

## بررسی عملکرد و راندمان کابل در کنترل آبشستگی موضعی پایه های پل مستطیلی گردگوشه

سلیم عباسی<sup>۱\*</sup>، مسعود ابام<sup>۲</sup>، منوچهر حیدرپور<sup>۳</sup>

- ۱- دانش آموخته کارشناسی ارشد مهندسی عمران- سازه‌های هیدرولیکی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران
- ۲- دانش آموخته کارشناسی ارشد مهندسی عمران- سازه‌های هیدرولیکی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد استهبان، فارس، ایران
- ۳- استاد گروه مهندسی آب، دانشکده مهندسی کشاورزی، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ایران

### تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۳۹۸/۰۷/۲۸  
بازنگری: ۱۳۹۸/۰۹/۱۹  
پذیرش: ۱۳۹۸/۱۰/۱۱  
ارائه آنلاین: ۱۳۹۸/۱۲/۱۲

### کلمات کلیدی:

آبشستگی موضعی  
پایه پل  
پیچش کابل  
زاویه برخورد  
گرداب نعل اسبی

**خلاصه:** در این مطالعه، عملکرد و راندمان کابل در کنترل آبشستگی موضعی در اطراف پایه پل مستطیلی گردگوشه با زاویه برخورد متفاوت جریان بررسی شده است. همچنین از ۳ نوع پایه، مستطیلی گردگوشه بدون کابل، مستطیلی گردگوشه با کابل ۱۰٪ قطر پایه و زاویه پیچش کابل ۱۵ درجه (نوع دوم) و مستطیلی گردگوشه با کابل ۱۵٪ قطر پایه و زاویه پیچش کابل ۱۲ درجه (نوع سوم) تحت زوایای جریان صفر، ۵، ۱۰ و ۱۵ درجه آزمایش شده است. هدف از این تحقیق، پیچیدن کابل به دور پایه و تغییر در زاویه برخورد جریان جهت کاستن شدت حرکت جریان رو به پایین آب می باشد که پس از برخورد به پایه، گردابه های نعل اسبی کاهش یابد و سپس میزان تأثیر آن بر کاهش عمق آبشستگی نهایی اندازه گیری شود. در این آزمایش ها تأثیر زوایای جریان بر روی پایه نیز بررسی شد و پایه‌ی تحت زاویه صفر درجه در جهت جریان با پایه های نوع دوم و سوم موازی جهت جریان مقایسه شد. افزایش زاویه برخورد جریان به پایه باعث عریض تر شدن پایه و در نهایت افزایش قدرت گرداب نعل اسبی شد. پایه های تحت زاویه ۱۵ درجه با جهت جریان بیشترین عمق آبشستگی را داشته و تأثیر کابل در کاهش عمق آبشستگی برای این زاویه برای پایه های نوع دوم و سوم برابر ۱۰ و ۲۲ درصد نسبت به پایه نوع اول می باشد. همچنین در حالت تغییر زاویه برخورد جریان پایه نوع دوم تحت زاویه ۵، ۱۰ و ۱۵ درجه بیشترین مقدار را به ترتیب ۳، ۲۱ و ۳۷ درصد افزایش عمق نسبت به زاویه صفر درجه دارند.

### ۱- مقدمه

هستند، اما شدت این فرسایش به زمان بستگی دارد، در این تحقیق به مطالعه زمان توسعه یافتن عمق آبشستگی نیز پرداخته شده است. در مطالعه چیو (۱۹۹۲) برای اولین بار از شکاف به عنوان یکی از روش های پیشگیری و کنترل آبشستگی استفاده کرد. وی بیان کرد که چنانچه شکاف نزدیک بستر باشد، با ایجاد جهت جریان افقی، جریان رو به پایین که عامل اصلی ایجاد گردابه های نعل اسبی را به فاصله دورتر از پایه منحرف کرده و باعث کاهش عمق آبشستگی خواهد شد [۱]. چیو (۱۹۹۵) بررسی پایداری سنگ چین در اطراف پایه استوانه ای و تعریف مکانیزم های مختلف تخریب سنگ چین در شرایط آبشستگی آب زلال را در حالت طراحی نامناسب سنگ چین مطالعه کرد. دو آزمایش طولانی مدت با دبی ثابت برای پررود زمانی طولانی مدت (بیشتر از ۷۲ ساعت) و کوتاه مدت لایه سنگ چین

علل اصلی خرابی بسیاری از پل ها قبل از پایان عمرشان، عدم توجه به معیارهای هیدرولیکی در طراحی، اجرا و نگهداری از آنها می باشد. ظرفیت گذر سیلاب از پل، پایداری بازه رودخانه در محل احداث پل، هدایت جریان، نیروهای هیدرودینامیک جریان آبشستگی و فرسایش در اثر تنگ شدگی و یا ایجاد مانع، عواملی هستند که در تعیین جانمایی طول، ارتفاع، آرایش پایه، تکیه گاه ها و مشخصات هندسی پایه ها و تکیه گاه های پل حائز اهمیت هستند. یکی از مهم ترین عوامل تخریب پل ها، آبشستگی اطراف آنها می باشد. لذا به منظور جلوگیری و کاهش اثرات آن، شناخت مکانیزم خرابی پایه های پل لازم و ضروری می باشد. مواد بستر رودخانه ها فرسایش پذیر

\* نویسنده عهده دار مکاتبات: salimabbasi@student.uma.ac.ir



پایه با زوایای پیچش مختلف و قطرهای متفاوت کابل نسبت به قطر پایه، مورد آزمایش قرار گرفت. برای آزمایش های با ۲ قطر کابل متفاوت، به کاهش عمق آبستنگی بیش از ۴۳ درصد دست یافتند [۱۰].

ارونقی و همکاران (۲۰۰۹) نشان دادند با به کارگیری طوق های مستطیلی، سرعت آبستنگی به طور چشم گیری کاهش می یابد. در این آزمایش ها هدف، به دست آوردن ابعاد مناسب طوق مستطیلی در بالادست و پایین دست نسبت به بدنه پایه پل مدل بود و نتایج نشان داد، که مقادیر مناسب آنها به ترتیب ۰/۹۲ و ۱/۴۲ برابر قطر پایه می باشد [۱۱]. عطایی آشتیانی و همکاران (۲۰۱۰) آبستنگی آب زلال اطراف پایه پل پیچیده با ابعاد مختلف سر شمع را مورد ارزیابی قرار دادند [۱۲]. لو و همکاران (۲۰۱۱) یک مدل نیمه تجربی برای توسعه زمانی عمق آبستنگی پایه های پل استوانه ای با پی را پیشنهاد دادند [۱۳]. ایزدی نیا و حیدرپور (۲۰۱۲) از پایه های استوانه ای شکل تک پایه، پایه های با کابل و پایه های با شیار استفاده کردند. بیشترین میزان کاهش آبستنگی برای پایه محافظت شده با کابل برابر ۱۳ و ۱۷ درصد به ترتیب در جلو و پشت پایه به دست آمد. شجاعی و همکاران (۲۰۱۲) دو حالت صفحات مستغرق و صفحات مستغرق توام با طوق را مورد بررسی قرار دادند [۱۴]. در آزمایش های پایه های با صفحات مستغرق در مقایسه با پایه بدون حفاظت، عمق آبستنگی کاهش و زمان تعادل آبستنگی افزایش یافت. با افزایش تعداد صفحات به ۴ عدد، ۶۱ درصد کاهش عمق آبستنگی در جلوی پایه حاصل شد [۱۵].

فائل و همکاران (۲۰۱۶) تأثیر شکل و زاویه برخورد متفاوت جریان را در پایه های تک مطالعه کردند. نسبت طول به عرض پایه های مورد مطالعه آنها مساوی و کوچک تر از ۴ بود. این محققان ضرایب شکل برای مدل های مورد مطالعه ارائه کردند [۱۶]. کشاورزی و همکاران (۲۰۱۸) حداکثر عمق آبستنگی در بالادست، جلو و پشت پایه را برای پایه های ۲ تا ۱ در یک امتداد بررسی کردند. آنها اظهار کردند که حداکثر عمق آبستنگی در بالادست پایه جلویی هنگامی رخ می دهد که فاصله بین ۲ پایه ۲/۵ برابر قطر آن باشد [۱۷]. ابراهیمی و همکاران (۲۰۱۸) به صورت آزمایشگاهی آبستنگی پایه پل به شکل بینی نوک تیز با نصب صفحات مستغرق افقی در ارتفاع های مختلف پایه را مورد ارزیابی قرار دادند. همچنین بیان کردند که با نزدیک تر

برای مدت ۱۵ دقیقه در معرض یک شدت جریان معین انجام داد [۲]. کومار و همکاران (۱۹۹۹) تأثیر شکاف در کاهش آبستنگی موضعی پایه پل را بررسی کردند. نتایج تحقیق آنها نشان داد که شکاف در کاهش آبستنگی مؤثر است، بویژه اگر شکاف تا سطح بستر امتداد داشته باشد [۳]. زراتی و عزیز (۲۰۰۱) کارآیی یک نیم طوق روی پایه هایی با مقطع مستطیلی شکل را مورد آزمایش قرار دادند. نتایج زراتی و عزیز نشان داد، که هر چه طوق پایین تر نصب شود، درصد کاهش آبستنگی بیشتر خواهد بود [۴]. حیدرپور و همکاران (۲۰۰۳) کنترل و کاهش آبستنگی موضعی پایه پل با استفاده از شکاف را مورد بررسی قرار دادند. نتایج آزمایش ها نشان داد که در پایه های استوانه ای، شکافی به طول یک و دو برابر قطر پایه که نزدیک سطح آب قرار دارند، هیچ تأثیری بر عمق تعادل آبستنگی پایه ندارند [۵]. مشاهیر و زراتی (۲۰۰۳) طوقه هایی به قطر سه برابر عرض پایه مستطیلی استفاده کردند، که پایه در دو حالت زاویه ای مورد آزمایش قرار گرفت. نتایج نشان داد کارآیی طوق روی پایه ای که زاویه ی ۵ درجه نسبت به جهت جریان دارد، از این میزان کمتر است [۶]. خدارحمی و همکاران (۲۰۰۳) تأثیر جهت جریان را بر عملکرد شکاف در کنترل و کاهش آبستنگی موضعی در گروه پایه های استوانه ای را بررسی کردند. نتایج نشان داد که شکاف، در گروه پایه های با فاصله بیشتر، عملکرد بهتری را نشان می دهد، همچنین با افزایش زاویه برخورد جریان، عملکرد شکاف، کاهش داشته و حتی در شرایطی باعث افزایش عمق آبستنگی شده است [۷]. زراتی و همکاران (۲۰۰۴) عملکرد طوق به همراه سنگ چین دور پایه را برای پایه مستطیلی انجام دادند. آنها مشاهده کردند که با نصب طوق بر روی پایه، ابعاد لازم برای محدوده پوشش سنگ چین کاهش می یابد [۸]. زراتی و همکاران (۲۰۰۶) عملکرد طوق های مستقل و پیوسته با سنگ چین در کاهش آبستنگی موضعی در گروه پایه ها را مورد بررسی قرار دادند. نتایج این تحقیقات نشان داد که ترکیبی از یک طوق پیوسته و سنگ چین منجر به کاهش عمق آبستنگی به میزان ۵۰٪ در جلو و ۶۰٪ در عقب پایه می شود. در حالی که در طوقه های بهم پیوسته به تنهایی عمق آبستنگی را به ترتیب ۲۵ و ۳۵ درصد در جلو و پشت پایه کاهش می دهد [۹]. دی و همکاران (۲۰۰۶) صفحات تقسیم کننده جریان به همراه کابل با زوایای پیچش متفاوت و قطرهای مختلف نسبت به قطر پایه را مطالعه کردند. سه

پایه در مقابل کاهش عمق آبشستگی و همچنین افزایش زمان وقوع حداکثر عمق آبشستگی می باشد.

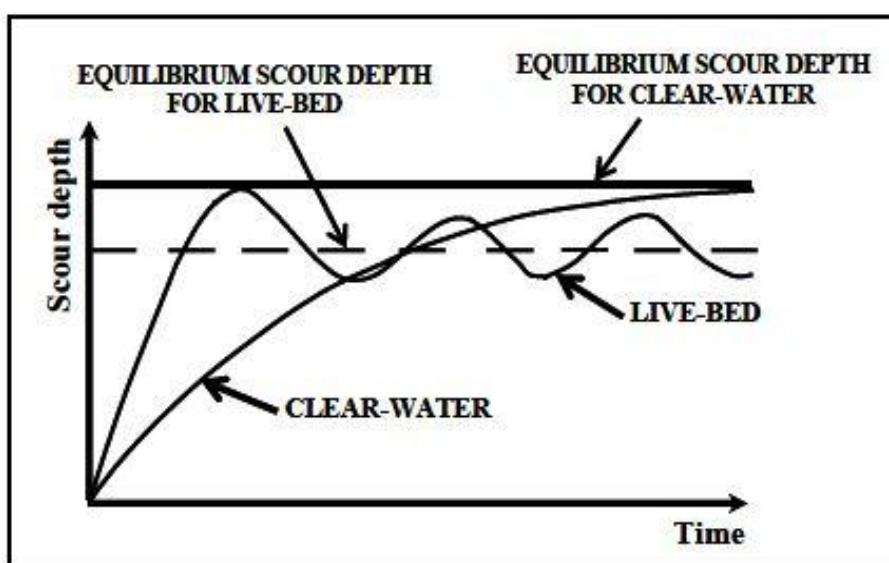
## ۲- مکانیزم آبشستگی

آبشستگی آب زلال زمانی اتفاق می افتد که مواد بستر در بالادست محل پایه پل هیچ گونه حرکتی نداشته باشد. یعنی در سرعت های پایین تر از سرعت بحرانی که جریان در بستر افقی به آستانه حرکت نرسیده است، هیچ رسوبی از بالادست جریان به داخل حفره آبشستگی موضعی وارد نمی شود، ولی شتاب جریان و گرداب های ایجاد شده در محل پایه های پل سبب حرکت مواد (رسوبات) از جای خود می شوند.

