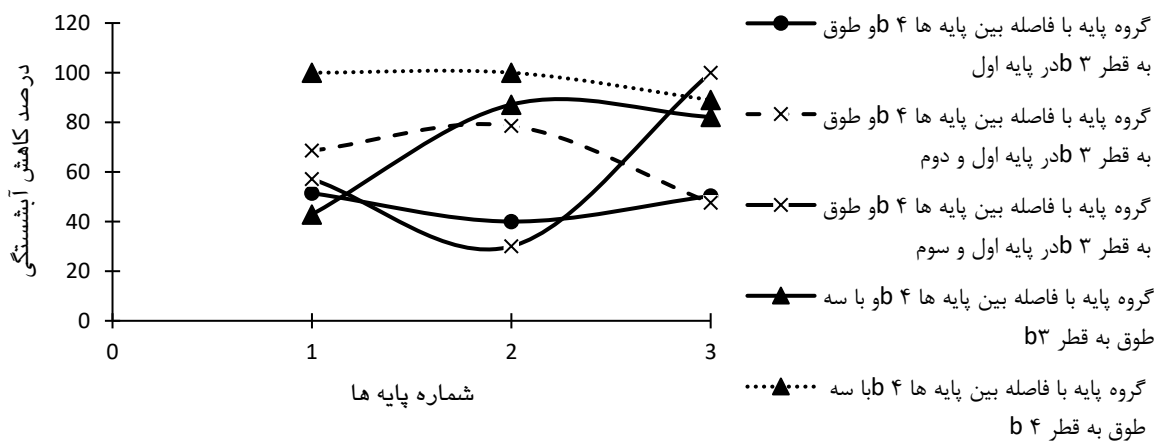
شکل ۹ درصد کاهش آبشستگی در گروه پایه کج با زاویه ۱۵ درجه برای آزمایش‌های گروه پایه با S=4D و طوق با قطرهای 3D و 4D و ضخامت یکسان ۲ میلی‌متر روی بستر ماسه‌ای نشان داده شده است. کاربرد طوق در پایه کج اول نشان می‌دهد که با استفاده از طوق، عمق آبشستگی در جلوی پایه قائم نسبت به حالت بدون طوق ۳۲ درصد کاهش داشته است.

کاربرد طوق در گروه پایه کج با زاویه ۱۵ درجه در هر سه پایه نشان می‌دهد که برای حالتی که فاصله بین پایه‌ها با طوق پوشیده شده است نسبت به حالتی که فاصله بین پایه‌ها با طوق پوشیده نشده است کاهش بیشتری داشته است. به طوری که بهترین حالت استفاده از طوق به قطر 4D بوده است و عمق آبشستگی در پایه قائم ۸۷ درصد کاهش یافته است. مونکادا و همکاران (۲۰۰۹) نیز کاهش عمق آبشستگی را در حالت استفاده از طوق برای شرایط هیدرولیکی مختلف بین ۷۹ تا ۹۶/۵۴ درصد بیان کردند که با نتایج تحقیق حاضر هم‌خوانی دارد.



شکل ۸- توپوگرافی سطح بستر در اطراف گروه پایه کج.

با انتخاب زاویه کج شدگی ۱۵ درجه در ادامه آزمایش‌ها کاهش آبشستگی با استفاده از طوق انجام پذیرفت. در این آزمایش‌ها با قرارگیری طوق در تک تک پایه‌ها و در حالت ترکیبی پایه‌ها مشاهده شده است که در حالت قرارگیری طوق در هر سه پایه، ابتدا گرداب برخاستگی پشت طوق دوم که در روی پایه قائم قرار گرفته، فعال شده و سپس پشت طوق سوم و بعد پشت طوق اول گرداب برخاستگی فعال می‌شود. به طوری که ماسه‌های حاصل از هر کدام از طوق‌ها روی طوق بعدی ریخته می‌شود. با تشکیل گرداب برخاستگی در پشت پایه کج اول و گسترش آن به کناره‌های طوق و رسیدن حفره به بالادست طوق، آبشستگی در بالادست طوق پایه کج اول به وجود آمده و ماسه‌های آن به پایین دست پایه کج اول منتقل شده و در نتیجه از عمق حفره در پشت پایه کاسته می‌شود و سپس به ترتیب بالادست طوق پایه قائم و پایه کج دوم حفره آبشستگی

