

## آبشستگی موضعی در آرایش تک ستونی گروه پایه‌های پل

سید سعید اخروی و سعید گوهری<sup>\*</sup>

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۱۲/۱؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۴/۹)

### چکیده

با افزایش پهنای پل‌ها، برای تحمل بار سازه پل عموماً از گروه پایه به‌جای تک پایه استفاده می‌شود و به‌صورت مخصوص گروه پایه متشکل از یک ستون پایه‌ها برای نگهداری عرشه پل کاربرد فراوانی دارند. در این مطالعه، آبشستگی موضعی در گروه پایه‌های تک ستونی متشکل از چهار ردیف پایه با فاصله متفاوت بین پایه‌ها در شرایط آب زلال و برای دو دبی جریان ۲۰ و ۳۵ لیتر بر ثانیه (اثر افزایش عمق جریان در شدت جریان مشابه) مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که با افزایش عمق جریان نه تنها عمق آبشستگی افزایش می‌یابد بلکه وسعت عرضی گودال آبشستگی نیز افزایش چشمگیری داشته است. علاوه بر این، بررسی اثرات عمق نسبی جریان بر میزان آبشستگی نمایانگر ضرورت اصلاح معیار جریان عمیق گزارش شده در منابع است. نتایج آزمایش‌های گروه‌های پایه نشان‌دهنده تأثیر قابل توجه فاصله بین پایه‌ها بر آبشستگی موضعی است. افزایش فاصله بین پایه‌ها به کاهش اثرات متقابل گردابه‌های نعل‌اسبی و برخاستگی می‌انجامد و این امر سبب کاهش عمق آبشستگی و رویت گودال‌های آبشستگی در اطراف هر پایه به‌صورت تقریباً مجزا می‌شود. در پایان، نتایج با مدل‌های جامع متداول مقایسه شد. یافته‌های این پژوهش در انتخاب و جانمایی مناسب روش‌های کنترل آبشستگی کاربرد دارد.

واژه‌های کلیدی: آبشستگی موضعی، گروه پایه، عمق آبشستگی، زمان، فاصله بین پایه‌ها

۱. گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه بوعلی سینا، همدان، ایران

\*: مسئول مکاتبات: پست الکترونیکی: s.gohari@basu.ac.ir

## مقدمه

بر فرایندهای آبشستگی در مجموعه پایه‌ها مرتبط دانست. مطالعات بسیار کمی پیرامون آبشستگی موضعی در حضور گروه پایه صورت گرفته است. لنسا و همکاران (۱۷) نشان دادند که عمق آبشستگی اطراف یک گروه پایه استوانه‌ای در زمان  $t$ ، در یک کانال مستطیلی و در شرایط آب زلال به پارامترهای بی‌بعد ذکر شده در رابطه ۱ وابسته است. در رابطه ۱،  $d_s$  عمق آبشستگی،  $b$  قطر پایه،  $u$  سرعت متوسط جریان در بالادست پایه،  $u_c$  سرعت آستانه حرکت رسوبات،  $d_{50}$  قطر میانه ذرات رسوب،  $h$  عمق جریان در بالادست پایه و  $\sigma_g$  انحراف معیار هندسی ذرات است. بنابراین، تخمین حداکثر عمق آبشستگی در یک گروه پایه به دلیل اثرگذاری پارامترهای مذکور دارای پیچیدگی فراوانی است:

$$\frac{d_s}{b} = \varphi \left( \frac{h}{b}; \frac{u}{u_c}; \frac{b}{d_{50}}; \frac{ut}{b}; \frac{s}{b}; \sigma_g; \theta; m; n \right) \quad (1)$$

پژوهشگران در بررسی میدان جریان در اطراف گروه پایه‌ها، اثرات متقابل برهمکنش گردابه‌های ایجاد شده در اطراف هر پایه (شامل نعل‌اسبی و برخاستگی) با پایه‌های دیگر را مهم‌ترین عامل مؤثر بر عمق آبشستگی در گروه پایه عنوان کردند (۱) و (۳). سلیم و جونز (۲۸) و امینی و همکاران (۱) مشاهده کردند که با افزایش میزان فاصله بین پایه‌ها، تأثیر پایه‌ها بر یکدیگر کمتر شده و حداکثر عمق آبشستگی در گروه پایه کاهش یافته است. کشاورزی و همکاران (۱۴) در بررسی ساختار جریان و آبشستگی موضعی در پایه‌های تکی و گروه پایه دوتایی مشخص کردند که اثر متقابل دو پایه با فاصله کم روی یکدیگر باعث تشدید فرایند آبشستگی در فاصله بین دو پایه و محل پایه دوم شده است. نتایج بررسی معمار و همکاران (۲۲) در مورد اثر زاویه برخورد جریان با گروه پایه دوتایی نشان داد که افزایش زاویه قرارگیری پایه‌ها نسبت به جهت جریان سبب افزایش عمق و زمان تعادل آبشستگی در پایه‌ها می‌شود. همچنین، عمق تعادل آبشستگی در جلو پایه‌ها، برای زوایای کوچک‌تر و مساوی ۲۸ درجه در پایه بالادست رخ می‌دهد، درحالی که برای زوایای بزرگ‌تر از ۲۸ درجه به پایه پایین‌دست منتقل می‌شود. عطایی - آشتیانی و بهشتی با ارائه فاکتور

آبشستگی موضعی در اطراف سازه پایه پل با تضعیف پی پل سبب ناپایداری و شکست احتمالی پایه می‌شود. از لحاظ هیدرولیکی، قرارگیری سازه پل به‌عنوان یک مانع در مسیر جریان با تغییر در میدان جریان سبب افزایش سرعت جریان و تنش برشی بستر شده که به فرسایش رسوبات در نواحی پایه پل می‌انجامد. اثرات ترکیبی الگوی کاملاً سه‌بعدی جریان و توسعه آبشستگی با زمان سبب پیچیدگی فراوان بررسی این پدیده و ارزیابی دشوار اثر پارامترهای مؤثر بر آبشستگی شده است (۱۸).

پژوهشگران متعددی به بررسی آبشستگی موضعی پیرامون تک‌پایه پل در رسوبات یکنواخت پرداختند. نتایج آنها سبب تفسیر میدان جریان و الگوی آبشستگی اطراف پایه پل شده است. گزارش‌های کاملی توسط پیشگامان این زمینه در علم هیدرولیک در سالیان متمادی ارائه شده است و معادلات مختلفی برای تخمین عمق آبشستگی توسعه یافته است (۱۹، ۲۱ و ۲۶). معادلات توسعه یافته با ساختارهای متنوع با دربرگیری شکل و نحوه قرارگیری پایه و شرایط مختلف جریان و رسوب به تخمین حداکثر عمق آبشستگی در تک پایه پل می‌پردازند. لازم به ذکر است که با توجه به پیچیدگی و تنوع پارامترهای اثرگذار بر میزان آبشستگی، تمامی معادلات ارائه شده تخمین مشابهی از میزان عمق آبشستگی در یک شرایط خاص را ارائه نمی‌کنند (۱۱).

برای پل‌های عریض عموماً از گروه پایه‌ها برای تحمل بار عرشه پل و تقسیم وزن پل استفاده می‌شود. گروه پایه‌های پل به‌صورت ترکیبی با تعداد ردیف ( $m$ ) و ستون ( $n$ ) از پایه‌ها مشخص می‌شوند. فاصله پایه‌ها (از مرکز پایه به مرکز پایه مجاور،  $s$ ) و زاویه قرارگیری آنها نسبت به جهت جریان ( $\theta$ ) از مهم‌ترین پارامترهای اثرگذار بر آبشستگی موضعی اطراف گروه پایه هستند. سازوکار آبشستگی در گروه پایه به میزان قابل توجهی از تک‌پایه پیچیده‌تر بوده که دلیل آن را می‌توان با اثرات متقابل گردابه‌های ایجاد شده در اطراف هر پایه و تأثیرات آن

تک پایه و گروه‌های پایه و ۵) مقایسه نتایج آزمایش‌های آبخستگی در گروه‌های پایه با معادلات جامع توسعه‌یافته در تحقیقات ملویل و کلنن (۲۱)، ریچاردسون و دیویس (۲۷) و شپرد و رنا (۲۹) صورت گرفته است.