چابرت و انگلدینگر (۱۹۵۶) دریافتند که در آبشستگی آب زلال، عمق آبشستگی یک رابطه تقریباً خطی با نیروی برشی یا سرعت جریان در بالادست دارد و هرچه سرعت جریان زیادتر شود عمق آبشستگی نیز افزایش می یابد، تا اینکه سرعت به نقطه بحرانی خود که آستانه حرکت ذرات در بالادست باشد، می رسد. تا لحظه قبل از آستانه حرکت هیچ رسوبی از بالادست وارد حفره نمی شود؛ ولی از لحظه آستانه حرکت به بعد، حرکت رسوبات از بالادست شروع می شود و مقداری از حفره، توسط رسوبات بالادست پر می شود [۲۱].

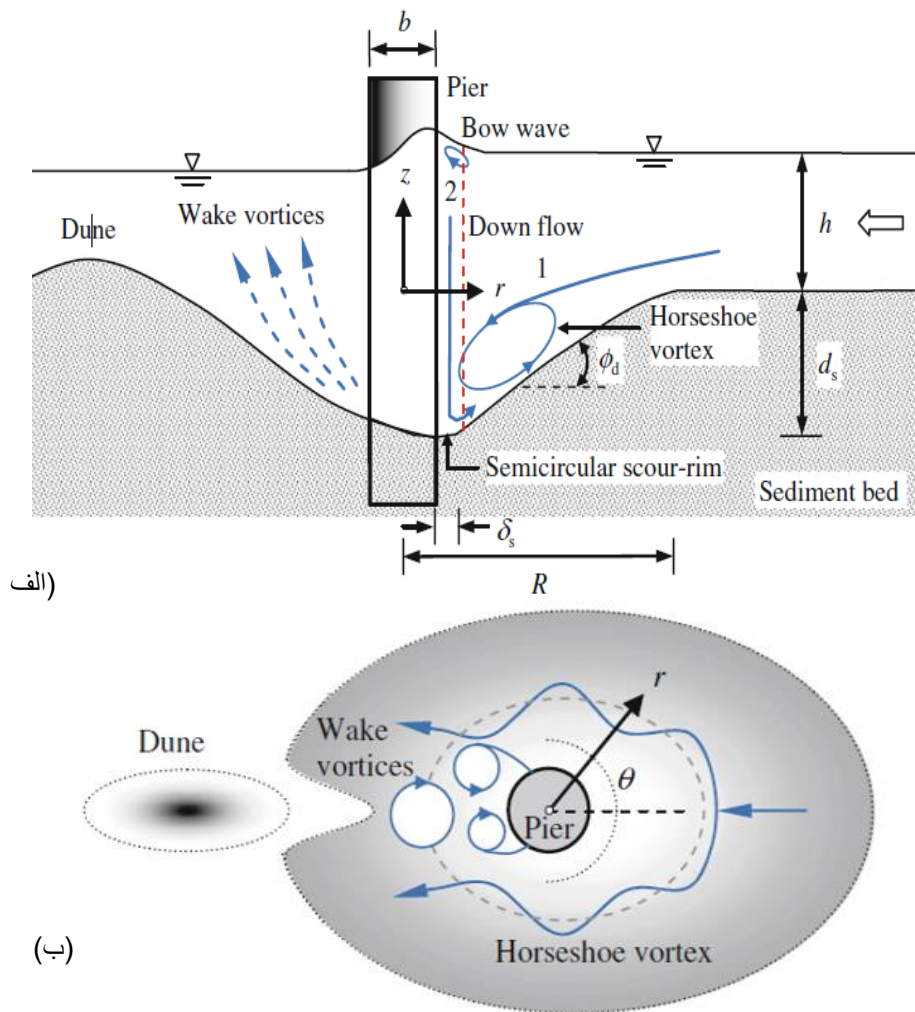
شدن صفحات مستغرق افقی به بستر، عمق آبشستگی کاهش می یابد. در نهایت، از اندازه گیری های آزمایشگاهی چهار معادله برای برآورد عمق آبشستگی پیشنهاد شد [۱۸]. طاهری و قمشی (۲۰۱۹) بررسی اثر موقعیت قرارگیری طوقه های مشبک بر عمق آبشستگی پایه پل دوکی شکل را مورد بررسی قرار دادند. در این تحقیق طوقه های ساده و طوقه های مشبک در چهار موقعیت قرار داده شدند. نتایج نشان داد که تراز سطح بستر و زیر بستر بهترین موقعیت برای نصب طوقه ها بود. در سطح بستر طوقه ساده راندمان ۱۰۰ درصد و طوقه ۷۰ درصد مشبک، راندمان ۹۲ درصد در کاهش عمق آبشستگی داشت. در زیر بستر نیز عملکرد همه طوقه ها مشابه هم بودند و باعث کاهش ۸۸ درصد عمق آبشستگی شدند [۱۹].

در مطالعات پیشین با توجه به سناریو های متعددی که در مورد پدیده آبشستگی پایه های پل با روش های مختلف (صفحات مستغرق، ایجاد شیار، طوق و سنگ چین) توسط محققان مختلف مورد مطالعه قرار گرفته و ضمن اینکه بررسی با کارایی کابل با تغییر زاویه برخورد جریان در نظر گرفته نشده است. در این مطالعه به بررسی دقیق کارایی کابل در کنترل آبشستگی موضعی در اطراف پایه مستطیلی شکل گرد گوشه با تغییر زاویه برخورد جریان پرداخته شده است. هدف اصلی این تحقیق عبارتند از: ۱- بررسی تأثیر تغییر قطر و زاویه پیچش کابل ۲- تأثیر تغییر زاویه برخورد جریان جهت حفاظت



شکل ۱. تغییرات عمق آبشستگی نسبت به زمان در بستر زنده و آب زلال [۲۰].

Fig. 1. variation of ratio-to-time scour depth in live bed and clear water



شکل ۲. هندسه یک حفره آبشستگی و مؤلفه های میدان جریان در یک پایه دایروی؛ الف) دید از جانب، ب) دید از پلان [۲۲].

Fig. 2. The geometry of a scour hole and components of a flow field in a circular pier; A) Side view, B) Plan view

پس از برخورد جریان به پایه پل و با توجه به اینکه حداکثر سرعت در لایه های بالایی سطح آب می باشد. در سطوح بالایی جریان، فشار حداکثر و سرعت حداقل بوده، همچنین در جلوی پایه جریان در جهت رو به پایین شکل گرفته که مطابق شکل ۲ پس از برخورد عمودی با بستر رودخانه، باعث حفر بستر در هر طرف می گردد [۲۲]. مقداری از جریان به سمت بالا بازگشت کرده و با برخورد به جریان عمومی مجبور به حرکت در جهت جریان می شود که مجدداً به پایه برخورد می کند، این چرخش جریان باعث حفر بستر بصورت جریان چرخشی می شود که به این جریان چرخشی با توجه به شکل ۲، گردابه نعل اسبی گفته می شود. با اندازه گیری تنش برشی، جهت جریان و سرعت جریان در اطراف پایه استوانه ای شکل به این نتیجه رسیده اند که جریان گردابی نعل اسبی با سرعت زیاد رو به پایین در

در آبشستگی بستر زنده هنگامی که سرعت جریان از حد بحرانی گذشت، عمق آبشستگی نسبت به زمان مطابق شکل ۱ تغییرات نوسانی خواهد داشت و علت این امر حرکت توده های شنی است که از بالادست شروع می شود. در این حالت، شرایط جریان در بستر افقی از آستانه حرکت عبور کرده و در نتیجه حرکت عمومی مواد رسوبی بستر وجود دارد. در این نوع آبشستگی حفره ایجاد شده به طور متوسط با رسوباتی که از بالادست منتقل می شوند، پر می شود. البته به دلیل وجود جریان های گردابی تولید شده در پایه های پل، مقدار فرسایش در ابتدا زیاد می باشد و پس از مدتی آبشستگی به حالت تعادل می رسد. با توجه به شکل ۲ زمانی آبشستگی به حالت تعادل می رسد که میزان رسوبات خارج شده از حفره آبشستگی برابر با مقدار رسوبات وارده از بالادست به داخل آن باشد.

سرعت متوسط جریان،  $V_c$  سرعت جریان برای شرایط آستانه حرکت،  $D_{50}$  قطری که ۵۰ درصد ذرات بستر از آن ریزترند،  $d_s$  عمق نهایی آبهستگی،  $t$  زمان شروع آبهستگی،  $t_e$  زمان تعادل آبهستگی،  $g$  شتاب ثقل،  $y$  عمق جریان،  $\rho$  چگالی آب،  $\rho_s$  چگالی ذرات رسوبی،  $V$  لزوجت سینماتیکی،  $\alpha$  زاویه برخورد جریان،  $\theta$  زاویه پیچش کابل می باشد.

با به کارگیری تئوری باکینگهام در تحلیل ابعادی، رابطه (۱) را می توان به صورت رابطه بی بعد (۲) نوشت:

$$F_2\left(\frac{gy}{V^2}, \frac{v}{\rho V D}, \frac{\rho_s}{\rho}, \frac{V}{V_c}, \frac{t}{t_e}, \frac{L}{B}, \frac{P}{B}, \frac{d_s}{B}, \frac{d_{50}}{B}, \frac{y}{B}, a, \theta\right) = 0 \quad (2)$$

با انجام ساده سازی و نیز ترکیب پارامترهای بی بعد، معادله (۲) را می توان به صورت معادله (۳) خلاصه کرد:

$$F_3\left(\frac{d_s}{B}, \frac{t}{t_e}, \frac{P}{B}, a, \theta\right) = 0 \quad (3)$$

در رابطه بالا  $\frac{d_s}{B}$  دد بی بعد عمق نهایی آبهستگی،  $\frac{t}{t_e}$  مان بی بعد آبهستگی،  $\frac{P}{B}$  ی بعد قطر کابل،  $\alpha$  زاویه بی بعد برخورد جریان،  $\theta$  زاویه پیچش کابل می باشد.

جلوی پایه گسترش می یابد. اندازه چرخش این سیستم و بزرگ شدن این حفره به سرعت افزایش یافته ولی پس از اینکه آبهستگی به حالت تعادل رسید، میزان تنش برشی و چرخش کاهش می یابد. زمانی که قدرت نیروهای محرک تقریباً برابر با قدرت نیروهای مقاوم (وزن اشباع ذره) گردید، آبهستگی متوقف می شود. هنگامی که آب به پایه پل برخورد می کند سرعت آن صفر می شود که این نقطه را نقطه سکون می نامند. در نقطه سکون، فشار بیشترین مقدار را دارد و هرچه از این نقطه فاصله گرفته شود، فشار کاهش یافته و سرعت افزایش پیدا می کند. از نقطه ای که سرعت کاهش می یابد آب به تدریج انرژی جنبشی خود را از دست می دهد و دیگر قادر نیست بر افزایش فشار غلبه کند و لذا یک جدادگی در جریان ایجاد می شود. نقطه ای که در آن جدایی آغاز می شود، نقطه جدادگی نامیده می شود و منطقه ای که در پشت پایه به وجود می آید، به منطقه wake معروف است.

### ۳- مواد و روش ها

#### ۳-۱- تحلیل ابعادی

عمق آبهستگی در اطراف پایه پل با کارایی کابل و زاویه برخورد متفاوت متأثر از پارامترهایی به صورت زیر می باشد:

$$F_1(B, L, P, V, V_c, D_{50}, d_s, t, t_e, g, y, \rho, \rho_s, v, a, \theta) = 0 \quad (1)$$

که در رابطه (۱)،  $B$  عرض پایه،  $L$  طول پایه،  $P$  قطر کابل،  $V$



شکل ۳. نمایی از تجهیزات آزمایشگاهی  
Fig. 3. View of laboratory equipment



### ۳-۲-۳- مشخصات فلوم آزمایشگاهی، روش آزمایش و مدل های فیزیکی

آزمایش ها در آزمایشگاه هیدرولیک دانشگاه آزاد واحد استهبان در یک فلوم آزمایشگاهی مستطیلی به طول کل ۱۴ متر، طول مفید ۱۰ متر، عرض ۰/۴ متر و عمق ۰/۶ متر که دارای کف افقی ثابت (بدون شیب) بود، صورت پذیرفته است. جنس کف فلوم از PVC به ضخامت ۱۰ میلی متر و دیواره ها از جنس پلکسی گلس به ضخامت ۱۰ میلی متر، می باشد. تمام وزن فلوم توسط خرابایی که در زیر آن نصب شده بود، تحمل می شود. شکل ۳ نمایم از فلوم آزمایشگاهی را نشان می دهد که در پایین دست محل آزمایش یک سرریز قابل تنظیم وجود دارد، که می توان توسط آن، عمق آب را کانال کنترل نمود.