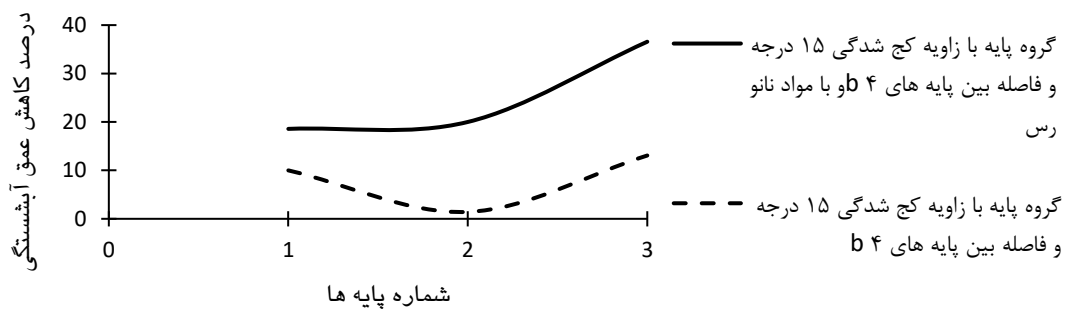


شکل ۹- کاربرد طوق در کاهش آبشستگی موضعی در گروه پایه کج.

نیز کاهش عمق آبشستگی در حالت استفاده از مواد نانورس را ۲۳/۴۴ درصد بیان نمودند که با نتایج این تحقیق همخوانی دارد. بنابراین استفاده از مواد نانورس باعث کنترل عمق آبشستگی می شود. تأثیر مواد نانورس در پایه‌های پشتی نسبت به پایه اول بیشتر بوده است. به طوری که با استفاده از مواد نانورس نسبت به حالت بدون مواد نانورس درصد کاهش آبشستگی در پایه کج دوم از ۱۳ درصد به ۳۶ درصد افزایش یافته است.

برای کاهش بیشتر آبشستگی علاوه بر زاویه کج شدگی و طوق مواد نانو نیز به کار برده شد. این آزمایش در گروه پایه ها و بدون حضور طوق انجام پذیرفت.

در شکل ۱۰ تأثیر مواد نانورس در کاهش عمق آبشستگی در گروه پایه کج با زاویه کج شدگی ۱۵ درجه و S=4D در مقایسه با حالت بدون استفاده از مواد نانورس نشان داده شده است. همان طور که مشاهده می شود استفاده از مواد نانورس عمق آبشستگی را ۲۰ درصد نسبت به حالت بدون مواد نانورس در بالادست پایه قائم کاهش داده است. قاسمی و همکاران (۲۰۱۸)



شکل ۱۰- مقایسه تاثیر مواد نانو رس روی درصد کاهش عمق آبشستگی در بالادست گروه پایه کج.

## نتیجه‌گیری کلی

کج با زاویه ۱۵ درجه، عمق آبشستگی در پایه کج اول ۱۵ درصد، در پایه قائم ۱۴ درصد و در پایه کج دوم ۲۶ درصد نسبت به تک پایه قائم کاهش داشته است. با استفاده از طوق درحالت همپوشانی کامل بین پایه‌ها ابتدا گرداب برخاستگی پشت طوق دوم که در روی پایه قائم قرار گرفته، فعال شده و سپس پشت طوق سوم و بعد پشت طوق اول گرداب برخاستگی فعال می شود و کاهش ۱۰۰ درصدی در پایه کج اول و پایه قائم و کاهش ۸۹ درصدی در پایه کج دوم مشاهده گردید. هم-

بررسی مطالعات عددی در بالادست پایه کج روی بستر صلب نشان داد که توزیع سرعت در پایه قائم (زاویه صفر درجه) سرعت کمتری دارد و با افزایش زاویه کج شدگی پایه، سرعت جریان افزایش می یابد و در زاویه ۱۵ درجه بیشترین سرعت به دست آمده است و شدت تلاطم برای زاویه کج شدگی ۱۵ درجه کمترین مقدار را دارد. بررسی‌های عمق آبشستگی نشان می دهند که با افزایش زاویه کج شدگی از ۰-۱۵ درجه عمق آبشستگی کمتر شده است. در پایه

چنین استفاده از مواد نانورس عمق حفره آبشستگی را کاهش می دهد.