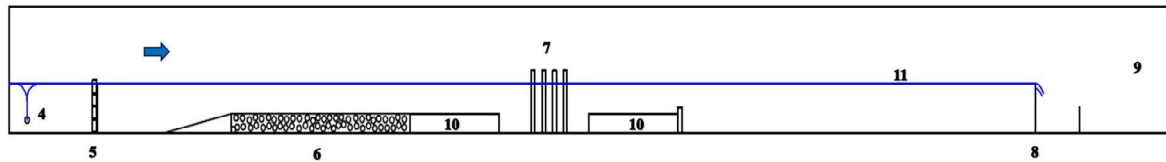
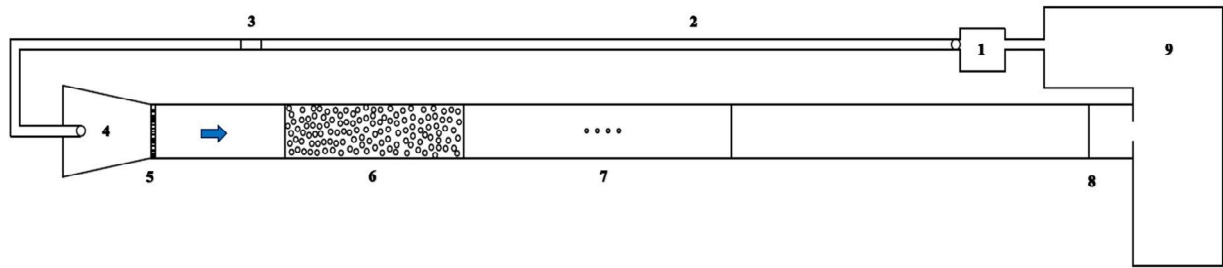
### مشخصات آزمایش‌ها

پژوهش حاضر در آزمایشگاه هیدرولیک گروه مهندسی آب در دانشگاه بوعلی سینا همدان انجام گرفته است. فلوم آزمایشگاهی موجود از جنس شیشه و کف پلکسی گلاس به طول ۱۰/۵، عرض و ارتفاع ۰/۵ متر و با شیب ۰/۰۰۲ بود. به منظور ثبت و تنظیم دبی جریان از دبی‌سنج اولتراسونیک با دقت  $\pm 0.5$  لیتر بر ثانیه استفاده شد. محل انجام آزمایش (محل پایه‌ها) در فلوم به طول ۳ متر و ارتفاع رسوب ۱۵ سانتی‌متر به فاصله ۴/۵ متری از محل ورودی جریان قرار گرفت. به منظور استهلاک انرژی جریان در ورودی، کاهش طول منطقه ورودی و ایجاد لایه مرزی توسعه‌یافته، محل ورودی به شبکه لانه‌زنبوری و منطقه ورودی جریان نیز به سنگ‌چین (طول ۲ متر) مجهز شدند. شکل ۱ طرح فلوم و منطقه انجام آزمایش‌های آبخستگی را نشان می‌دهد.

در پژوهش حاضر، تمامی آزمایش‌های تک‌پایه و گروه پایه با پایه‌های استوانه‌ای به جنس تفلون با قطر ۴ سانتی‌متر انجام شد. دلیل انتخاب میزان قطر مذکور، معیار ملویل و سودرلند (۱۹) برای حصول اطمینان از عدم تأثیر دیوارهای جانبی بر جریان اطراف پایه بود ( $b < 0.12B$ ،  $B$  عرض فلوم است). همان‌طور که گفته شد، آزمایش‌های حالت گروه پایه به صورت تک‌ستونی همراه با چهار ردیف پایه بوده و تفاوت آنها در فاصله پایه‌ها است. در تمامی آزمایش‌های صورت گرفته، پایه‌ها در مرکز فلوم قرار داشته و با توجه به جهت مستقیم جریان زاویه حمله جریان در این حالت صفر است و اثر این پارامتر در مجموعه آزمایش‌های مذکور حذف می‌شود. در این پژوهش، فاصله مرکز تا مرکز پایه‌ها به صورت دو، سه و چهار برابر قطر پایه تعریف شده است ( $s=2b, 3b, 4b$ ). مدل

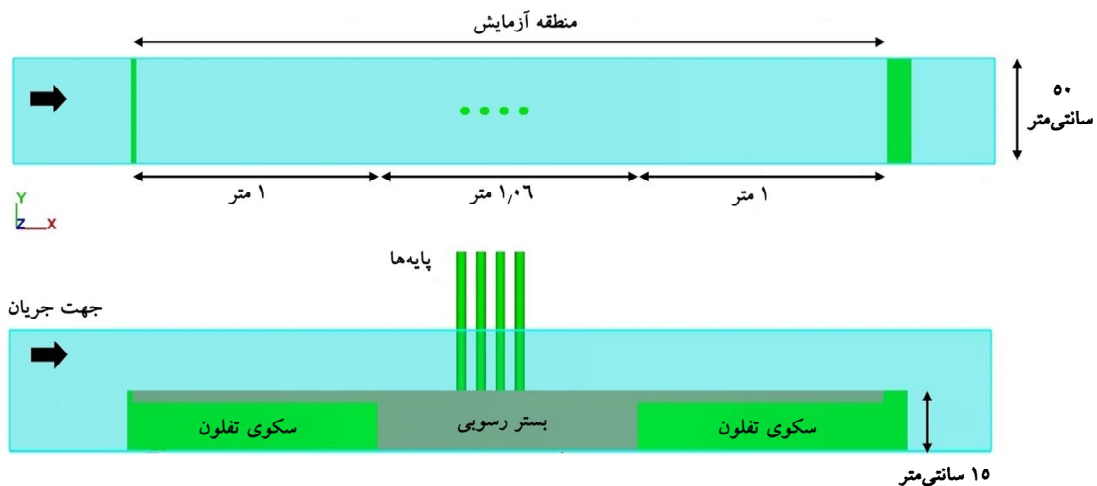
تصحیحی به هدف افزایش دقت تخمین حداکثر عمق آبخستگی در گروه‌های پایه پل مبادرت کردند (۲). همچنین پژوهشگران دیگری نیز با تکیه بر مشاهدات آزمایشگاهی به بررسی اثرات فاصله بین پایه‌ها بر تناوب ریزش گردابه‌ها پرداختند (۸). در مطالعه حاضر، آرایش پایه‌ها به صورت یک ستون ( $n=1$ ) در امتداد جریان و متشکل از چهار ردیف پایه ( $m=4$ ) است. آرایش‌های تک‌ستونی به صورت وسیع برای پوشش عرشه پل‌ها استفاده می‌شوند (۲۴). لازم به ذکر است که تمرکز تحقیقات قبلی بر حداکثر عمق آبخستگی در گروه پایه به منظور اهداف طراحی و ارائه معادلات برای تخمین عمق تعادل آبخستگی بوده است. به همین دلیل، اطلاعات کمی پیرامون عمق آبخستگی و شکل گودال آبخستگی در تمامی پایه‌ها (به ویژه پایه‌های پایین دست) موجود است. کیخایی و همکاران (۱۵)، حیدرپور و همکاران (۱۳) و دیاب و همکاران (۷) در تحقیقاتی در مورد هندسه گودال آبخستگی و روش‌های کنترل و کاهش میزان آبخستگی، وجود اطلاعات مربوط به وضعیت گودال آبخستگی در طراحی بهینه پایه‌های پل در رودخانه (به ویژه گروه پایه‌های پل) و انتخاب روش‌های مناسب مقابله با آبخستگی، جانمایی مناسب آنها و میزان گسترش تجهیزات مورد استفاده در این روش‌ها را ضروری دانستند.

بنابراین با توجه به کمبود اطلاعات آزمایشگاهی در مورد هندسه گودال آبخستگی در اطراف گروه پایه‌ها در شرایط آزمایشگاهی و اهمیت بالای آن در تعیین و جانمایی راهکارهای کاهش میزان آبخستگی، آزمایش‌های آبخستگی موضعی اطراف تک‌پایه پل و گروه پایه‌های پل در شرایط آب زلال با اهداف: ۱) بررسی تکامل زمانی حداکثر عمق آبخستگی در یکایک پایه‌های موجود در یک گروه پایه، ۲) بررسی وضعیت فرسایش و رسوبگذاری در آزمایش‌های تک‌پایه و گروه‌های پایه در حالت تعادل، ۳) بررسی اثرات فاصله بین پایه‌ها در یک گروه پایه بر عمق تعادل آبخستگی و میزان توسعه گودال آبخستگی، ۴) تعیین میزان اثرات عمق نسبی جریان بر حداکثر عمق آبخستگی و ابعاد گودال آبخستگی در



۱) پمپ و ایندوتور (۲) لوله انتقال آب (۳) دی سنج اولتراسونیک (۴) مخزن ورودی جریان (۵) شبکه آجری در ورودی جریان (۶) منطقه سنگ‌چین

(۷) محل انجام آزمایش و قرارگیری پایه‌ها (۸) دریچه تنظیم سطح آب (۹) مخزن انتهایی فلوم (۱۰) سکوهاى اطراف منطقه آزمایش (۱۱) سطح جریان