در پژوهش حاضر از دبی ثابت ۲۳ لیتر بر ثانیه که توسط شیر مدرج در کنار پمپ تنظیم شده است، استفاده گردید. محدوده انجام آزمایش در طول فلوم دارای طول ۲ متر و عرض ۰/۲ متر (طبق توپوگرافی ها) می باشد. این منطقه از ابتدای کانال فاصله ای در حدود ۳/۵ متر دارد. این امر بدین دلیل است که بتوان قبل از محدوده آزمایش یک حوضچه آرامش جهت آرام نمودن آب خروجی از پمپ ایجاد کرد. جهت اندازه گیری عمق آبشستگی از عمق سنج که به صورت ریل بر روی فلوم در سه جهت طول، عرض و ارتفاع قابلیت حرکت داشت، استفاده شد.

### ۳-۲-۱- انتخاب پارامترهای مؤثر در عمق آبشستگی و ابعاد مدل

#### آزمایش

جهت انجام آزمایش در شرایطی که حداکثر عمق آبشستگی در آب زلال را شاهد باشیم، پارامترهایی نظیر عمق جریان، نوع دانه بندی و اندازه رسوبات باید نوعی انتخاب شوند که تأثیر آنها بر روی عمق آبشستگی حذف شوند. در انتخاب ابعاد جهت مدل نمودن صحیح باید به تأثیر دیواره های جانبی کانال توجه شود. همچنین سرعت جریان تا حد امکان به سرعت آستانه حرکت ذرات بستر نزدیک باشد.

### ۳-۲-۲- اندازه پایه ها

جهت از بین بردن تأثیر دیواره های کانال بر عمق آبشستگی موضعی پایه های پل طبق معیاری که توسط رادکیوی و اتما (۱۹۸۳) بیان شده است، حداقل نسبت عرض کانال به عرض پایه باید  $6/25$

باشد [۲۳]. همچنین این معیار برای پایه های با زاویه ۱۵ درجه که عرض پایه در این حالت بیشترین مقدار را دارد، این مقدار  $7/56$  می باشد که با معیار رابطه (۴) مطابقت دارد.

$$\frac{400}{30} = 13.3 > 6.25 \quad (4)$$

### ۳-۲-۳- اندازه ذرات و دانه بندی رسوبات

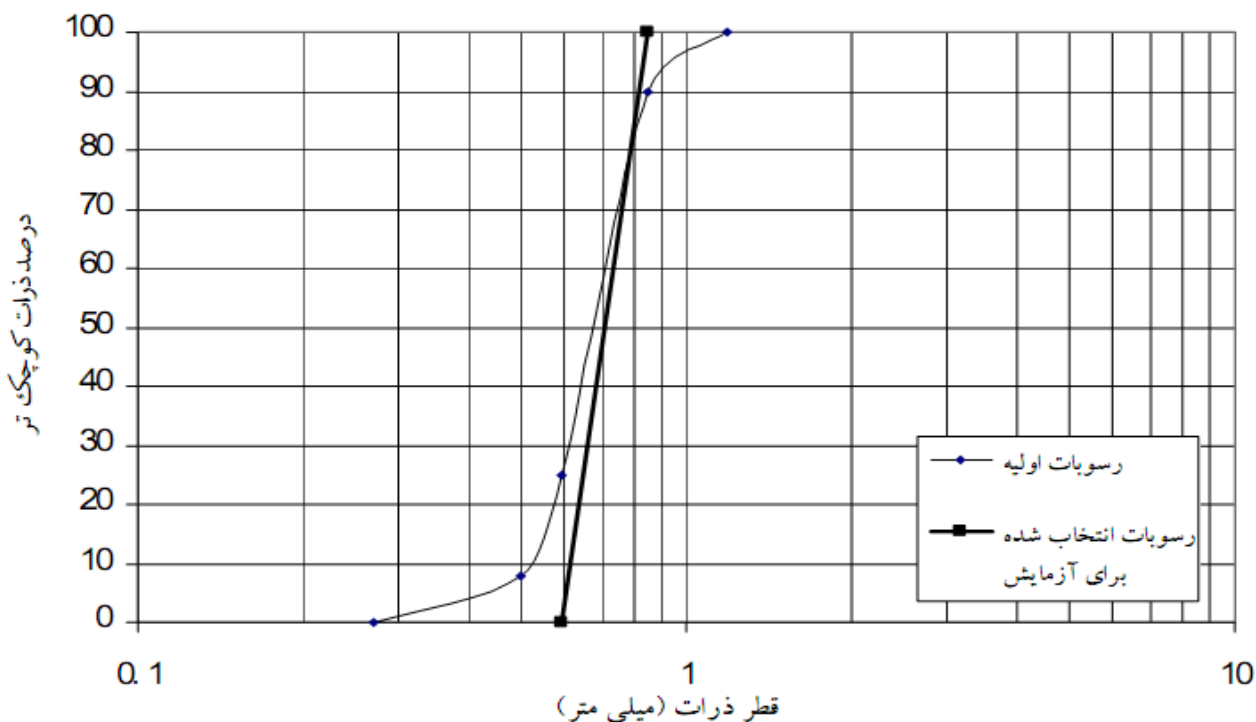
رادکیوی و اتما (۱۹۸۳) اظهار داشتند، تشکیل ریپل ها که در رسوبات غیرچسبنده با اندازه متوسط  $0/7$  تا  $0/5$  میلی متر اتفاق می افتد، باعث ایجاد برجستگی های کوچک مجزا از هم در سطح بستر می شود، باید برای جلوگیری از تشکیل پدیده ریپل، قطر متوسط ذرات بزرگتر از  $0/7$  میلی متر باشد. ملویل و ساترلند (۱۹۸۸) جهت حذف تأثیر اندازه ذرات رسوبات بر عمق آبشستگی و همچنین نسبت عرض پایه به قطر متوسط ذرات باید  $\frac{b}{d_{50}}$  بزرگتر از ۲۵ تا ۲۰ باشد. انحراف معیار هندسی ذرات رسوب نیز در مقدار عمق ایجاد شده تأثیرگذار است. به طوری که عدم یکنواختی ذرات رسوب باعث کاهش عمق تعادل آبشستگی می گردد. انحراف معیار هندسی ذرات بایستی کمتر از  $1/3$  باشد [۲۳، ۲۴].

$$\sigma = \left( \frac{d_{84.1}}{d_{15.9}} \right)^{0.5} < 1.3 \quad (5)$$

با توجه به توضیحات فوق، در پژوهش حاضر از نوعی ماسه ریخته گری گردگوشه با چگالی نسبی  $2/65$  استفاده شده است. جهت تأمین یکنواختی رسوبات، این مصالح از دو الک متوالی  $0/59$  و  $0/85$  عبور داده شده اند. رسوبات باقی مانده بین دو الک برای این آزمایش انتخاب شده اند. این رسوبات دارای قطر بزرگتر از  $0/59$  میلی متر و کوچکتر از  $0/85$  میلی متر بودند. منحنی دانه بندی رسوبات انتخاب شده برای آزمایش در شکل ۴ نشان داده شده است. با توجه به شکل، رسوبات دارای  $d_{50} = 0.7$  و  $\sigma = 1.23$  می باشند که شرایط فوق را تأمین می کند.

### ۳-۲-۴- سرعت جریان در فلوم

جهت تشکیل حداکثر عمق آبشستگی موضعی در شرایط آب زلال، سرعت جریان باید تا حد امکان به سرعت بحرانی نزدیک باشد.



شکل ۴. منحنی دانه بندی ذرات رسوب مورد استفاده در آزمایش ها  
 Fig. 4. The particle size distribution curve of the sediment used in the experiments

#### ۵-۲-۳- تأثیر عمق جریان

چابرت و انگلدينگر (۱۹۵۶)، اتما (۱۹۸۰)، رادکيوي و اتما (۱۹۸۳) و ملويل و ساترلند (۱۹۸۸) نشان دادند که عمق آبشستگی در جريان های کم عمق با افزایش عمق جريان زياد می شود و در جريان های عمیق، تحت تأثیر عمق جريان نخواهد بود. محققان بر اين عقیده اند که در جريان های کم عمق، گرداب های ایجاد شده در سطح آب (گرداب موج کماني) به علت گردش در خلاف جهت جريان، با جريان تداخل داشته و باعث کاهش جريان رو به پايين و بنابراین کاهش عمق آبشستگی می شود [۲۱، ۲۳-۲۵].

با افزایش عمق جريان، اين تداخل کاهش یافته تا اینکه در عمق جريان بيشتري از سه برابر قطر پايه تأثیر آن بر عمق آبشستگی از بين می رود. تاکنون هيچ رابطه دقيقی برای بيان تأثیر عمق جريان بر عمق آبشستگی به دست نيامده است. داده های جمع آوری شده توسط چيو (۱۹۹۲)، چيو (۱۹۹۵)، اتما (۱۹۸۰) و شن و همکاران (۱۹۶۹) در شرايط آب زلال و بستر زنده که در آن  $k_p$  (عمق متعادل آبشستگی) برابر با عمق آبشستگی در عمق مشخص جريان نسبت به

رادکيوي و اتما (۱۹۸۳) به اين نتیجه رسيدند که شروع آبشستگی موضعی در اطراف پايه ها در سرعت برابر نصف سرعت بحرانی در آستانه حرکت ذرات رسوب اتفاق می افتد و در سرعت کمتر از سرعت بحرانی، شرايط آبشستگی آب زلال اتفاق می افتد [۲۳].

سرعت، آستانه آبشستگی را افزایش می دهد. سرعت بزرگتر، عمق آبشستگی عمیق تر را به دنبال دارد. همچنين عمق آبشستگی بستگی به نوع جريان نیز دارد، با افزایش عدد فرود عمق آبشستگی افزایش می يابد.

برای به دست آوردن دبي، متناظر با سرعت آستانه حرکت ذرات بستر، جريان آب با یک دبي دلخواه توسط پمپ وارد فلوم شد. سپس توسط دريچه انتهایی فلوم، عمق جريان کاهش یافت، تا با توجه به رابطه پيوستگی، سرعت جريان افزایش پیدا کرده و به سرعت بحرانی نزدیک شود. به محض رسيدن ذرات به آستانه حرکت، کاهش عمق را متوقف کرده و عمق به دست آمده ثابت شد. بنابراین با توجه به مطالب ذکر شده تمام اين آزمایش ها در شرايط  $0.9$  سرعت بحرانی  $(0.9/V_c)$  انجام گرفت.



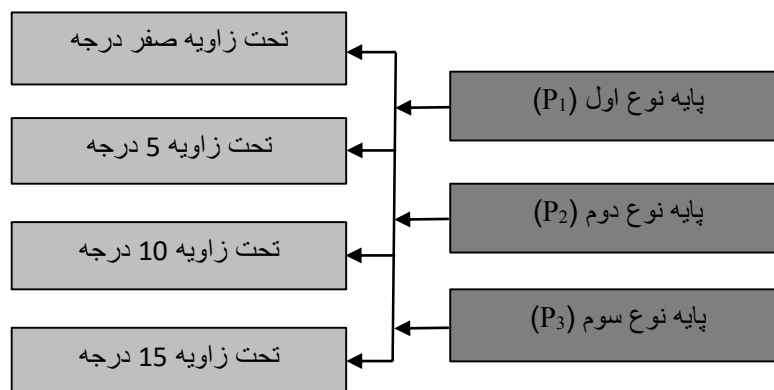
شکل ۵. پایه های مستطیلی گرد گوشه الف) نوع دوم، با کابل ۱۰٪ قطر پایه و زاویه پیچش کابل ۱۵ درجه ب) پایه نوع سوم، با کابل ۱۵٪ قطر پایه و زاویه پیچش کابل ۱۲ درجه

Fig. 5. Round corner rectangular bridge piers A) Second type pier, with cable with 10 % of pier diameter and a 15-degree twist angle of cable B) Third type pier, with cable by 15 % of pier diameter with a 12-degree twist angle of the cable

جدول ۱. مشخصات پایه های مورد آزمایش در این مطالعه

Table 1. Characteristics of the piers tested in this study

| پایه های آزمایش شده | قطر پایه (cm) | قطر کابل (قطر پایه) | زاویه پیچش کابل (درجه) |
|---------------------|---------------|---------------------|------------------------|
| P <sub>1</sub>      | ۳             | بدون کابل           | بدون کابل              |
| P <sub>2</sub>      | ۳             | ۱۰٪                 | ۱۵                     |
| P <sub>3</sub>      | ۳             | ۱۵٪                 | ۱۲                     |



شکل ۶. فلوچارت آزمایش های انجام شده در مطالعه حاضر

Fig. 6. Flowchart of the experiments performed in the present study



پایه های نوع اول ذکر خواهد شد.