#### منابع مورد استفاده

- Aghaee-Shalmani Y and Hakimzadeh H, 2014. Experimental investigation of scour around semi conical piers under steady current action. *European Journal of Environmental and Civil Engineering* 19(6): 717-732.
- Anonymous, 2013. ANSYS Fluent Users Guide. USA.
- Arvanaghi H, Hosseinzadeh-Dalir A, Fakherifard A and Farsadizadeh D, 2006. Effect of side walls of the laboratory flume on scour depth around bridge piers. *Journal of Agricultural Science* 16(2): 1-11. (In Persian with English abstract)
- Arvanaghi H, 2009. An experimental study of scour reduction around a bridge pier with rectangular collar and simulation of flow pattern around it by turbulence models. PhD Thesis. Department of Water Engineering, University of Tabriz, Iran. (In Persian with English abstract )
- Arvanaghi H, Darbandi S and Abbaspour A, 2011. Investigation of the field of vortex around the bridge pier with CFD. 10<sup>th</sup> Iranian Hydraulic Conference, 11-8, Guilan University, Rasht, Iran. (In Persian with English abstract )
- Ataie-Ashtiani B and Aslani-Kordkandi A, 2013. Flow field around single and tandem piers. *Flow, Turbulence and Combustion* 90(3): 471-490.
- Azam N and Ghomeishi M, 2013. Influence of sacrificial piles on scour reduction of cylindrical bridge pier. *Water and Soil Science* 23(3): 123-134. (In Persian with English abstract)
- Bozkus Z and Çeşme M, 2010. Reduction of scouring depth by using inclined piers. *Canadian Journal of Civil Engineering* 37: 1621-1630.
- Chiew YM and Melville BW, 1987. Local scour around bridge piers. *Journal of Hydraulic Research* 25(1): 15-26.
- Esmaeili Varak M and Saadati Pacheh Kenari SS, 2016. Investigating experimentally the effect of installation of piers group on foundation on scour depth around bridge piers. *Water and Soil Science* 25(2): 27-39. (In Persian with English abstract)
- Ghaderi A, Daneshfaraz R, Zaerkabeh R and Ashkan F, 2018. Experimental investigation of downstream erosion control of stepped spillways using microsilica-structured and nano materials. *Amirkabir Journal of Civil Engineering* DOI: 10.22060/ceej.2018.14919.5781. (In Persian with English abstract)
- Ghasemi E, Zahiri A, Meftah M and Dehghan AA, 2017. Controlling local scouring around bridge pier using nano-structured materials. *Water and Soil Science* 27(3): 79-91. (In Persian with English abstract)
- Ghasemi E, Zahiri A and Rahimi H, 2018. Using nanostructures to control local scour of bridge piers for steady and unsteady flows. *Jordan Journal of Civil Engineering* 12(2): 345-358.
- Hassanzadeh Y, Hakimzadeh H and Ayari S, 2012. Study the effects of bridge pier shape on the flow pattern using the fluent software. *Iran-water Resources Research* 7(3): 95-105. (In Persian with English abstract)
- Heidarpour M, Afzalimehr H and Izadinia E, 2010. Reduction of local scour around bridge pier groups using collars. *International Journal of Sediment Research* 25(4): 411-422.
- Hakimzadeh H, Mehrzad R and Azari N, 2012. Experimental investigation of the effects of slotted conical shaped piers on scour process due to steady flow. Pp. 189-195. 6<sup>th</sup> international Conference on Scour and Erosion, 27-31 August, Paris.
- Hemmati M, Gholizadeh N and Dolatkah S, 2016. Experimental investigation of the effect of diameter and placement level of lattice collars on scour reduction around bridge pier. *Journal of Irrigation Sciences and Engineering* 39(4): 111-122. (In Persian with English abstract)
- Kumar V, Raju KGR and Vittal N, 1999. Reduction of local scour around bridge piers using slots and collars. *Journal of Hydraulic Engineering* 125(12): 1302-1305.

- Karimae Tabarestani M and Zarrati AR, 2015. Design of riprap stone around bridge piers using empirical and Neural Network Method. *Civil Engineering Infrastructures Journal* 48(1): 175-188.
- Melville BW, 1997. Pier and abutment scour: Integrated approach. *Journal of Hydraulic Engineering* 123(2): 125-136.
- Melville BW and Chiew YM, 1999. Time scale for local scour at bridge piers. *Journal of Hydraulic Engineering* 125(1): 59-65.
- Moncada-M AT, Aguirre-Pe J, Bolivar JC and Flores EJ, 2009. Scour protection of circular bridge piers with collars and slots. *Journal of Hydraulic Research* 47(1): 119-126.
- Raudkivi AJ and Ettema R, 1983. Clear-water scour at cylindrical piers. *Journal of Hydraulic Engineering* 109(3): 338-350.
- Rezaie M, Ghaderi A and Daneshfaraz R, 2017. Experimental investigation of clay and nano-clay montmorillonite effect on scour reduction at downstream of screen. *Irrigation and Drainage Structures Engineering Research* 19(73): 1-16. (In Persian with English abstract)
- Shafaei-Bejestan M, 2005. *Hydraulics of Sediment Transport*. Shahid Chamran University of Ahvaz. (In Farsi)
- Zomorodian SMA, Ghaffari H and Ghasemi Z, 2017. Separated and combined effects of collar and sacrificial pile on scour reduction of bridge piers group. *Iranian Journal of Soil and Water Research* 48(4): 879-890. (In Persian with English abstract)