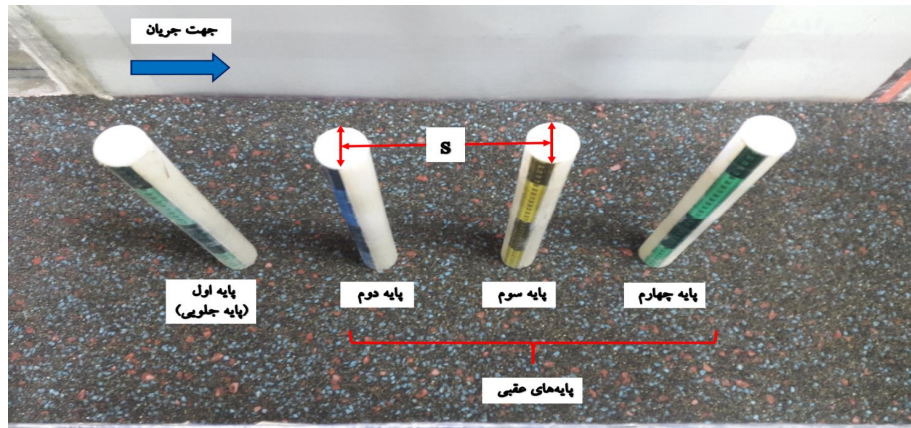


شکل ۱. طرح مشخصات فلوم آزمایشگاهی و موقعیت محل انجام آزمایش

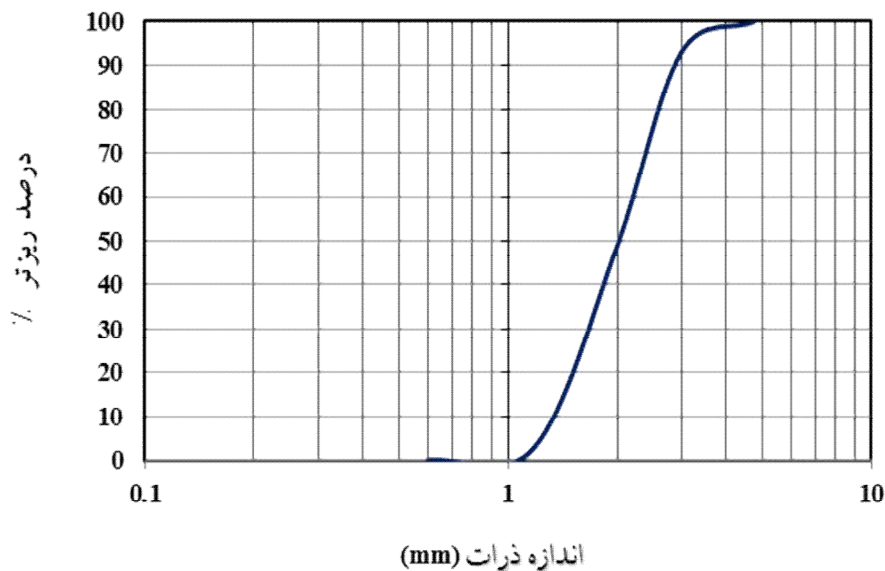
یکنواخت و در غیر این صورت غیریکنواخت در نظر گرفته می شوند (۹). علاوه بر این، اگر ضریب یکنواختی ذرات (به‌ویژه برای ماسه) کمتر از ۶ ( $C_u < 6$ ) و ضریب انحنای آنها در محدوده  $3 < C_c < 1$  باشد، توزیع اندازه ذرات به‌صورت کاملاً یکنواخت در نظر گرفته می‌شود. از آنجایی که رسوبات مورد استفاده در این پژوهش دارای ضریب یکنواختی ۱/۷۱ و ضریب انحنای ۰/۹۵ هستند، لذا می‌توان از توزیع کاملاً یکنواخت رسوبات اطمینان حاصل کرد (۲۵). نمودار توزیع اندازه ذرات رسوب در این پژوهش در شکل ۳ نشان داده شده است.

گروه پایه‌های مورد استفاده در این پژوهش در شکل ۲ نشان داده شده است.

ذرات رسوبی مورد استفاده در این پژوهش دارای اندازه متوسط ۲ میلی‌متر بوده ( $d_{50}$ ) و میزان انحراف معیار هندسی آنها نیز معادل با ۱/۴ است. معیار اصلی غیریکنواختی رسوبات با پارامتر انحراف معیار هندسی ذرات بیان می‌شود  $d_{84} \cdot \sigma_g = \sqrt{\left(\frac{d_{84}}{d_{16}}\right)}$  که ۸۴ درصد ذرات در نمودار توزیع اندازه ذرات از آنها کوچک تر هستند. زمانی که  $\sigma_g < 1.5$  باشد، رسوبات به‌صورت



شکل ۲. مدل گروه پایه مورد استفاده (یک ستون (n) در امتداد جریان به همراه چهار ردیف پایه (m) عمود بر امتداد جریان)



شکل ۳. نمودار توزیع اندازه ذرات رسوبات

مشخص شود. براساس فرایند سعی و خطا میزان عمق جریان به گونه‌ای تنظیم شد که شدت جریان ( $u/u_c$ ) در تمامی آزمایش‌ها یکسان شود ( $u/u_c=0.9$ ). همچنین برای تأیید شرایط آستانه حرکت محاسباتی، آزمایشاتی در بستر رسوبی مورد نظر و بدون حضور پایه صورت گرفت تا سرعت جریان آستانه در آزمایشگاه نیز تعیین شود. بنابراین، با توجه به ثابت شدن شدت جریان ( $u/u_c$ ) در تمامی آزمایش‌ها، افزایش دبی جریان در این پژوهش نمایانگر افزایش عمق جریان است.

$$\frac{u_c}{u_{*c}} = 5.75 \log(5.53 \frac{h}{d_{50}}) \quad (2)$$

آزمایش‌های آبستگي موضعی در این پژوهش در دو دبی جریان (Q) ماندگار و یکنواخت ۲۰ و ۳۵ لیتر بر ثانیه صورت گرفتند. به منظور تنظیم شرایط جریان در شرایط آب زلال ( $u/u_c < 1$ )، میزان عمق و سرعت جریان برای دبی جریان مشخص و دانه‌بندی تعریف شده با استفاده از معادلات توسعه یافته توسط ملویل و کلمن مورد محاسبه قرار گرفت (۲۱). در این روش به منظور تعیین سرعت آستانه حرکت ( $u_c$ )، معادله ۲ ارائه شده است. در این راستا، در ابتدا نیاز است که سرعت برشی بحرانی ( $u_{*c}$ ) بر اساس میزان  $d_{50}=2\text{mm}$  توسط معادله ۳

شکل ۴، شبکه نقاط مذکور به منظور برداشت پستی و بلندی سطح بستر رسوبات در پایان هر آزمایش مشاهده می‌شود.

در مجموع، ۸ آزمایش آبشستگی موضعی در این پژوهش به صورت ۲ آزمایش تک پایه و ۶ آزمایش گروه پایه صورت گرفته است. نتایج آزمایش‌های تک پایه در این پژوهش به عنوان مرجع برای آزمایش‌های گروه پایه هستند. وجه تمایز دو آزمایش تک پایه این پژوهش در دبی جریان متفاوت آنها (اثر افزایش عمق جریان) است. بدین منظور، شرایط جریانی تنظیمی برای دبی جریان ۲۰ لیتر بر ثانیه به عنوان شرایط ۱ و برای دبی جریان ۳۵ لیتر بر ثانیه به عنوان شرایط ۲ در جدول ۱ معرفی شده است. آزمایش‌های گروه پایه این پژوهش نیز به صورت گروه پایه‌هایی با در نظرگیری سه فاصله بین پایه‌ها متفاوت و در شرایط جریان ۱ و ۲ صورت گرفتند (مجموع ۶ آزمایش). پارامترهای معرفی کننده رسوب مورد استفاده در این مطالعه به همراه ویژگی‌های هیدرولیکی جریان برای شرایط ۱ و ۲ در جدول ۱ خلاصه شده است.

## نتایج و بحث

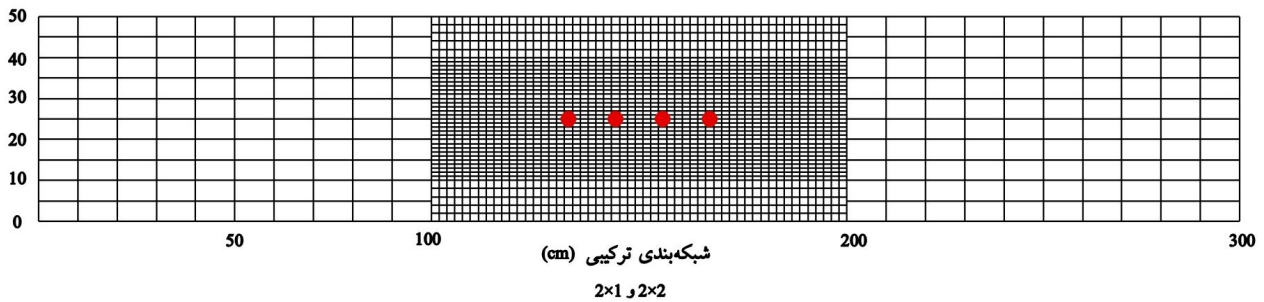
### آبشستگی در تک پایه

بر اساس مطالعاتی همچون بروسرز و همکاران (۵) و ملویل و چیو (۲۰)، توسعه زمانی حداکثر عمق آبشستگی در شرایط آب زلال به صورت مجانب گونه با زمان صورت می‌گیرد و در نتیجه زمان رسیدن به عمق تعادل آبشستگی در بی نهایت رخ می‌دهد. بنابراین به دلیل پیچیدگی‌های پدیده آبشستگی، تعیین عمق آبشستگی در یک زمان خاص دشوار است. از میان پژوهش‌های متعدد برای توصیف تکامل زمانی عمق آبشستگی در تک پایه استوانه‌ای در شرایط آب زلال، روش ملویل و کلمن جامع‌ترین معادله را برای محاسبه عمق آبشستگی در زمان‌های متفاوت ارائه می‌دهد (۲۱). در معادله معروف توسعه یافته به وسیله این پژوهشگران (معادله ۴)، تمامی پارامترهای اثرگذار بر آبشستگی موضعی در اطراف پایه پل لحاظ شده است. در معادله ۴، فاکتورهای  $K_s$ ،  $K_d$ ،  $K_I$ ،  $K_H$

$$u_{*c} = 0.0305d_{50}^{0.5} - 6.5 \times 10^{-3} d_{50}^{-1} \quad 1\text{mm} \leq d_{50} < 100\text{mm} \quad (3)$$

به منظور تنظیم مدت زمان انجام آزمایش‌های آبشستگی، از معیار اتما استفاده شد (۱۰). بر این اساس، مدت زمانی که نرخ افزایش عمق آبشستگی کمتر از یک میلی‌متر ( $\Delta d_s < 1\text{mm}$ ) در چهار ساعت متوالی باشد، به عنوان زمان تعادل آبشستگی تعریف شده است. در این راستا، آزمایشی طولانی مدت با بیش از ۲۴ ساعت به منظور تعیین زمان تعادل صورت گرفت. نتایج آزمایش ۲۴ ساعته نشان داد که بیش از ۹۰ درصد عمق آبشستگی در هشتمین ساعت از آزمایش ایجاد شده است و روند تغییرات عمق آبشستگی تا این زمان نیز با معیار اتما مطابقت داشت (۱۰). مطالعات متعددی نیز بر این حقیقت اذعان دارند که بیشتر آبشستگی در ۳-۴ ساعت ابتدایی آزمایش رخ می‌دهد (۱، ۲ و ۲۳). بنابراین، تمامی آزمایش‌ها برای دستیابی به حداکثر عمق تعادلی آبشستگی به صورت ۸ ساعته انجام شدند. با توجه به آنکه تغییرات عمق آبشستگی در ساعات اولیه زیاد است، لذا توالی اندازه‌گیری‌های عمق آبشستگی در ساعت اول به صورت هر ۵ دقیقه، ساعت دوم هر ۱۰ دقیقه و از ساعت سوم تا ساعت هشتم به صورت هر ۳۰ دقیقه انجام شد. برای اندازه‌گیری عمق آبشستگی در زمان آزمایش از یک لیمنی متر با دقت ۱ میلی‌متر استفاده شده است.