- ۲- پایه مستطیلی گردگوشه با کابل ۱۰٪ قطر پایه و زاویه پیچش کابل ۱۵ درجه که در ادامه با عنوان پایه نوع دوم ذکر خواهد شد، همچنین شکل ۵-الف نمایی از پایه نوع دوم را نشان می دهد.
- ۳- پایه مستطیلی گردگوشه با کابل ۱۵٪ قطر پایه و زاویه پیچش کابل ۱۲ درجه که در ادامه با عنوان پایه نوع سوم ذکر خواهد شد. شکل ۵-ب نمایی از این پایه را نشان می دهد، در کل هر پایه برای ۴ زاویه برخورد جریان متفاوت صفر، ۵، ۱۰ و ۱۵ درجه آزمایش شد، که ۱۲ آزمایش برای این مطالعه انجام گردید.
- مطابق شکل ۶ برای پایه های نوع اول، دوم و سوم تحت زوایای برخورد جریان صفر، ۵، ۱۰ و ۱۵ درجه آزمایش ها انجام گردید.

#### ۴- نتایج و بحث

##### ۴-۱- توسعه زمانی عمق آبشستگی بر حسب زاویه برخورد جریان به پایه

برای بررسی تأثیر وجود کابل در کاهش عمق نهایی آبشستگی، میزان کاهش عمق آبشستگی در اثر وجود کابل به عمق نهایی پایه بدون کابل و به صورت درصد برای تمام آزمایش ها بیان گردیده است.

عمق آبشستگی در عمق جریان بیشتر از ۴ برابر قطر پایه می باشد، که در تحقیق حاضر نیز این مقدار لحاظ شده است [۱، ۲، ۲۵، ۲۶].

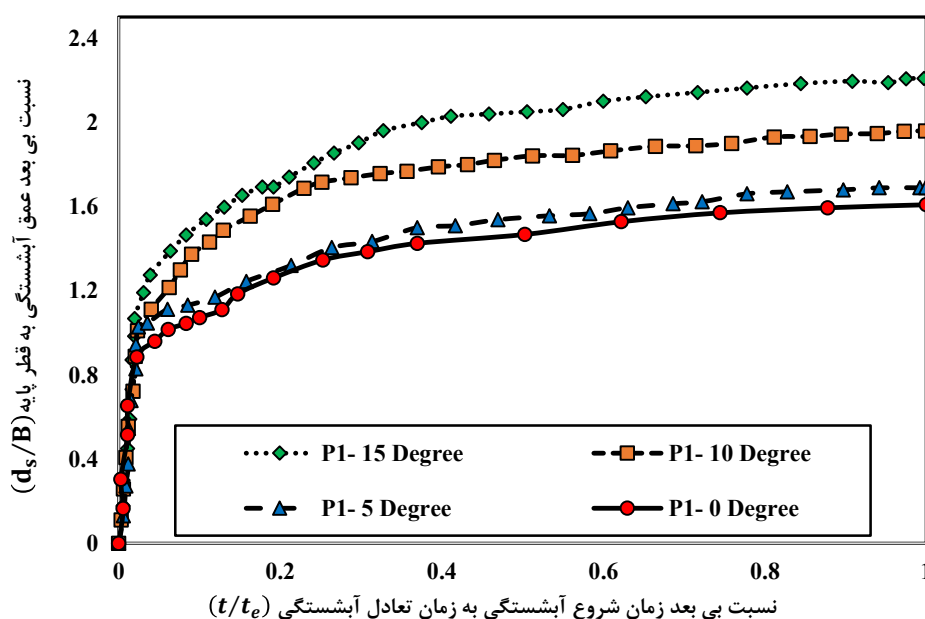
##### ۳-۲-۶- معیار زمان تعادل

رادکیوی و اتما (۱۹۸۳) در تحقیقات خود به این نتیجه رسیدند که زمان تعادل، زمانی است که تغییرات عمق آبشستگی در سه ساعت متوالی بیش از یک میلی متر نباشد. در پژوهش حاضر بیش از ۹۰ درصد عمق آبشستگی در ۸ ساعت اول اتفاق می افتد، بنابراین هر یک از آزمایش ها در مدت زمان ۸ ساعت اول انجام شده است [۲۳].

##### ۳-۳- معرفی مدل های فیزیکی و آزمایش ها

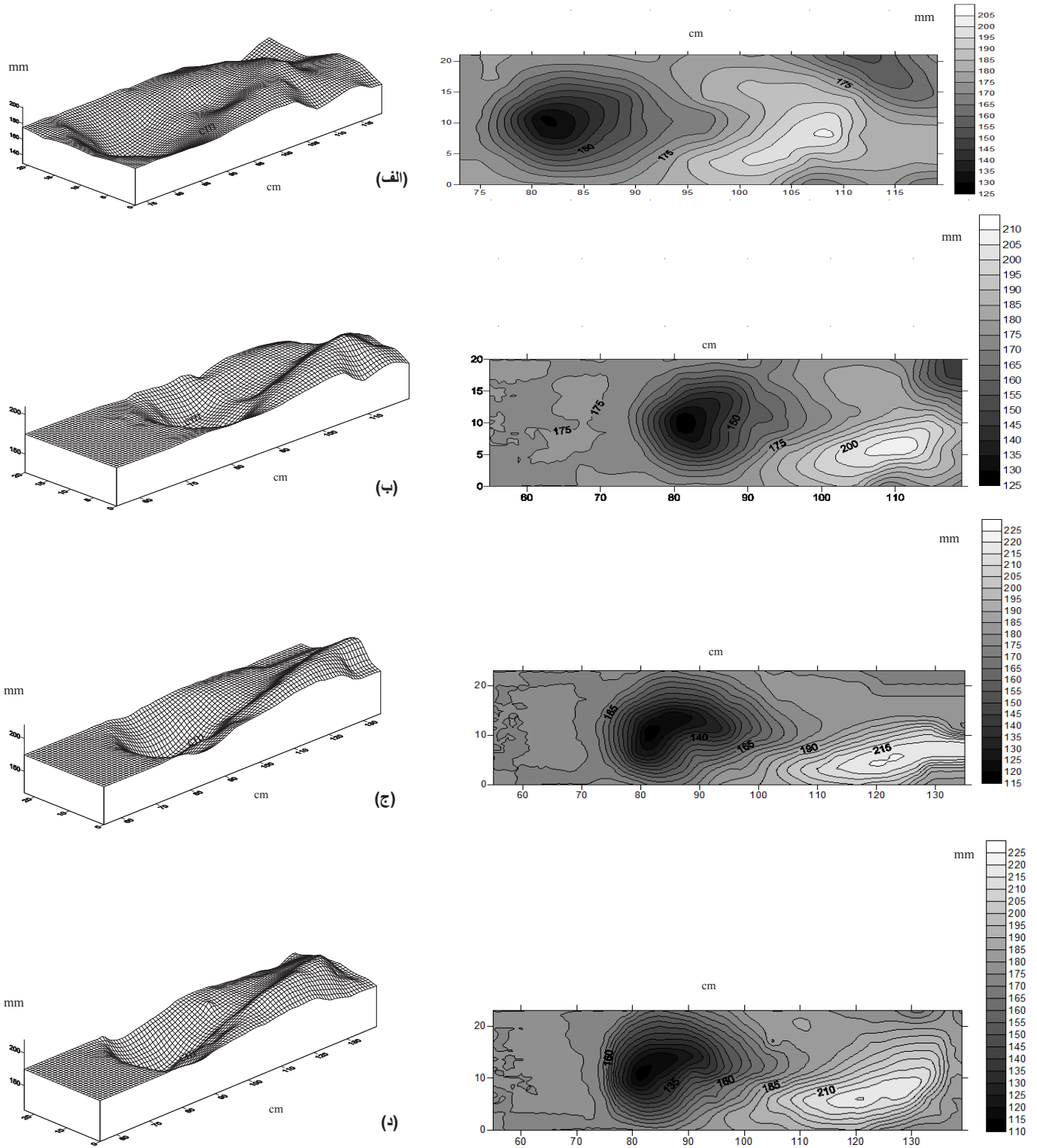
در این آزمایش ها از پایه های مستطیلی گردگوشه که از جنس تفلون ساخته شده بودند، استفاده گردید. عرض پایه مستطیل (b) ۳۰ میلی متر و طول آن b۳ در نظر گرفته شده است. دو وجه کوچک پایه مستطیل به صورت نیم دایره با شعاع ۱۵ میلی متر تراش داده شده بود و سطح پایه کاملاً صیقلی شده بود و هیچ گونه ناهمواری در آن مشاهده نمی گردید. در نهایت طول کلی پایه های مورد استفاده ۹۰ میلی متر و عرض آن ۳۰ میلی متر بود. انجام آزمایش ها مطابق شکل ۶، و پایه ها مطابق جدول ۱ به سه گروه تقسیم شدند:

۱- پایه مستطیلی گردگوشه بدون کابل، که در ادامه با عنوان



شکل ۷. توسعه زمانی آبشستگی پایه نوع اول تحت زوایای صفر، ۵، ۱۰ و ۱۵ درجه با جهت جریان

Fig. 7. Time development scour of the first type of pier under zero, 5, 10 and 15-degree angles with the flow direction



شکل ۸. توپوگرافی‌ها (سمت راست تصویر) و نمای سه بعدی (سمت چپ تصویر) آزمایش‌های پایه‌های نوع اول تحت زاویه صفر درجه، (ب) نوع اول تحت زاویه ۵ درجه، (ج) نوع اول تحت زاویه ۱۰ درجه، (د) نوع اول تحت زاویه ۱۵ درجه

Fig. 8. Topographies (right of image) and 3D view (left of image) piers experiments of A) The first type under zero degrees angle B) The first type under a 5-degree angle C) The first type under a 10-degree angle D) The first type under a 15-degree angle

عمق آبشستگی بسیار به یکدیگر نزدیک است و با تغییر زاویه برخورد جریان به پایه، تغییر زیادی حاصل نمی شود. طبق مشاهدات، این نوع پایه، تحت زوایای صفر و ۵ درجه بر هم منطبق هستند و پس از ۹۰ دقیقه از شروع آبشستگی با فاصله بسیار کمی از یکدیگر قرار گرفته اند، تا این که به زمان تعادل رسیده اند. با گذر زمان، فعالیت گرداب های برخاستگی نیز به شدت کاهش یافته، به طوری که بیشتر فعالیت های این گرداب به جابه جا کردن و حمل ذرات کنده شده توسط گرداب نعل اسبی محدود می شود.

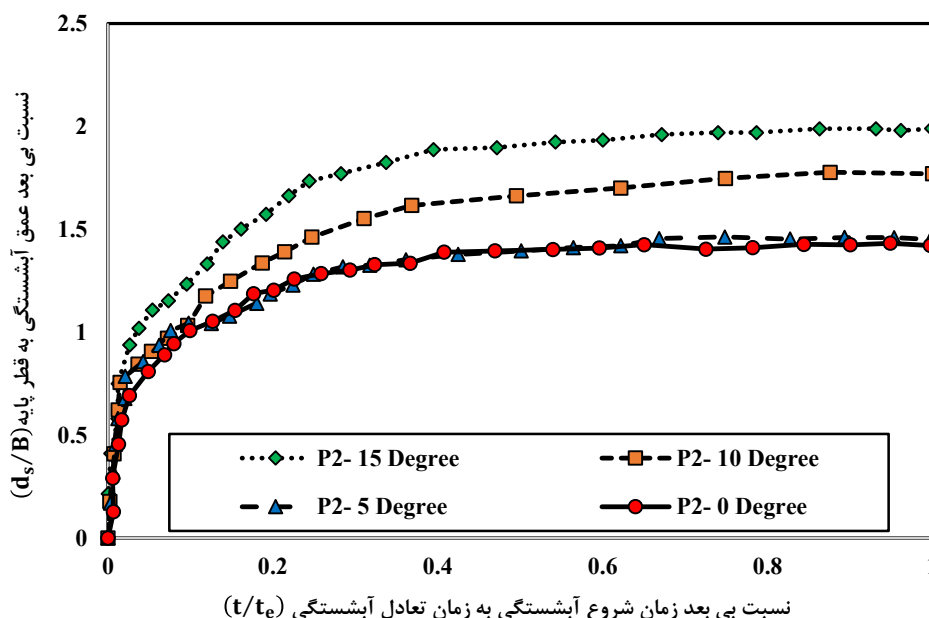
در مقایسه پایه نوع اول تحت دو زاویه ۱۰ و ۱۵ درجه در ابتدای شروع آبشستگی تفاوت بسیار ناچیز و شیب این دو منحنی تا زمان ۹۰ دقیقه پس از شروع کاملاً یکسان است. پس از زمان ۹۰ دقیقه در منحنی پایه تحت ۱۵ درجه شاهد شیب بیشتری نسبت به سایر منحنی ها بوده و همچنین هر چقدر زاویه برخورد افزایش پیدا کند، عمق آبشستگی هم دچار افزایش خواهد شد این نکته را می توان از تحقیقات ملویل و ساترلند (۱۹۸۸) نیز استنباط نمود [۲۴].

افزایش زاویه برخورد جریان به پایه باعث عریض تر شدن پایه و در نهایت افزایش قدرت گرداب نعل اسبی می شود. به همین جهت، با افزایش زاویه برخورد، میزان عمق آبشستگی نیز افزایش می یابد،

طبق برداشت های عمق نهایی، پس از پایان هر آزمایش این نتیجه حاصل شد که راندمان کابل در کاهش عمق مؤثر بوده است و با افزایش قطر کابل این تأثیر بیشتر می گردد. در حالت کلی در پایه های نوع دوم عمق نهایی آبشستگی ۹/۰۹ درصد کمتر از پایه نوع اول و در پایه نوع سوم عمق نهایی آبشستگی ۱۰/۵۹ و ۱۸/۷۲ درصد کمتر از پایه های نوع دوم و اول می باشد. در حالت مشابه مطالعه ایزدی نیا و حیدرپور (۲۰۱۲) از پایه های استوانه ای شکل تک پایه، پایه های با کابل و پایه های با شیار استفاده کردند. که بیشترین میزان کاهش آبشستگی برای پایه محافظت شده با کابل برابر ۱۳ و ۱۷ درصد به ترتیب در جلو و پشت پایه به دست آمد. مطالعه حاضر در مقایسه با تحقیقات ایزدی نیا و حیدرپور (۲۰۱۲) بهینه تر می باشد.

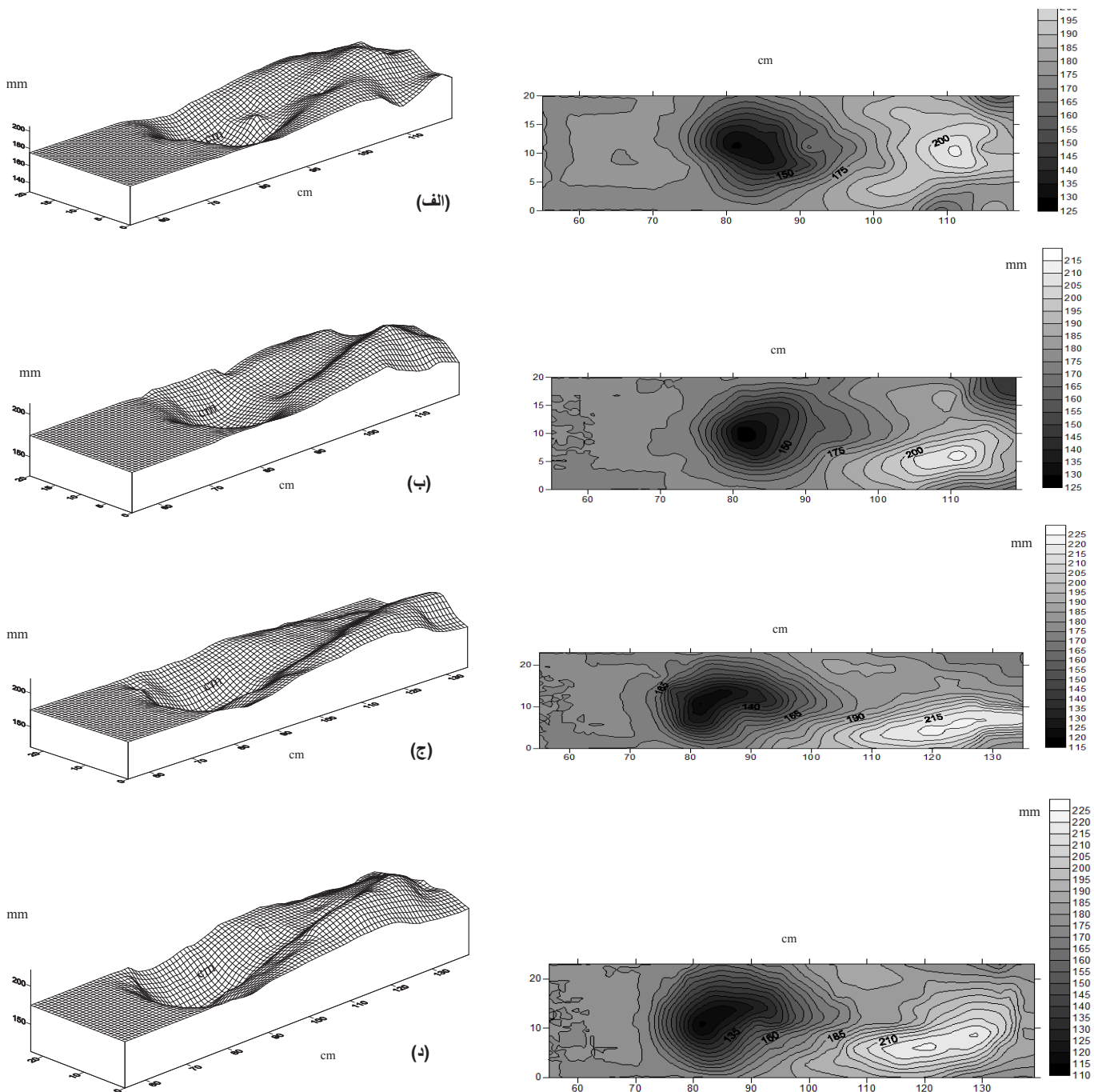
#### ۴-۱-۱- توسعه زمانی عمق آبشستگی پایه نوع اول بر حسب زاویه برخورد جریان به پایه

توسعه زمانی آبشستگی پایه نوع اول مطابق شکل ۷ تحت زوایای صفر، ۵، ۱۰ و ۱۵ درجه در جهت جریان می باشد. آنچه که از نمودار شکل ۷ استنباط می شود این است که در لحظه اول شروع آبشستگی،



شکل ۹. توسعه زمانی آبشستگی پایه نوع دوم تحت زوایای صفر، ۵، ۱۰ و ۱۵ درجه با جهت جریان

Fig. 9. Temporal development of scour the second type of pier under zero, 5, 10 and 15-degree angles with the flow direction



شکل ۱۰. توپوگرافی‌ها (سمت راست تصویر) و نماهای سه بعدی (سمت چپ تصویر) آزمایش‌های پایه‌های نوع دوم تحت زاویه صفر درجه، نوع (ب) نوع دوم تحت زاویه ۵ درجه، نوع (ج) نوع دوم تحت زاویه ۱۰ درجه، نوع (د) نوع دوم تحت زاویه ۱۵ درجه

**Fig. 10. Topographies (right of image) and 3D view (left of image) piers experiments of A) The second type under zero degree angle B) The second type under a 5-degree angle C) The second type under a 10-degree angle D) The second type under a 15-degree angle**



از مقایسه توپوگرافی های شکل ۸ پایه نوع اول تحت زوایای مختلف چنین مشاهده می شود که تغییر زاویه ی ۵ درجه ای باعث افزایش عمق آبستگي شده همچنین وسعت گودال آبستگي را نیز افزایش می دهد. از نقشه های توپوگرافی سه بعدی کاملاً مشخص است که در پایین دست پایه با تغییر زاویه، تقارن موجود از بین می رود.

### ۳-۱-۴- توسعه زمانی عمق آبستگي پایه نوع دوم بر حسب زاویه برخورد جریان به پایه

از شکل ۹ چنین به نظر می رسد که انحراف زاویه ای جهت جریان با پایه از صفر به مقدار ۵ درجه، تأثیر زیادی در عمق آبستگي نهایی ندارد. در این نمودار عمق آبستگي در لحظه اول شروع آبستگي تقریباً بر هم منطبق هستند. در دو آزمایش صفر و ۵ درجه دو منحنی از لحظه ابتدایی بر هم منطبق هستند و تا زمان رسیدن به زمان تعادل به همین ترتیب ادامه می یابد. در آزمایش ۱۰ و ۱۵ درجه همانند پایه های نوع اول تحت این زوایا، کاملاً با شیب برابر تا زمان ۹۰ دقیقه پس از شروع آبستگي ادامه پیدا می کند و پس از آن پایه تحت زاویه ۱۵ درجه شیب تندتری دارد تا اینکه در حدود ۳ ساعت پس از شروع دوباره موازی یکدیگر ادامه می یابند.

به طوری که در این تحقیق، در آزمایش ها بر روی پایه نوع اول تحت زوایای ۵، ۱۰ و ۱۵ درجه نسبت به پایه تحت زاویه صفر درجه به ترتیب افزایش عمق ۴٪، ۲۰٪ و ۳۵٪ حاصل شده است. طبق مطالعات پیشین استفاده از طوقه و صفحات مستغرق حداقل ۶۱ درصد کاهش عمق آبستگي دارند، اما برای مقایسه با مطالعه حاضر باید از مدل های مشابه و در شرایط جریان (آزمایشگاهی) یکسان استفاده گردد.

### ۲-۱-۴- توپوگرافی آزمایش پایه نوع اول تحت زوایای برخورد جریان مختلف

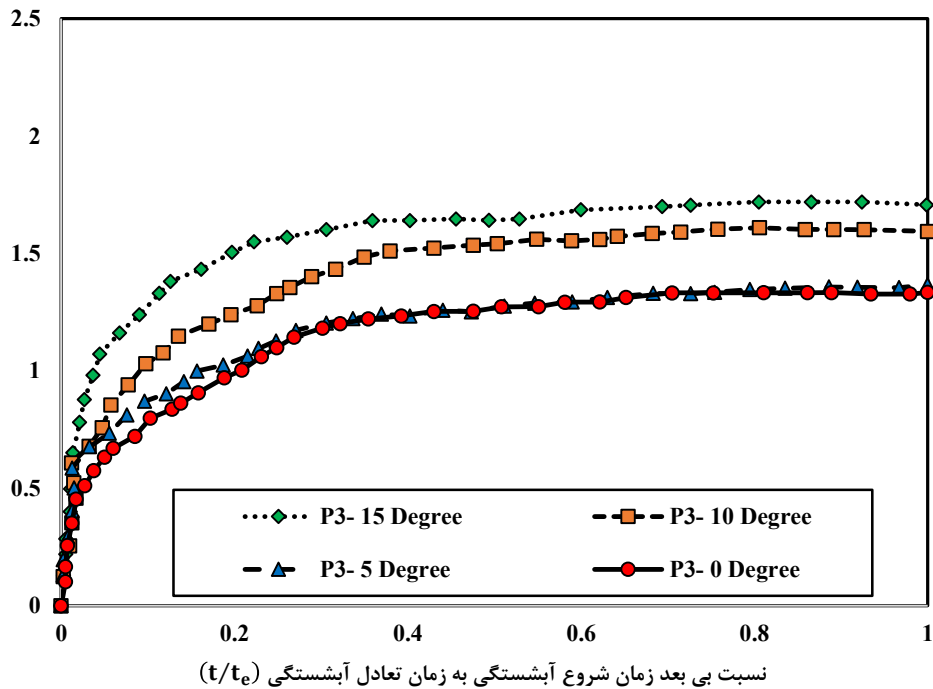
در آزمایش های تحت زاویه صفر و ۵ درجه، طول ناحیه تغییرشکل یافته در پایین دست پایه کمتر از پایه های تحت زوایای ۱۰ و ۱۵ درجه می باشد. این مسأله نشان دهنده این موضوع است که تلاطم ایجاد شده در پشت پایه در زوایای مختلف با هم متفاوت است و زمانی که زاویه نسبت به جهت جریان کم می شود طول منطقه آشفته پشت پایه نیز کاهش می یابد. در این آزمایش ها عرض حفره آبستگي با تغییر زاویه بیشتر می شود. توپوگرافی ها به آبستگي جهت مقایسه کیفی ارائه شده و برای مقایسه کمیتی از نمودارهای ۷، ۹، ۱۲، ۱۴، ۱۵، ۱۶ و ۱۷ استفاده شده است.



شکل ۱۱. عمق نهایی آبستگي پایه نوع سوم در زاویه برخورد ۱۵ درجه در موقعیت پایین دست و نحوه اعمال تغییر زاویه

Fig. 11. The final depth of the third type of scour at 15° collision angle in the downstream position and how to apply the angle collision change





شکل ۱۲. توسعه زمانی آبشستگی پایه نوع سوم تحت زوایای صفر درجه، ۵ درجه، ۱۰ درجه و ۱۵ درجه با جهت جریان

Fig. 12. Time development of scour the third type pier under zero degrees, 5 degrees, 10 degrees and 15 degrees with the flow direction

جدول ۲. درصد کاهش عمق نهایی پایه‌ها در عمق نهایی آبشستگی نسبت به پایه نوع اول در زوایای جریان مختلف (درجه)

Table 2. Percentage reduction of final depth to scour piers respect to first type depth at different flow angles (degree)

| زاویه جریان ۱۵ درجه | زاویه جریان ۱۰ درجه | زاویه جریان ۵ درجه | زاویه جریان صفر درجه | پایه‌های آزمایش شده                |
|---------------------|---------------------|--------------------|----------------------|------------------------------------|
| ۱۰                  | ۱۰                  | ۱۲                 | ۱۲                   | درصد کاهش عمق نهایی P <sub>2</sub> |
| ۲۲                  | ۱۷                  | ۱۸                 | ۱۷                   | درصد کاهش عمق نهایی P <sub>3</sub> |

جریان صفر درجه در پایه نوع دوم به ترتیب افزایش عمقی به مقدار ۳٪، ۲۱٪ و ۳۷٪ رخ داده است.