در پایان هر آزمایش نیز به منظور برداشت پستی و بلندی سطح بستر رسوبی، از یک متر لیزری مدل لایکا (Leica) D810 به ابعاد  $3 \times 5.5 \times 16.3$  سانتی‌متر و با دقت اندازه‌گیری  $\pm 1$  میلی‌متر (محصول کشور اتریش) استفاده شد. شبکه تهیه شده برای برداشت پستی و بلندی سطح بستر دارای بیش از ۲۳۰۰ نقطه است که نواحی قبل و بعد از پایه(ها) تا فاصله مشخص با شبکه ریز یک سانتی‌متری برداشت شدند تا گودال و تپه حاصل از آبشستگی با دقت مناسب ترسیم شوند. پس از محاسبات لازم بر نقاط برداشتی، از کد پایتون (Python) نوشته شده برای ترسیم نقشه پستی و بلندی‌های سطح بستر استفاده شد. در



شکل ۴. شبکه بندی بستر رسوبات محل انجام آزمایش

جدول ۱. ویژگی های رسوبی و هیدرولیکی آزمایش های آبشستگی در این پژوهش

ویژگی های رسوبات مورد استفاده در این پژوهش				ویژگی های هیدرولیکی آزمایش های آبشستگی								
				h/b	Fr	u/u <sub>c</sub>	u <sub>c</sub> (m/s)	u* <sub>c</sub> (m/s)	u (m/s)	h (cm)	Q (l/s)	پارامتر
% n (تخلخل)	d* (قطر بی بعد)	D <sub>50</sub> (mm)	پارامتر	۲/۲۵	۰/۵۱	۰/۸۹	۰/۵۵	۰/۰۴	۰/۴۹	۹	۲۰	شرایط ۱
۳۵/۵	۱/۴	۴۹	مقدار	۳/۵	۰/۴۵	۰/۹	۰/۵۹	۰/۰۴	۰/۵۳	۱۴	۳۵	شرایط ۲

با توجه به اینکه در مطالعه حاضر در هر دو شرایط جریان تعریف شده در جدول ۱، میزان h/b کمتر از ۶ بوده، بنابراین از معادله ۷ برای محاسبه t<sub>e</sub> استفاده شده است. در نهایت میزان k<sub>t</sub> برای این پژوهش و برای هر دو شرایط جریان تقریباً ۰/۹۳ محاسبه شد که نشان دهنده ۹۳ درصد توسعه عمق آبشستگی در ۸ ساعت است. بنابراین استفاده از این روش نیز همانند معیار اتما گواه بر انتخاب مناسب زمان ۸ ساعت به عنوان زمان تعادل آبشستگی در این پژوهش است (۱۰).

نتایج حاصل از دو آزمایش آبشستگی در تک پایه پل به صورت خلاصه در جدول ۲ ارائه شده است. نتایج نشان می دهد که میزان عمق آبشستگی با افزایش دبی جریان از ۲۰ به ۳۵ لیتر بر ثانیه (اثرات افزایش عمق جریان در u/u<sub>c</sub> یکسان)، حدود ۱۸ درصد افزایش یافته است. علاوه بر این، ابعاد گودال آبشستگی و میزان رسوبات شسته شده از بستر جریان در انتهای آزمایش با دبی ۳۵ لیتر بر ثانیه (شرایط ۲) از دبی ۲۰ لیتر بر ثانیه (شرایط ۱) بیشتر است که نشانگر توسعه بیشتر گودال آبشستگی در شرایط ۲ به نسبت شرایط ۱ است (جدول ۲). نتایج عمق آبشستگی مشاهداتی در انتهای آزمایش ۸ ساعته

K<sub>t</sub> و K<sub>a</sub> به ترتیب بیانگر اثر عمق نسبی جریان (h/b)، شدت جریان (u/u<sub>c</sub>)، اندازه نسبی ذرات رسوب (b/d<sub>50</sub>)، شکل پایه، زاویه قرارگیری پایه نسبت به جهت جریان و فاکتور زمان هستند. در این روش برای محاسبه هر کدام از ضرایب K معادله ای جداگانه تعریف شده است:

$$d_s / b = K_h K_I K_d K_s K_\alpha K_t \quad (4)$$

ملویل و کلمن معادله ۵ را برای محاسبه فاکتور k<sub>t</sub> تحت عنوان نرخ عمق آبشستگی در زمان t تابعی از عمق تعادل آبشستگی (t<sub>e</sub>) ارائه کردند (۲۱):

$$K_t = \exp \left\{ -0.03 \left| \frac{u_c}{u} \ln \left( \frac{t}{t_e} \right) \right|^{1.6} \right\} \quad (5)$$

در این روش، به منظور محاسبه زمان تعادل آبشستگی در شرایط آب زلال از معادلات ۶ و ۷ استفاده می شود:

$$t_e (\text{days}) = 48.26 \left( \frac{b}{u} \right) \left( \frac{u}{u_c} - 0.4 \right) \quad \frac{h}{b} > 6 \quad \frac{u}{u_c} > 0.4 \quad (6)$$

$$t_e (\text{days}) = 30.89 \left( \frac{b}{u} \right) \left( \frac{u}{u_c} - 0.4 \right) \left( \frac{h}{b} \right)^{0.25} \quad \frac{h}{b} < 6 \quad \frac{u}{u_c} > 0.4 \quad (7)$$

جدول ۲. مقایسه توسعه آبستگي در دو آزمایش تک پایه در دو دبي جریان ۲۰ و ۳۵ لیتر بر ثانیه

آزمایش تک پایه	Q (l/s)	ds t=8 h (cm)	زمانی که پس از آن ds تغییری ندارد (min)	ابعاد گودال آبستگي (x×y) (cm)	رسوبات شسته شده (kg)
شرایط ۱	۲۰	۶/۱	۴۲۰	۳۲×۲۶	۲/۲
شرایط ۲	۳۵	۷/۲	۳۹۰	۴۰×۳۰	۴/۱

جدول ۳. نتایج آزمایشگاهی گروه پایه‌های با فاصله پایه‌های متفاوت

شماره آزمایش	شرایط آزمایش	s (cm)	s/b	u/u <sub>c</sub>	h/b	ds (cm)	ds1 (cm)	ds2 (cm)	ds3 (cm)	ds4 (cm)	ks= ds1/ds
۱	شرایط ۱	۸	۲	۰/۸۹	۲/۲۵	۶/۱	۶/۱	۵/۲	۵	۴	۱
۲	شرایط ۱	۱۲	۳	۰/۸۹	۲/۲۵	۶/۱	۵/۹	۴/۵	۴/۴	۲/۸	۰/۹۷
۳	شرایط ۱	۱۶	۴	۰/۸۹	۲/۲۵	۶/۱	۵/۷	۳/۶	۳/۹	۲/۴	۰/۹۳
۴	شرایط ۲	۸	۲	۰/۹	۳/۵	۷/۲	۷/۶	۶/۴	۶/۳	۵/۵	۱/۰۵
۵	شرایط ۲	۱۲	۳	۰/۹	۳/۵	۷/۲	۷/۴	۵/۹	۵	۴/۱	۱/۰۳
۶	شرایط ۲	۱۶	۴	۰/۹	۳/۵	۷/۲	۷/۴	۵/۲	۴	۳/۴	۱/۰۳

آبستگي، گو نشان داد که معیار  $h/b$  برای جریان‌های عمیق باید اصلاح شود (۱۲). این محقق عنوان کرد که در مقادیر  $h/b > 6$ ، عمق آبستگي مستقل از اثر افزایش عمق جریان خواهد بود. با استفاده از تفاسیر گو، اثر افزایش عمق جریان بر افزایش عمق آبستگي در این مطالعه قابل قبول به نظر می‌رسد زیرا در هر دو شرایط ۱ و ۲، میزان  $h/b < 6$  است.