#### ۴-۱-۴- توپوگرافی آزمایش پایه نوع دوم تحت زوایای برخورد جریان مختلف

در آزمایش‌های تحت زاویه صفر و ۵ درجه، طول ناحیه تغییرشکل یافته در پایین دست پایه کمتر از پایه‌های تحت زوایای

پایه نوع دوم تحت زاویه ۵ درجه با جهت جریان نسبت به پایه نوع اول به ترتیب ۱۲٪ کاهش عمق، پایه نوع دوم تحت زاویه ۱۰ درجه با جهت جریان نسبت به پایه نوع اول دارای ۱۰٪ کاهش عمق نهایی آبشستگی و تحت زاویه ۱۵ درجه با جهت جریان بیشترین عمق آبشستگی را دارا هستند و تأثیر کابل در کاهش عمق آبشستگی برای این زاویه برای پایه نوع دوم برابر ۱۰٪ می‌باشد. در آزمایش‌های تحت زاویه ۵، ۱۰ و ۱۵ درجه نسبت به جهت

نداشته باشد و بتوان آن را مورد استفاده قرار داد. در پایه های نوع سوم که از کابل با قطر ۱۵٪ قطر پایه استفاده شده و زاویه پیچش کمتری دارد تحت زوایای ۵، ۱۰ و ۱۵ درجه نسبت به پایه تحت زاویه صفر درجه افزایش عمقی به میزان ۳٪، ۲۰٪ و ۲۷٪ را نشان می دهد، با توجه به مطالب ذکر شده پایه نوع سوم تحت زاویه ۱۵ درجه با جهت جریان افزایش عمق کمتری را نسبت به پایه نوع اول و دوم دارد. از مقایسه نمودار با دو نمودار قبلی می توان دریافت که پایه نوع سوم در کل عمق آبستنگی کمتری را ایجاد می کند. به طوری که در شکل های ۷، ۹ و ۱۲ عمق آبستنگی برای پایه نوع سوم زاویه صفر درجه به ترتیب برابر  $1.4 = \frac{d_s}{b} = 1.6$  و  $1.3 = \frac{d_s}{b}$  کاهش یافته است و این کاهش در سایر زوایا نیز قابل مشاهده است. در این مقایسه، عمق نهایی آبستنگی در پایه نوع سوم که موازی جهت جریان هستند نسبت به پایه نوع اول به ترتیب ۱۷٪ کاهش را نشان می دهد.

#### ۴-۱-۶- توپوگرافی آزمایش پایه نوع سوم تحت زوایای برخورد جریان مختلف

در آزمایش های تحت زاویه صفر و ۵ درجه، طول ناحیه تغییرشکل یافته در پایین دست پایه کمتر از پایه های تحت زوایای ۱۰ و ۱۵ درجه می باشد. با زاویه دار کردن پایه ها، تپه ها در خلاف جهت تغییر زاویه پایه ها و به سمت دیواره حرکت می کند. رنگ تیره و فاصله کم رقوم ها از یکدیگر در شکل ۱۳ نشانگر تغییر عمق (کاهش) زیاد و رنگ روشن در پایین دست پایه، افزایش ارتفاع را نشان می دهد. در این آزمایش ها با افزایش زاویه برخورد خطوط نشان دهنده رقوم به هم نزدیک تر شده و تغییر عمق بیشتر می شود. از مقایسه توپوگرافی های شکل ۱۳ پایه نوع سوم تحت زوایای مختلف جریان، چنین مشاهده می شود که تغییر زاویه ۵ درجه ای باعث افزایش عمق آبستنگی از رقوم ۱۰۰ به ۲۱۰ شده، همچنین وسعت گودال آبستنگی را نیز افزایش می دهد.

#### ۴-۲- رابطه پیشنهادی پیش بینی عمق نهایی آبستنگی

برای استخراج روابط تخمین عمق نهایی آبستنگی از آنالیز رگرسیون چند متغیره غیرخطی نتایج آزمایشگاهی با استفاده از نرم افزار SPSS استفاده شده است (SPSS Version ۲۳).

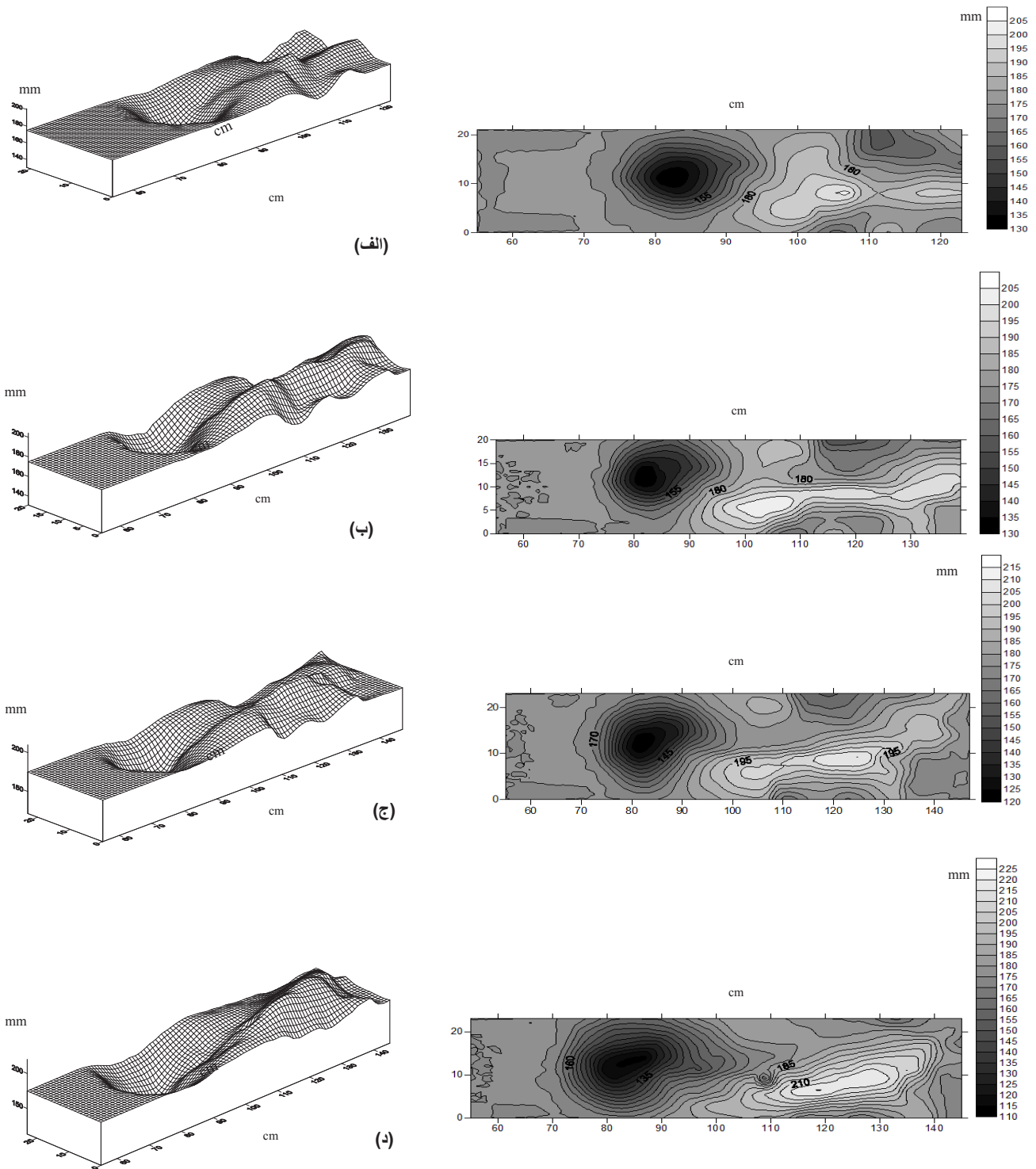
۱۰ و ۱۵ درجه می باشد. با زاویه دار کردن پایه ها تغییرات در پایین دست در خلاف جهت تغییر زاویه پایه ها جایی که سرعت جریان بطور ناگهانی کاهش می یابد، تشکیل شده است. رنگ تیره و فاصله کم رقوم ها از یکدیگر در شکل ۱۰ نشانگر تغییر عمق (کاهش) زیاد و رنگ روشن در پایین دست پایه، افزایش ارتفاع را نشان می دهد. در این آزمایش ها عرض حفره آبستنگی با افزایش زاویه، بیشتر می شود. از مقایسه توپوگرافی های شکل ۱۰ پایه نوع دوم تحت زوایای مختلف جریان، چنین مشاهده می شود که تغییر زاویه ۵ درجه ای باعث افزایش عمق آبستنگی شده همچنین وسعت گودال آبستنگی را نیز افزایش می دهد. از نقشه های توپوگرافی سه بعدی کاملاً مشخص است که در پایین دست پایه با تغییر زاویه، تقارن موجود از بین رفته و شکل منظم را تجربه نمی کند.

#### ۵-۱-۴- توسعه زمانی عمق آبستنگی پایه نوع سوم بر حسب زاویه برخورد جریان به پایه

دقیقاً مطابق شکل ۱۱ پایه های نوع اول و دوم در لحظه شروع آبستنگی، عمق آبستنگی پایه های تحت زاویه ۱۰ و ۱۵ درجه در محدوده  $0.2 = \frac{d_s}{b}$  با هم اختلاف دارند و پایه های تحت زوایای صفر و ۵ درجه نیز بجز اختلاف جزئی که قبل از محدوده مذکور، کاملاً بر هم منطبق هستند.

پایه نوع سوم تحت زاویه ۵ درجه با جهت جریان نسبت به پایه های نوع اول ۱۸٪ کاهش عمق مشاهده می شود. به همین ترتیب در آزمایش های تحت زاویه ۱۰ درجه با جهت جریان پایه های نوع سوم نسبت به پایه نوع اول دارای ۱۷٪ کاهش عمق نهایی آبستنگی هستند. تمام آزمایش ها تحت زاویه ۱۵ درجه با جهت جریان بیشترین عمق آبستنگی را دارا هستند و تأثیر کابل در کاهش عمق آبستنگی برای این زاویه پایه نوع سوم برابر ۲۲٪ می باشد. جدول ۲ درصد کاهش عمق نهایی پایه ها در عمق نهایی آبستنگی نسبت به پایه های نوع اول در زوایای جریان مختلف را نشان می دهد.

از مقایسه شکل های ۷، ۹ و ۱۲ نتیجه حاصل شد که با افزایش قطر کابل می توان عمق آبستنگی اولیه و حداکثر عمق را کاهش داد. البته این افزایش قطر باید به نحوی باشد که محدودیت اجرایی



شکل ۱۳. توپوگرافی‌ها (سمت راست تصویر) و نماهای سه بعدی (سمت چپ تصویر) آزمایش‌های پایه‌های الف) نوع سوم تحت زاویه صفر درجه، ب) نوع سوم تحت زاویه ۵ درجه، ج) نوع سوم تحت زاویه ۱۰ درجه، د) نوع سوم تحت زاویه ۱۵ درجه

Fig. 13. Topographies (right of image) and 3D view (left of image) piers experiments of A) The third type under zero degrees angle B) The third type under a 5-degree angle C) The third type under a 10-degree angle D) The third type under a 15-degree angle

۲-۳-۴- توسعه زمانی عمق آبشستگی برای پایه نوع اول، دوم و سوم

تحت زاویه ۵ درجه با جهت جریان

در این تحقیق در آزمایش ها بر روی پایه نوع اول، دوم و سوم تحت زاویه ۵ درجه نسبت به پایه تحت زاویه صفر درجه به ترتیب افزایش عمق نهایی آبشستگی ۴٪ و ۳٪ و ۳٪ مشاهده می شود.

همان طوری که که از نمودار پیداست، در لحظه شروع پدیده آبشستگی در پایه نوع سوم نسبت عمق آبشستگی در مقایسه با پایه نوع اول بسیار کمتر است، در حالی که این اختلاف در زمان تعادل کاهش یافته است. از این امر می توان چنین نتیجه گرفت که افزایش قطر کابل تأثیر بسزایی در کاهش عمق آبشستگی در لحظات اولیه دارد.

مقایسه این منحنی ها بر روی نمودار شکل ۱۴ نشان می دهد که عمق آبشستگی در این زاویه در پایه نوع اول که فاقد هرگونه کابل می باشد، به مراتب بیشتر از پایه های دارای کابل می باشد. عمق آبشستگی در پایه های نوع اول و دوم از لحظه شروع تا زمان  $\frac{t}{t_e} = 0.03$  هم نزدیک است و تقریباً با شیب یکسانی حرکت می کند و سپس از این زمان دچار تغییر شیب می شوند و از هم فاصله می گیرند.

$$\frac{d_s}{B} = a\left(\frac{t}{t_e}\right)^b + \left(\frac{P}{B}\right)^c + (a)^d + (\theta)^e \quad (6)$$

در شکل های ۱۴ تا ۱۷، روابط ارائه شده در مطالعه حاضر با داده های آزمایشگاهی مقایسه شده است.