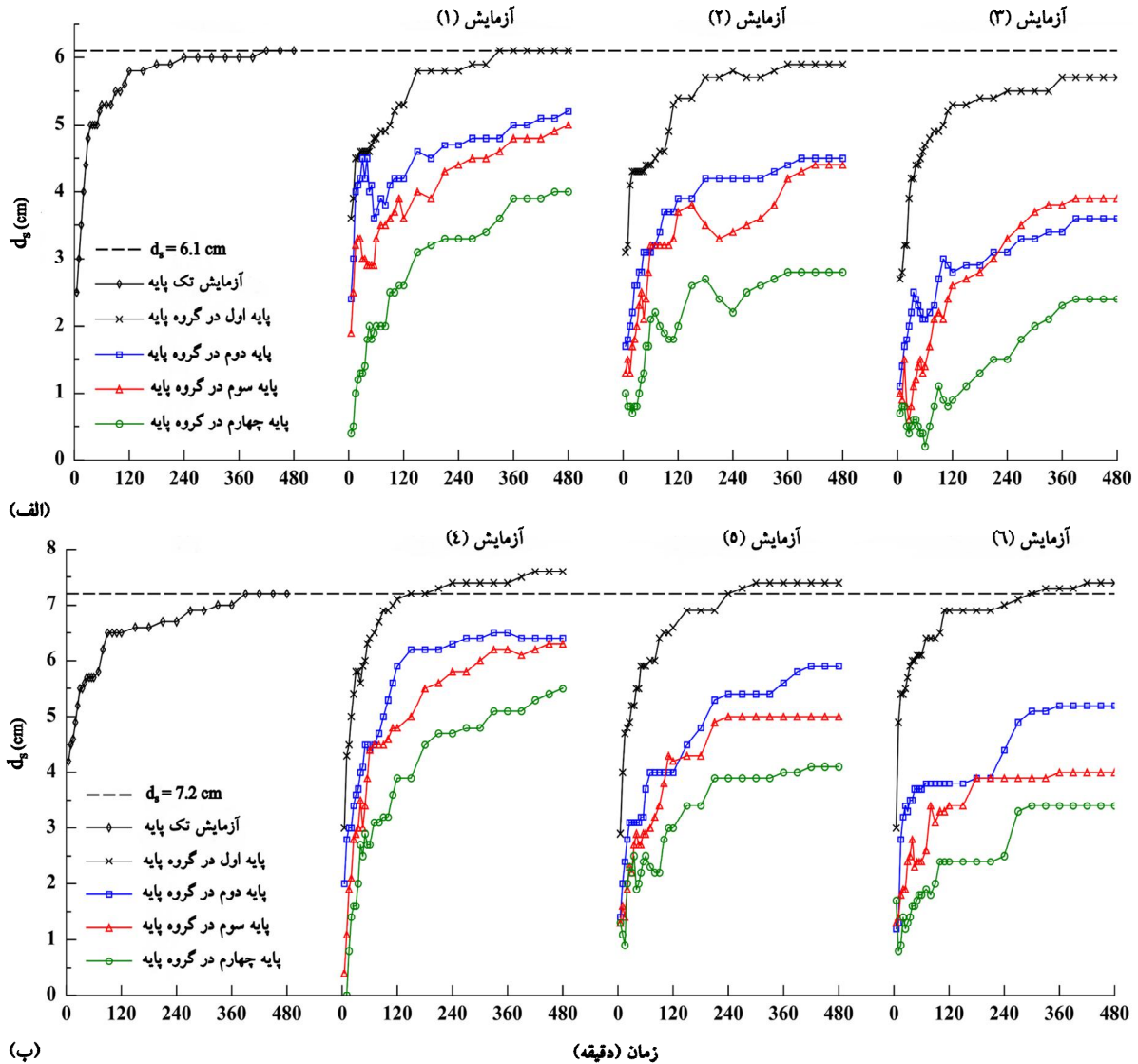
### ۲-۳- آبستگي در گروه پایه

در این بخش به بررسی تکامل زمانی عمق آبستگي در تمامی پایه‌های موجود در یک گروه پایه پرداخته شده است. همان‌طور که پیش‌تر نیز عنوان شد، ۳ آزمایش گروه پایه برای سه حالت فاصله بین پایه‌ها در شرایط جریان ۱ (آزمایش‌های ۱، ۲ و ۳) و ۳ آزمایش دیگر گروه پایه نیز با سه حالت فاصله بین پایه‌ها در شرایط جریان ۲ (آزمایش‌های ۴، ۵ و ۶) صورت گرفته است (جدول ۳). شکل ۵ نمایانگر تغییرات عمق آبستگي با زمان برای ۶ آزمایش مذکور به‌همراه آزمایش تک پایه مرجع مرتبط با شرایط خاص جریان آنها است. لازم به ذکر است که

برای تک پایه در ادامه برای تفسیر نتایج آزمایش‌های گروه پایه استفاده شده است.

برای مقایسه نتایج عمق آبستگي مشاهداتی در دو آزمایش تک پایه، شرایط آزمایشگاهی این دو آزمایش در معادله ۴ قرار داده شد تا با استفاده از این معادله عمق آبستگي پس از ۸ ساعت تخمین زده شود. میزان عمق آبستگي محاسبه شده توسط معادله ملویل و کلمن برای آزمایش تک‌پایه برای شرایط ۱ و ۲ به ترتیب ۷/۴۵ و ۷/۴۹ سانتی‌متر است. دلیل عدم تغییر محسوس در تخمین عمق آبستگي برای شرایط ۱ و ۲ توسط معادله ۴، عدم لحاظ اثر افزایش عمق جریان در فاکتور  $K_h$  است. زیرا در روش ملویل و کلمن، در مقادیر  $h/b > 1.4$ ، عمق آبستگي با افزایش عمق جریان، افزایش نخواهد یافت (معیار جریان عمیق) (۲۱). در حالی که در هر دو شرایط ۱ و ۲ میزان  $h/b > 1.4$  است، اما همچنان با افزایش عمق جریان عمق آبستگي از ۶/۱ به ۷/۲ سانتی‌متر افزایش یافته است. در تحقیقات مشابهی برای تعیین اثرات عمق جریان بر میزان



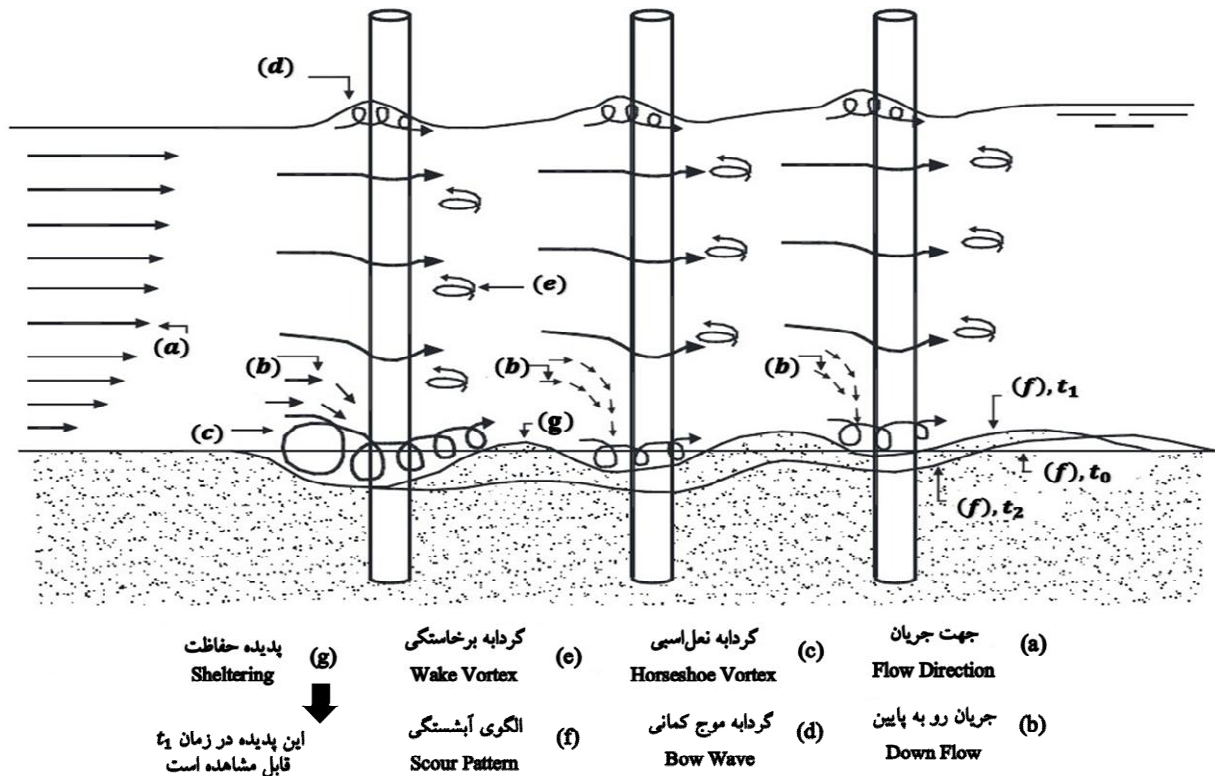


شکل ۵. منحنی توسعه زمانی عمق آبهستگی در پایه‌های موجود یک گروه پایه به همراه تک پایه مرجع آنها برای شرایط جریان:

الف و ب) ۲

همان‌طور که از شکل ۵ ملاحظه می‌شود، حداکثر عمق آبهستگی در گروه پایه همواره در پایه اول اتفاق افتاده است، زیرا پایه اول بیشترین قدرت جریان رو به پایین (downflow) را دریافت می‌کند؛ درحالی که در پایه‌های پایین دست میزان سرعت و قدرت جریان به مراتب کمتر است و دلیل این موضوع حضور پایه جلویی به‌عنوان مانع و کاهش قدرت جریان است (پایه اول عملاً نقش حفاظت کننده را ایفا می‌کند، پدیده حفاظت - Sheltering). بررسی ساختار جریان سه‌بعدی در مطالعات عطایی-آشتیانی و اصلانی-کردکنندی برای

شماره‌گذاری پایه‌ها در یک گروه پایه از بالادست به سمت پایین دست است. علاوه بر نمایش تغییرات عمق آبهستگی با زمان در ۶ آزمایش گروه پایه (شکل ۵)، مقدار حداکثر عمق آبهستگی مشاهداتی پس از ۸ ساعت به تفکیک برای هر پایه در جدول ۳ نیز به صورت دقیق ارائه شده است. حداکثر عمق‌های آبهستگی در پایه اول، دوم، سوم و چهارم به ترتیب با  $d_{s1}$ ،  $d_{s2}$ ،  $d_{s3}$  و  $d_{s4}$  مشخص شده‌اند. همچنین میزان حداکثر عمق آبهستگی در آزمایش متناظر تک پایه با  $d_s$  در جدول ۳ نشان داده شده است.

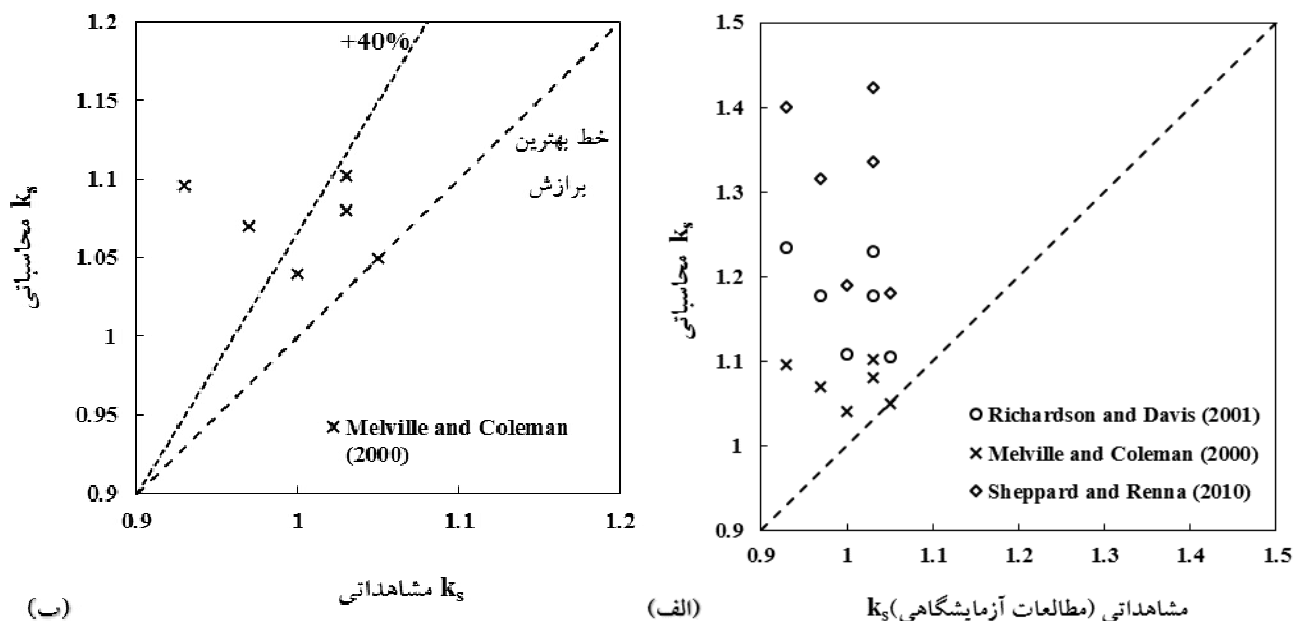


شکل ۶. ساختار جریان و الگوی آبستگی در اطراف یک گروه پایه تک ستونی با  $\theta=0^\circ$  (۱۶)

گروه پایه می‌شود (۱۴). علاوه بر این، مشاهدات آزمایشگاهی در این مطالعه نیز نشان دادند که پدیده حفاظت پایه جلویی، سبب ته‌نشین شدن رسوبات منتقل شده از اطراف پایه بالادست در بین پایه‌های پایین دست شده که با انحراف خطوط جریان از اطراف پایه‌های پایین دست سبب کاهش عمق آبستگی در آنها می‌شوند (شکل ۶). فرایند فرسایش و رسوب گذاری در آبستگی گروه پایه (تغییرات افزایشی و کاهش عمق آبستگی) به وضوح در تغییرات زمانی عمق آبستگی پایه‌های پایین دست (پایه‌های دوم، سوم و چهارم) و در هر سه حالت فاصله بین پایه‌ها در شکل ۵ مشخص است، در حالی که در پایه اول، همواره عمق آبستگی با افزایش زمان، روند افزایشی داشته است.

بنابر میدان جریان توصیف شده در اطراف یک گروه پایه تک ستونی می‌توان نتیجه گرفت که افزایش فاصله بین پایه‌ها سبب کاهش اثرات متقابل گردابه‌های نعل اسبی و برخاستگی ایجاد شده در اطراف هر پایه با پایه‌های مجاور می‌شود. در

گروه پایه‌های دوتایی نشان داده است که سرعت جریان دریافتی در پایه دوم،  $0.3-0.2$  برابر سرعت متوسط جریان بالادست است که در نهایت به کاهش عمق آبستگی در پایه دوم می‌انجامد (۳). وضعیت میدان جریان در اطراف یک گروه پایه تک ستونی به مانند گروه پایه مورد بررسی در این مطالعه در شکل ۶ نمایش داده شده است. وجود گردابه‌های نعل اسبی و برخاستگی در اطراف هر پایه و اثر متقابل آنها از پایه جلویی به پایه‌های عقبی سبب پیچیدگی میدان جریان در اطراف گروه پایه می‌شود. بهشتی و عطایی-آشتیانی (۴) و چنگ و همکاران (۶) در تحقیقاتی به بررسی ساختار جریان سه بعدی در گروه پایه‌ها پرداختند. نتایج آنها نشان داد که با کاهش سرعت جریان در پایه‌های پایین دست، قدرت گردابه‌های نعل اسبی نیز در این پایه‌ها کاهش می‌یابد. کشاورزی و همکاران نیز در بررسی ساختار جریان اطراف یک گروه پایه دوتایی نشان دادند که افزایش اثر متقابل دو پایه بر یکدیگر با کاهش فاصله بین آنها سبب افزایش وسعت گودال آبستگی و عمق آبستگی در

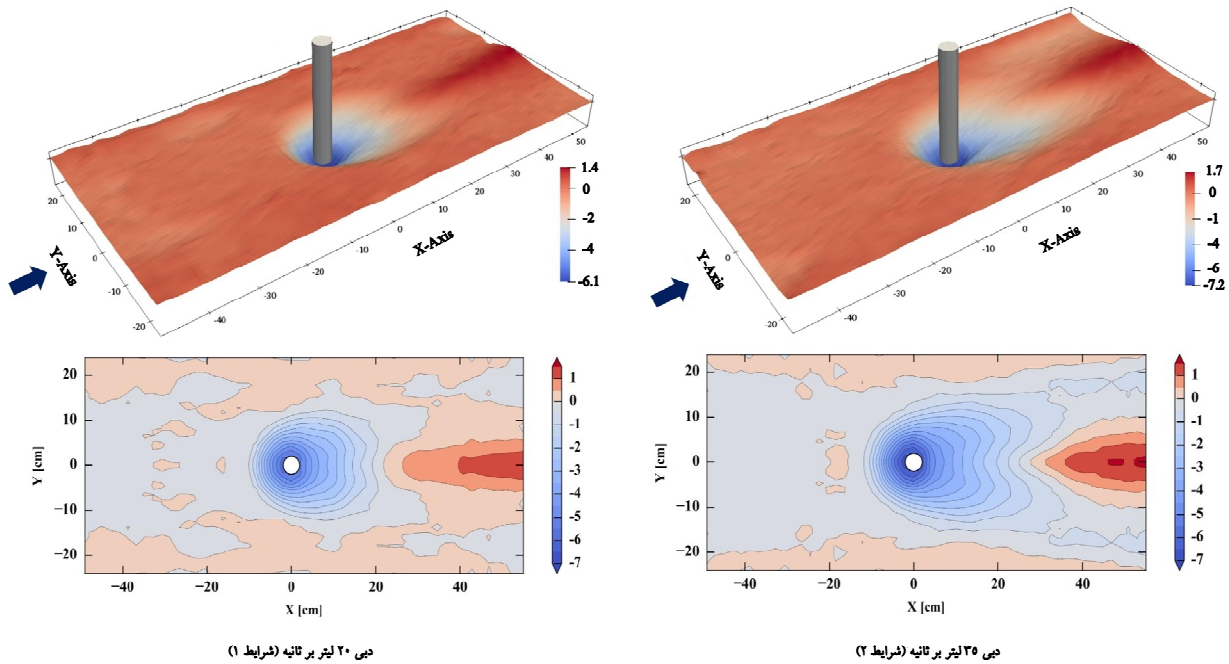


شکل ۷. مقایسه بین مقادیر  $k_s$  مشاهداتی (آزمایشگاهی) و محاسباتی به روش‌های مختلف در گروه پایه

مختلف توسط معادله ملویل و کلمن به دست آمده است (۲۱). از دلایل اصلی بیش‌برازش تخمین‌های ارائه شده برای نتایج آزمایشگاهی آن است که معادلات مذکور برای محاسبه عمق تعادل آبشستگی توسعه یافته است، درحالی که آزمایش‌های این پژوهش در ۸ ساعت به وضعیت تعادلی کامل نرسیده است (نتایج نشان داد که وضعیت آبشستگی پس از ۸ ساعت برابر ۹۳ درصد وضعیت تعادل آبشستگی است). با وجود این، دلیل برآورد بهتر نتایج مشاهداتی آزمایشگاهی در این مطالعه با معادله ملویل و کلمن، در نظرگیری پارامترهای متعدد اثرگذار بر میزان آبشستگی اعم از وضعیت جریان و رسوب در این معادله است. شکل ۷-ب نمایش دقیق‌تری از نتایج مشاهداتی و محاسباتی توسط معادله ملویل و کلمن را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود ۶۷ درصد داده‌ها در ناحیه ایجاد شده از خط بهترین برازش (خط ۴۵ درجه) و خط ۴۰ درصد بیش‌برآورد قرار گرفته است که نشان‌دهنده تخمین مناسب عمق آبشستگی در گروه پایه با استفاده از روش ملویل و کلمن است (۲۱).