۲-۳-۴- توسعه زمانی عمق آبشستگی بر حسب نوع پایه

۱-۳-۴- توسعه زمانی عمق آبشستگی پایه های نوع اول، دوم و سوم تحت زاویه صفر درجه با جهت جریان

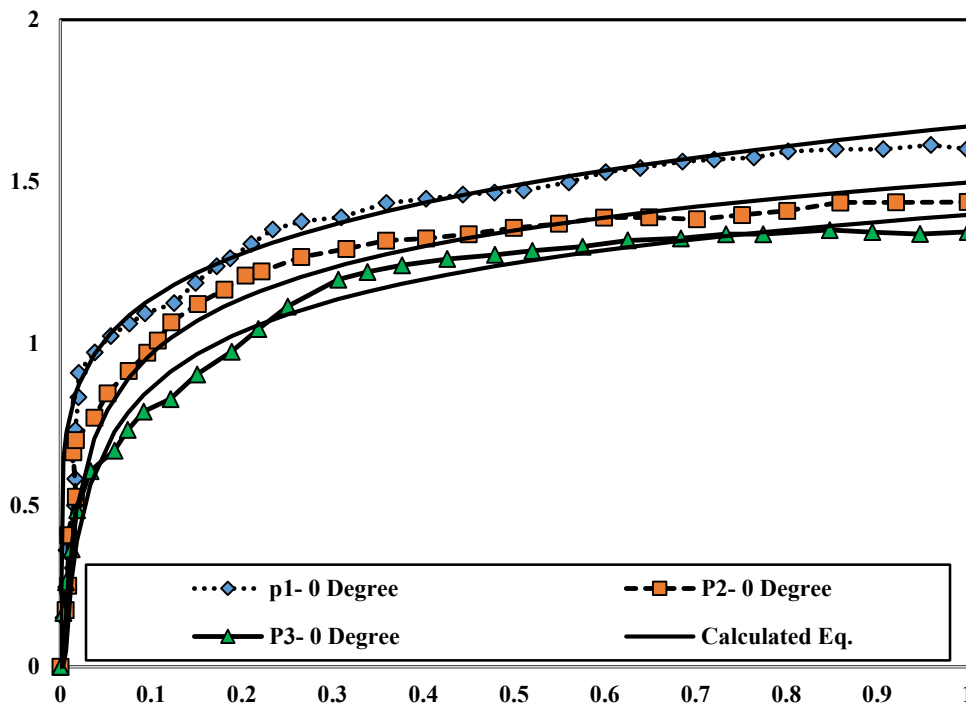
بطور معمول، افزایش زاویه برخورد جریان در پایه باعث عریض تر شدن پایه و در نهایت افزایش قدرت گرداب نعل اسبی شده و با افزایش زاویه برخورد، میزان عمق آبشستگی نیز افزایش می یابد.

در پایه نوع دوم از کابل ضعیف تر نسبت به پایه نوع سوم استفاده شده است. لذا تا زمان ۹۰ دقیقه پس از شروع آبشستگی نتایج نزدیکی با پایه نوع اول که بدون کابل می باشد، دارد. عمق آبشستگی در لحظه ابتدایی در پایه نوع سوم کمتر از پایه نوع دوم و در پایه نوع دوم کمتر از پایه نوع اول می باشد و این مسأله دقیقاً کارایی کابل را در جهت جلوگیری و کاهش جریان رو به پایین به منظور پیشگیری از افزایش عمق آبشستگی نشان می دهد.

جدول ۳. ضرایب کالیبره شده برای تخمین عمق نهایی آبشستگی برای رابطه (۶)

Table 3. Calibrated coefficients to estimate the final depth of scour for Eq. (6)

| مدل ها         | زاویه برخورد | a      | b      | c      | d      | e     |
|----------------|--------------|--------|--------|--------|--------|-------|
| P <sub>1</sub> |              | ۱/۶۷   | ۰/۱۶۷  | -      | -      | -     |
| P <sub>2</sub> | صفر          | -۲/۱۸  | -۰/۰۹۳ | -۰/۰۳۳ | -      | ۰/۳۴۶ |
| P <sub>3</sub> |              | -۲/۲۳۹ | -۰/۰۹۳ | -۰/۰۳۳ | -      | ۰/۳۸  |
| P <sub>1</sub> |              | ۱/۷۳   | ۰/۱۸۵  | -      | -۱۱/۹۱ | -     |
| P <sub>2</sub> | ۵            | -۲/۲۳۹ | -۰/۰۹۳ | -۰/۰۳۳ | ۰/۰۱۵  | ۰/۱۷  |
| P <sub>3</sub> |              | -۲/۲۳۹ | -۰/۰۹۳ | -۰/۰۳۳ | ۰/۰۱۵  | ۰/۱۷  |
| P <sub>1</sub> |              | ۲      | ۰/۱۴   | -      | -۱۱    | -     |
| P <sub>2</sub> | ۱۰           | -۲/۲۵  | -۰/۱۱  | -۰/۰۳  | ۰/۰۳۱  | ۰/۲۳  |
| P <sub>3</sub> |              | -۲/۲۵  | -۰/۰۹۱ | -۰/۰۳۲ | ۰/۰۱۵  | ۰/۲۳  |
| P <sub>1</sub> |              | ۲/۲    | ۰/۱۳   | -      | -۱۱    | -     |
| P <sub>2</sub> | ۱۵           | -۲/۲۴۲ | -۰/۱۱  | -۰/۰۳۱ | ۰/۰۳۵  | ۰/۲۶  |
| P <sub>3</sub> |              | -۲/۲۲  | -۰/۰۹۳ | -۰/۰۳۳ | ۰/۰۱۵  | ۰/۲۶  |



شکل ۱۴. توسعه زمانی عمق آبخستگی برای پایه های نوع اول، دوم و سوم تحت زاویه صفر درجه با جهت جریان  
**Fig. 14. Time development of scour depth for piers of first, second, and third types under zero degrees angle with the flow direction**

کم دو منحنی پایه های نوع دوم و سوم تا زمان  $\frac{t}{t_e} = 0.1$  می باشد. پایه نوع اول عمق آبخستگی بیشتری را نسبت به سایر پایه ها ایجاد می کند. با افزایش زاویه برخورد جریان به پایه، به علت افزایش عرض پایه در جهت عمود بر جریان، شدت جریان رو به پایین افزایش می یابد و به تبع آن عمق گودال نیز دچار افزایش می گردد. با افزایش زاویه برخورد جریان، چنین به نظر می رسد که کابل راندمان بیشتری پیدا می کند. شاید این مسأله به دلیل وجود کابل در وجه طولی پایه و برخورد مستقیم جریان به آن قسمت و جلوگیری کابل از تشکیل جریان رو به پایین باشد.

#### ۴-۳-۴- توسعه زمانی عمق آبخستگی برای پایه نوع اول، دوم و سوم

##### تحت زاویه برخورد ۱۵ درجه با جهت جریان

در پایه های نوع اول، دوم و سوم که از کابل با قطر ۱۵٪ قطر پایه استفاده شده و زاویه پیشگش کمتری دارد تحت زوایای ۱۵ درجه نسبت به پایه تحت زاویه صفر درجه افزایش عمقی به میزان ۳۵٪، ۳۷٪ و ۲۷/۵٪ خواهد داشت، که با توجه به مطالب ذکر شده پایه نوع سوم تحت زاویه ۱۵ درجه با جهت جریان افزایش عمق کمتری را نسبت به پایه نوع دوم و اول دارد.

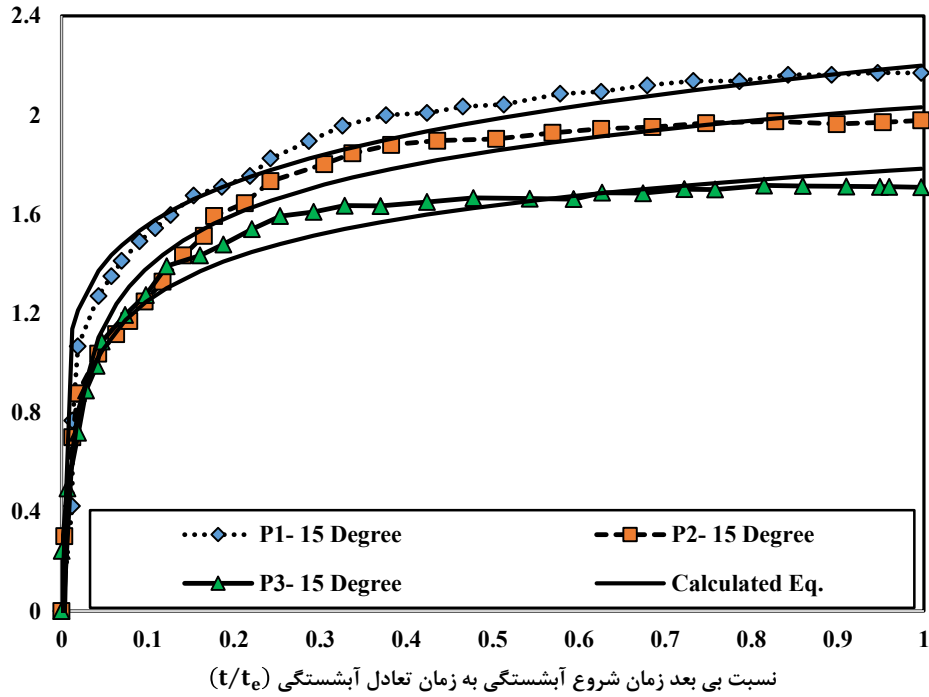
این فاصله باعث اختلاف عمق نهایی آبخستگی در این دو نوع پایه می گردد. پایه نوع سوم در ابتدا از عمیق تر شدن گودال جلوگیری می کند و اختلاف زیادی با پایه نوع اول دارد. عمق نهایی آبخستگی در پایه های نوع دوم و سوم نزدیک تر است و از پایه نوع اول فاصله بیشتری دارند. در هر سه نوع پایه در زمان  $\frac{t}{t_e} = 0.2$  حدود ۹۰٪ عمق آبخستگی ثبت شده است و پس از آن روند آبخستگی به صورت کند ادامه پیدا می کند. از مقایسه پایه های با زاویه برخورد جریان صفر و ۵ درجه (شکل های ۱۴ و ۱۵) چنین حاصل شده است که پارامتر بی بعد عمق به ترتیب پایه های نوع اول تا سوم از ۱/۳۴، ۱/۴۵ و ۱/۶ به ۱/۴۷، ۱/۵ و ۱/۶۷ افزایش یافته است.

#### ۴-۳-۳- توسعه زمانی عمق آبخستگی برای پایه نوع اول، دوم و سوم

##### تحت زاویه ۱۰ درجه با جهت جریان

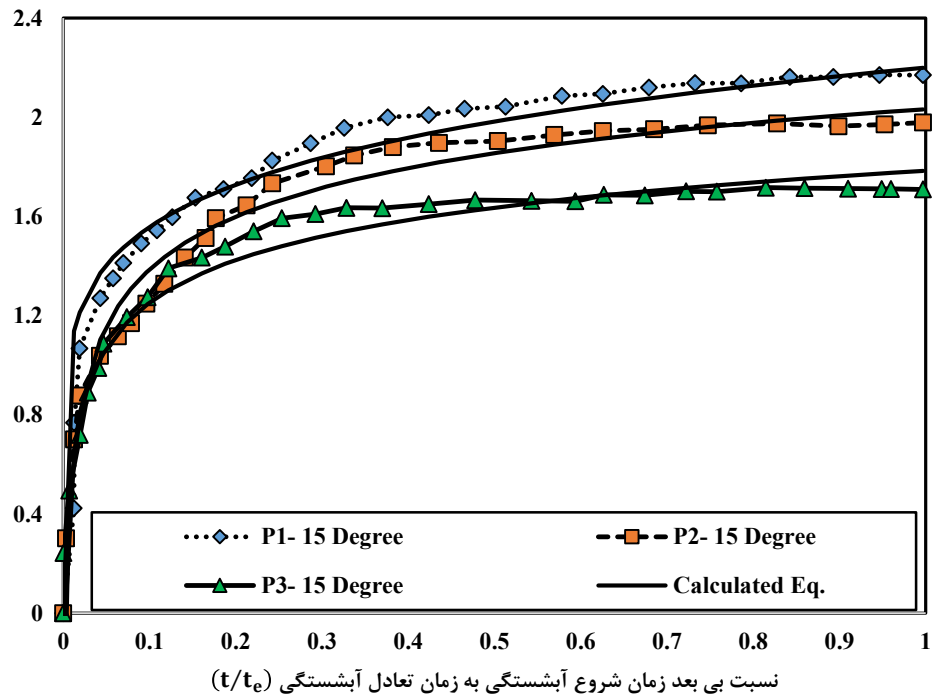
در آزمایش ها تحت زاویه ۱۰ درجه نسبت به جهت جریان در پایه نوع اول، دوم و سوم به ترتیب افزایش عمقی به مقدار ۲۰٪، ۲۱٪ و ۲۰٪ بوده، که اعداد کوچکی نیستند. آنچه که در نمودار شکل ۱۶ نسبت به دو نمودار شکل ۱۴ و ۱۵ قابل ملاحظه است، فاصله بسیار