نتیجه، کاهش یافتن اثرات پایه‌ها بر یکدیگر در یک گروه پایه سبب کاهش قدرت انتقال رسوبات به‌ویژه در پایه‌های پایین دست و کاهش حداکثر عمق آبشستگی در گروه پایه می‌شود. همچنین دلیل دیگر کاهش حداکثر عمق آبشستگی در یک گروه پایه با افزایش فاصله بین پایه‌ها، کاهش اثرگذاری پدیده حفاظت است.

به‌منظور مقایسه نتایج عمق‌های آبشستگی با مطالعات مشابه، پارامتر  $k_s$  به‌صورت نسبت حداکثر عمق آبشستگی در گروه پایه ( $d_{smax}$ ) در این پژوهش،  $d_{s1}$  به حداکثر عمق آبشستگی حالت تک پایه متناظر خود ( $d_s$ ) در بستر رسوبی یکسان و وضعیت جریان مشابه تعریف شده است (جدول ۳). بنابراین، نتایج مشاهداتی پژوهش حاضر با معادلات توسعه یافته از تحقیقات وسیع انجام شده توسط ملویل و کلمن (۲۱)، ریچاردسون و دیوس (۲۷) و شپرد و رنا (۲۹) مورد مقایسه قرار گرفت. بررسی نتایج در شکل ۷-الف حاکی از بیش‌برآورد میزان عمق آبشستگی توسط تمامی معادلات مذکور است. نزدیک‌ترین میزان تخمین عمق آبشستگی به نتایج مشاهداتی این پژوهش در حالت گروه پایه با فواصل



شکل ۸. نمایش پستی و بلندی سطح بستر به همراه خطوط تراز برای دو آزمایش تک پایه

رسوب گذاری در آزمایش با دبی ۳۵ لیتر بر ثانیه بعد از پایه با اختلاف فاز مکانی ۱۰ سانتی متری رخ داده است (این موضوع در شکل ۸ نیز مشخص است). زاویه ایستایی محاسباتی رسوبات در هر دو آزمایش تقریباً ۲۶ درجه است و به همین دلیل شیب قرارگیری رسوبات در بالادست پایه تقریباً مشابه است. یانماز و کاوسه معادله ۸ را برای تخمین سطح گودال آبستگي پایه استوانه‌ای ارائه کردند (۳۰):

$$A_* = \frac{A}{A_p} = 2.904(T_s)^{0.399} \quad (8)$$

در این معادله،  $A$  سطح گودال آبستگي بر حسب سانتی متر مربع،  $A_p$  سطح مقطع پایه استوانه‌ای،  $A_*$  و  $T_s$  پارامتر سطح و زمان بی بعد تعریف شده در معادله ۸ هستند. در این معادله،

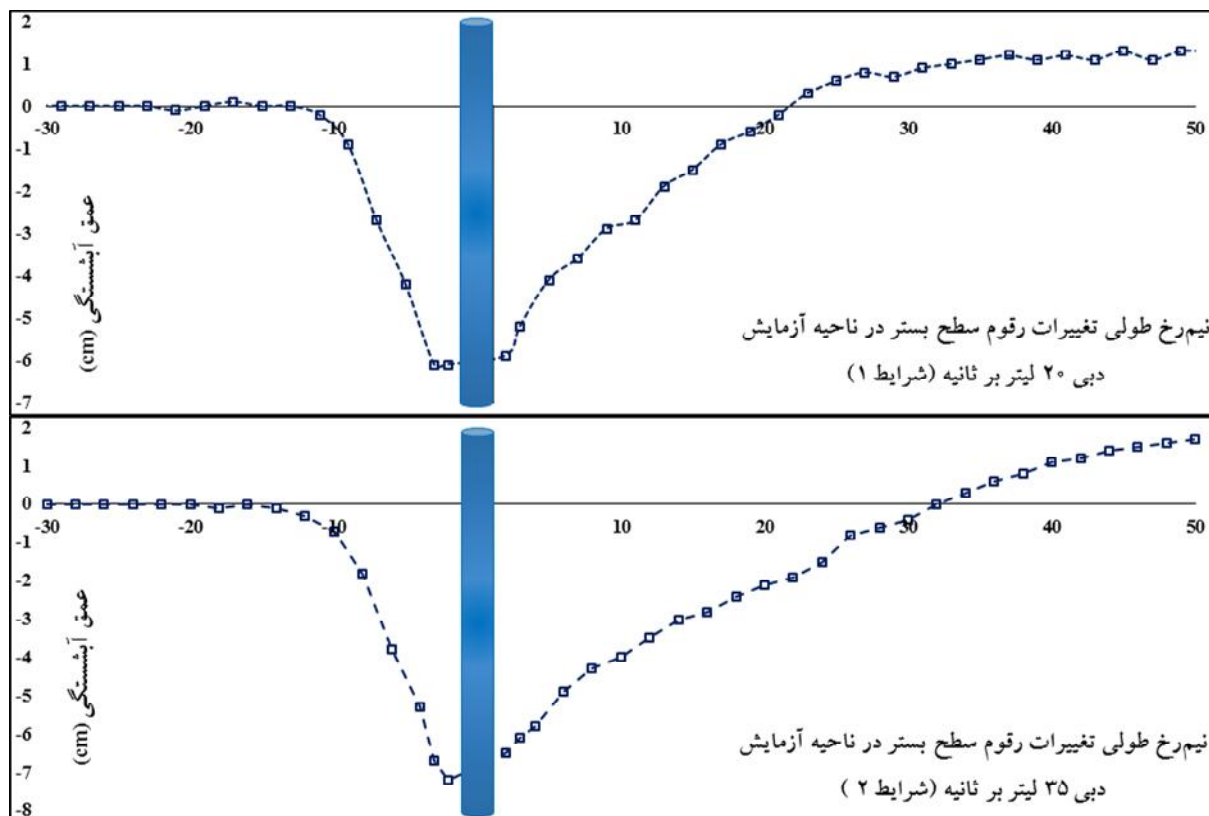
به صورت  $\frac{g d_{50}}{b^2} \sqrt{\left(\frac{\rho_s}{\rho} - 1\right)}$  تعریف شده است.  $\rho_s$  و

$\rho$  چگالی رسوبات و آب هستند. مقایسه سطح گودال آبستگي تخمینی توسط معادله ۸ با ابعاد محاسباتی طول و عرض گودال آبستگي (جدول ۲) نمایانگر تقریب مناسب این معادله برای محاسبه سطح گودال آبستگي است. به عنوان نمونه، با استفاده

### پستی و بلندی گودال آبستگي

به منظور ترسیم گودال و تپه آبستگي در مجموعه آزمایش‌های این پژوهش، پستی و بلندی سطح بستر رسوبات با شبکه‌بندی ارائه شده در شکل ۴ برداشت شد. نمایش پستی و بلندی سطح بستر در دو آزمایش تک پایه در شکل ۸ نشان داده شده است. همان‌طور که در این شکل دیده می‌شود، میزان وسعت گودال آبستگي با افزایش دبی جریان (اثر افزایش عمق جریان) افزایش یافته است. بیشترین پایین افتادگی بستر (حداکثر عمق آبستگي) و بیشترین ارتفاع برآمدگی در سطح بستر (حداکثر ارتفاع تپه) در دو آزمایش تک پایه به ترتیب (۱،۴) و (۱،۷) و (۷،۲-) برای دبی‌های ۲۰ و ۳۵ لیتر بر ثانیه برداشت شده است که به وضوح اثرات افزایش دبی و عمق جریان در شرایط یکسان شدت جریان ( $u/u_c$  مشابه) را نشان می‌دهند (شکل ۸).