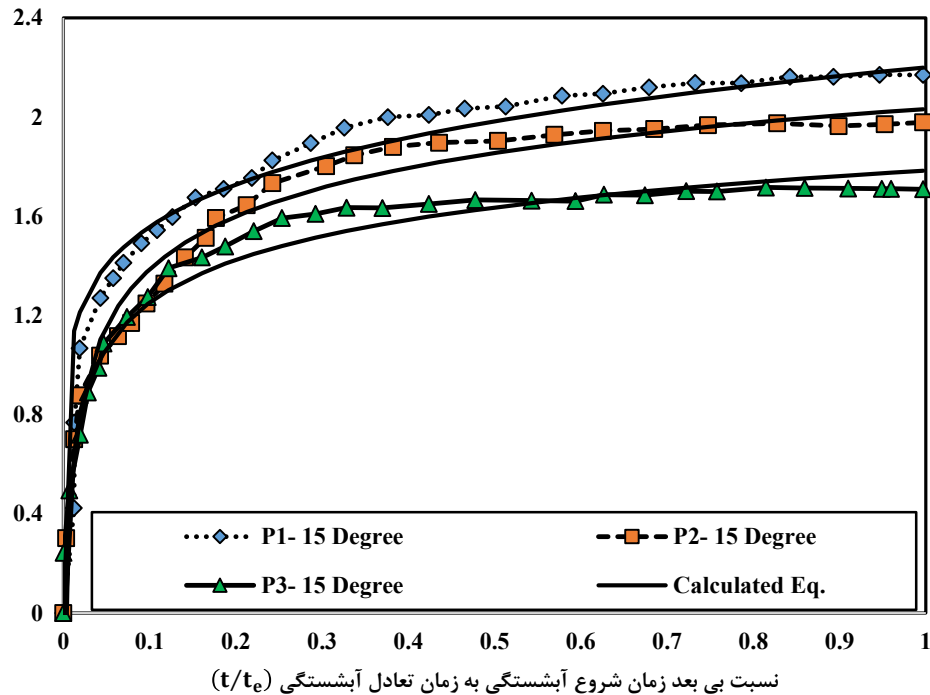
شکل ۱۵. توسعه زمانی عمق آبشستگی برای پایه های نوع اول، دوم و سوم تحت زاویه ۵ درجه با جهت جریان

Fig. 15. Time development of scour depth for piers of first, second, and third types under a 5-degree angle with the flow direction



شکل ۱۶. توسعه زمانی عمق آبشستگی برای پایه های نوع اول، دوم و سوم تحت زاویه ۱۰ درجه با جهت جریان

Fig. 16. Time development of scour depth for piers of first, second, and third types under 10-degree angle with the flow direction



شکل ۱۷. توسعه زمانی عمق آبشستگی برای پایه های نوع اول و دوم و سوم تحت زاویه ۱۵ درجه با جهت جریان

Fig. 17. Time development of scour depth for piers of first, second, and third types under 15-degree angle with the flow direction

جدول ۴. درصد افزایش عمق نهایی آبشستگی با تأثیر زوایای برخورد جریان در حالت پایه های زاویه دار نسبت به پایه با زاویه صفر درجه

Table 4. Percentage of increase of final depth of scour with collision angles of flow in angular base relative to the pier with zero degrees angle direction

| زاویه های آزمایش شده | زاویه جریان ۵ درجه | زاویه جریان ۱۰ درجه | زاویه جریان ۱۵ درجه |
|----------------------|--------------------|---------------------|---------------------|
| P <sub>1</sub>       | ۴                  | ۲۰                  | ۳۵                  |
| P <sub>2</sub>       | ۳                  | ۲۱                  | ۳۷                  |
| P <sub>3</sub>       | ۳                  | ۲۰                  | ۲۷/۵                |

با چرخش زاویه ای ۱۵ درجه ای پایه، قدرت گرداب رو به پایین و به تبع آن حجم رسوبات خارج شده از گودال افزایش می یابد و گودال آبشستگی گسترش می یابد. به طوری که ناهمواری های حاصل از برخورد جریان به پایه تا نزدیکی دیواره های فلوم گسترش می یابد.

#### ۵- نتیجه گیری

در این پژوهش، عملکرد و راندمان کابل در کنترل آبشستگی موضعی در اطراف پایه پل مستطیلی گردگوشه با تغییر در زاویه

نمودار شکل ۱۷ برای پایه های نوع دوم و سوم عمق آبشستگی در ثانیه های اولیه تا زمان  $\frac{t}{t_e} = 0.2$  را کاملاً منطبق بر هم نشان می دهد، به جز اختلاف کمی که در ابتدا مشاهده می شود. افزایش عمق گودال آبشستگی در پایه نوع دوم شاید به دلیل عدم کارایی کابل با قطر ۱۰٪ پایه در مقابل جریان رو به پایین شدید که از برخورد به وجه طولی حاصل می شود، باشد. جدول ۴ درصد افزایش عمق نهایی آبشستگی با تأثیر زوایای برخورد جریان در حالت پایه های زاویه دار نسبت به پایه با زاویه صفر درجه را نشان می دهد.

زمینه می توانند به مطالعه پایه ها با ضخامت کابل ثابت، زاویه پیچش متفاوت و همچنین زاویه برخورد جریان بیش از ۱۵ درجه پردازند.

### مراجع

- [1] Y.M. Chiew, Scour protection at bridge piers. *Journal of Hydraulic Engineering*, 1992. 118(9): p. 1260-1269.
- [2] Y.M. Chiew, Mechanics of riprap failure at bridge piers. *Journal of Hydraulic Engineering*, 1995. 121(9): p. 635-643.
- [3] V. Kumar, K.G.R. Raju, and N. Vittal, Reduction of local scour around bridge piers using slots and collars. *Journal of hydraulic engineering*, 1999. 125(12): p. 1302-1305.
- [4] A.R. Zarrati, M. Nazariha, and M. Mashahir, Reduction of local scour in the vicinity of bridge pier groups using collars and riprap. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2006. 132(2): p. 154-162.
- [5] M. Heidarpour, Z. Khodarahmi, and S. Mousavi. Control and reduction of local scour at bridge pier groups using slot. In *Proceedings, XXX IAHR Congress, Thessaloniki, Greece, August. 2003.*
- [6] M. Badali Mashahir, and Zarrati, A.R. Collar Performance in Reducing the Rate of Scouring of Rectangular Bridge Piers 6th International Civil. Eng. Conf., Isfahan University of Technology, 2003. 1: p. 401-408.
- [7] Z. Khodakarami, Heidarpur, M. and Afzalimehr, H. Effect of Flow Direction on the Gap Performance in the Control and Reduction of Local Scouring in the Cylindrical Group Under Clear Water Conditions. 6th International River. Eng. Conf, Chamran Univ. of Ahwaz. 2003. p. 797-804.
- [8] A.R. Zarrati, H. Gholami, and M. Mashahir, Application of collar to control scouring around rectangular bridge piers. *Journal of hydraulic research*, 2004. 42(1): p. 97-103.
- [9] A.R. Zarrati, M. Nazariha, and M. Mashahir, Reduction of local scour in the vicinity of bridge pier groups using collars and riprap. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2006. 132(2): p. 154-162.
- [10] S. Dey, B.M. Sumer, and J. Fredsøe, Control of scour at vertical circular piles under waves and current. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2006. 132(3): p. 270-279.

برخورد جریان بررسی و ارائه شده است.

براساس نتایج حاصل، با افزایش قطر کابل می توان عمق آبستگي اولیه و نهایی را کاهش داد. علت این امر، کاهش جریان رو به پایین و تضعیف گردابه های برخاستگی می باشد. با کاربرد مدل های متفاوت آزمایشگاهی به تشریح نحوه ی آبستگي و کاهش عمق نهایی آبستگي پرداخته شده که بطور مختصر به ارائه نتایج، پرداخته شده است.

- استفاده از کابل جهت کنترل و کاهش میزان آبستگي از نظر اجرایی راحت تر از روش هایی مانند طوق و سنگ چین است و در موقعیت هایی با محدودیت فضا می تواند جانشین بسیار مناسبی برای این روش ها باشد.

- پیچیدن کابل اطراف پایه پل به قطرهای ۱۰% و ۱۵% قطر پایه و زوایای ۱۵ درجه و ۱۲ درجه عمق گودال آبستگي را به میزان قابل توجهی کاهش می دهد.

- در تمام آزمایش های انجام شده شامل پایه های نوع اول و دوم و سوم آبستگي از بالادست پل آغاز می گردد و پس از حدود ۳ ساعت به قسمت پایین دست در قسمت دماغه پایه می رسد.

- در زمان شروع آبستگي به علت وجود گرداب های برخاستگی در دو طرف پایه و ته نشین شدن رسوبات در پایین دست پایه این قسمت دچار افزایش ارتفاع می شود. به طوری که پس از سه ساعت به عمق اولیه می رسد و شسته می گردد.

- در تمام آزمایش های انجام گرفته در پایه های نوع دوم و سوم در تمامی حالات، سرعت تشکیل گودال آبستگي در مقایسه با پایه نوع اول تا حدودی کمتر می باشد.

- کاهش زاویه پیچیدن کابل به دور پایه باعث کاهش عمق آبستگي می شود. یعنی اگر گام های کابل به یکدیگر نزدیک باشد، تعداد دور کابل های موجود افزایش می یابد و این امر باعث کاهش عمق آبستگي می گردد.

- با افزایش زاویه برخورد جریان به پایه پل، میزان عمق آبستگي افزایش می یابد. تغییر زاویه بیش از ۱۰ درجه توصیه نمی گردد.

### تقدیر و قدردانی

بدین وسیله از همکاری صمیمانه معاونت پژوهشی دانشگاه آزاد واحد استهبان کمال تشکر را داریم. همچنین علاقه مندان در این

- Piers for Two in-Line Circular Columns. *Environmental Fluid Mechanics*, 2018. 18(2): p. 537-550.
- [18] M. Ebrahimi, P. Kripakaran, D.M. Prodanović, R. Kahraman, M. Riella, G. Tabor, S. Arthur, and S. Djordjević, Experimental Study on Scour at a Sharp-Nose Bridge Pier with Debris Blockage. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2018. 144(12): p. 04018071.
- [19] Z. Taheri, and M. Ghomeshi, Experimental Study of the Effect of Netted Collar Position on Scour Depth around of Oblong-Shaped Bridge Pier. *Amirkabir Journal of Civil Engineering*, 2019. 51(2): p. 257-266.
- [20] A.J. Raudkivi, *Loose Boundary Hydraulics*. 1998: CRC Press.
- [21] J. Chabert, and P. Engeldinger, Study of Scour around Bridge Piers. Rep. Prepared for the Laboratoire National d'Hydraulique, 1956.
- [22] S. Dey., *Fluvial Hydrodynamics*. 2014: Springer.
- [23] A.J. Raudkivi, and R. Ettema, Clear-Water Scour at Cylindrical Piers. *Journal of Hydraulic Engineering*, 1983. 109(3): p. 338-350.
- [24] B. Melville, and A. Sutherland, Design Method for Local Scour at Bridge Piers. *Journal of Hydraulic Engineering*, 1988. 114(10): p. 1210-1226.
- [25] R. Ettema, Scour at Bridge Piers. 1980.
- [26] H.W. Shen, V.R. Schneider, and S. Karaki, Local Scour around Bridge Piers. *Journal of the Hydraulics Division, Journal of the Hydraulics Division*, 1969. 95(6): p. 1919-1940.
- [11] H. Arvanaghi, D. Farsadizadeh, A.H. Dalir, and A.F. Fard, Determination of Rectangular Collar Dimensions for Reducing Scour Around Bridge Pier. *Journal of Water and Soil Science*, 2009. 19(1): p. 51-64.
- [12] B. Ataie-Ashtiani, Z. Baratian-Ghorghi, and A. Beheshti, Experimental investigation of clear-water local scour of compound piers. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2010. 136(6): p. 343-351.
- [13] J.Y. Lu, Z.Z. Shi, J.H. Hong, J.J. Lee, and R.V. Raikar, Temporal Variation of Scour Depth at Nonuniform Cylindrical Piers. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2011. 137(1): p. 45-56.
- [14] E. Izadinia, and M. Heidarpour, Investigation and Comparison of Efficiency of Cable and Groove in Protection against Scouring. *Irrigation Sciences and Engineering*, 2014. 37(1): p. 23-32.
- [15] P. Shojaee, D. Farsadizadeh, D.A. Hoseinzadeh, F. Salmasi, and M. Ghorbani, Application of Submerged Vanes at Cylindrical Bridge Pier as a Scour Countermeasure, *Journal of Water and Soil Science*, 2012. 22(1): p. 91-109.
- [16] C. Fael, R. Lança, and A. Cardoso, Effect of Pier Shape and Pier Alignment on the Equilibrium Scour Depth at Single Piers. *International Journal of Sediment Research*, 2016. 31(3): p. 244-250.
- [17] A. Keshavarzi, C.K. Shrestha, B. Melville, H. Khabbaz, M. Ranjbar-Zahedani, and J. Ball, Estimation of Maximum Scour Depths at Upstream of Front and Rear

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

M. Heidarpour, M. Abam, S. Abbasi, (2021). *Investigation of the Cable Performance and Efficiency in Controlling Local Scour of Rectangular Bridge Piers*. *Amirkabir J. Civil Eng.*, 53(5): 1959-1980.

DOI: [10.22060/ceej.2020.17252.6501](https://doi.org/10.22060/ceej.2020.17252.6501)