برای نمایش بهتر تغییرات سطح بستر رسوبات، نیم‌رخ طولی پستی و بلندی سطح بستر در محور مرکزی فلوم ( $y=25$  cm) نیز برای این دو آزمایش ترسیم شد. همان‌طور که از شکل ۹ مشخص است، میزان عمق آبستگي در بالادست پایه برای دبی جریان ۳۵ لیتر بر ثانیه بیشتر است. همچنین به وضوح مشخص است که

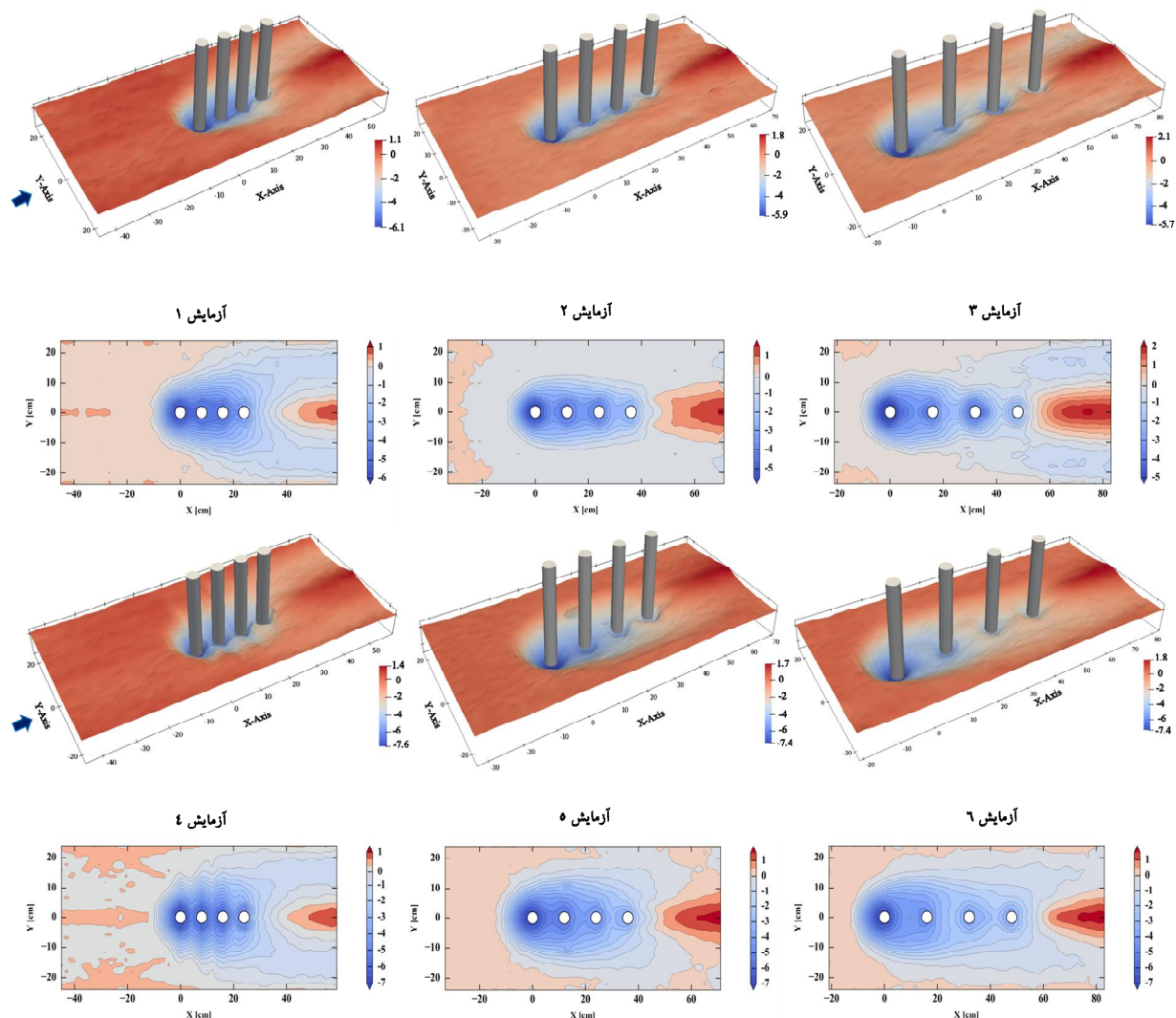


شکل ۹. نیم رخ سطح بستر رسوبات در دو آزمایش تک پایه با دبی ۲۰ و ۳۵ لیتر بر ثانیه (شرایط جریان ۱ و ۲)

انجام شده در این پژوهش نشانگر آن است که در گروه پایه‌های با فواصل ۲ و ۳ برابر قطر پایه ( $s/b=2,3$ )، تنها یک گودال آبشستگی به صورت یکپارچه برای هر چهار پایه دیده می‌شود، در حالی که در حالت  $s/b=4$ ، گودال‌های آبشستگی در اطراف هر پایه به صورت مجزا تشکیل شده است و یک گودال آبشستگی کلی بسیار کم‌رنگ دیده می‌شود (شکل ۱۰). لنسا و همکاران (۱۷) و امینی و همکاران (۱) در تحقیقاتی مجزا نشان دادند که در حالت  $s/b \leq 3$ ، اثرات پایه‌ها بر یکدیگر زیاد بوده و سبب تشکیل یک گودال آبشستگی اطراف گروه پایه خواهد شد و از این جهت با نتایج این پژوهش همسو است. همچنین، این پژوهشگران اشاره کردند که در حالت  $s/b=6$ ، اثر متقابل پایه‌ها بر یکدیگر بسیار ناچیز است. اما در پژوهش‌های پیشین اثرات افزایش عمق نسبی جریان بر میزان توسعه گودال آبشستگی بررسی نشده است. همان‌طور که پیش‌تر در مقدمه نیز توضیح داده شد، ابعاد گودال آبشستگی در

از این معادله برای آزمایش تک پایه میزان سطح گودال آبشستگی ۱۱۸۶/۹۲ سانتی‌متر مربع محاسبه شده است که به ابعاد طول و عرض مشاهداتی در آزمایش دبی ۳۵ لیتر بر ثانیه نزدیک است (سانتی‌متر مربع  $1200 = 40 \times 30$ ). البته معادله ۸ تنها با استفاده از بعد عرض یا قطر پایه، زمان و پارامترهای اصلی رسوبات به تخمین سطح گودال آبشستگی می‌پردازد و ویژگی‌های هیدرودینامیکی جریان را در نظر نمی‌گیرد.

نمایش سطح بستر رسوبات در آزمایش‌های گروه پایه در شکل ۱۰ قابل مشاهده است. شکل گودال آبشستگی در حالت گروه پایه به‌طور قابل توجهی متأثر از فاصله بین پایه‌ها است. همان‌طور که پیش‌تر نیز بیان شد، با افزایش فاصله بین پایه‌ها میزان اثرگذاری پایه‌ها بر یکدیگر کمتر شده و با کاهش یافتن اثرات متقابل گردابه‌های نعل اسبی و برخاستگی در اطراف گروه پایه، میزان عمق آبشستگی در گروه پایه نیز کاهش می‌یابد. نمایش گودال(ها) آبشستگی در آزمایش‌های گروه پایه



شکل ۱۰. نمایش پستی و بلندی سطح بستر به همراه خطوط تراز برای ۶ آزمایش گروه پایه

### نتیجه گیری

مجموعه آزمایش‌های این پژوهش به منظور بررسی اثرات فاصله بین پایه‌ها در یک گروه پایه بر عمق حداکثر آبشستگی در دو دبی جریان ۲۰ و ۳۵ لیتر بر ثانیه (اثر افزایش عمق جریان در شدت جریان مشابه،  $U/U_c$ ) انجام شد. در ادامه نتایج به صورت موردی بیان شده‌اند.

۱- بررسی نتایج نمودار توسعه آبشستگی با زمان نشان داد که همواره عمق آبشستگی در پایه جلویی بیشتر از پایه‌های عقبی است. سپس در پایه دوم و به ترتیب در پایه‌های بعدی بیشترین عمق آبشستگی مشاهده شد که نشان‌دهنده اثرات پایه جلویی و

انتخاب روش کنترل و کاهش آبشستگی بسیار تأثیرگذار است. در این راستا، مقایسه پستی و بلندی سطح بستر در زوج آزمایش‌های گروه پایه با فاصله بین پایه یکسان نشان از توسعه قابل توجه عرضی در گودال آبشستگی با افزایش عمق نسبی جریان است (آزمایش‌های ۱ با ۲، ۴ با ۵ و ۳ با ۶). بنابراین، افزایش عمق نسبی جریان نه تنها سبب افزایش در حداکثر عمق آبشستگی می‌شود بلکه با افزایش وسعت گودال آبشستگی سبب افزایش میزان انتقال رسوبات از ناحیه اطراف پایه می‌شود و این موضوع در انتخاب روش مناسب برای کنترل و کاهش میزان آبشستگی اثر مستقیم دارد.

بر یکدیگر، گودال‌های آبستگي به صورت مجزا در اطراف هر پایه دیده می‌شوند.

۵- مقایسه پارامتر  $k_s$  مشاهداتی (آزمایشگاهی) در این پژوهش با مقادیر محاسباتی با معادلات توسعه یافته «ملویل و کلمن»، «ریچاردسون و دیوس» و «شپرد و همکاران» نشانگر بیش‌برآورد میزان عمق آبستگي توسط معادلات مذکور در آزمایش‌های تک پایه است. افزایش میزان عمق آبستگي با ضریب  $1/4$  به عنوان ضریب اطمینان برای دستیابی به مرز بالایی شکل ۷- ب (توافق مناسب با نتایج روش ملویل و کلمن) برای مطالعات آینده و طراحی مطمئن پی سازه پایه پل منطقی به نظر می‌رسد.

نقش آن در کاهش سرعت و قدرت جریان است ( $d_{s1} > d_{s2} > d_{s3} > d_{s4}$ ).

۲- حداکثر عمق آبستگي در گروه پایه‌های مورد آزمایش ( $d_{smax}$ ) در شرایط جریان ۱ همواره از حداکثر عمق آبستگي تک پایه متناظر خود ( $d_s$ ) کمتر است ( $d_{smax} < d_s$ )، درحالی که در شرایط جریان ۲، این مورد برعکس ( $d_{smax} > d_s$ ) است که نشانگر اثرات افزایش دبی و عمق جریان در گروه پایه است.

۳- بیشترین میزان عمق آبستگي در گروه‌های پایه مورد بررسی و در هر دو شرایط جریان ۱ و ۲ (دبی ۲۰ و ۳۵ لیتر بر ثانیه) در حالت  $s/b=6$  رخ داده است و با افزایش میزان فاصله بین پایه‌ها، حداکثر عمق آبستگي کاهش یافته است.

۴- نمایش پستی و بلندی‌های سطح بستر در گروه پایه‌های مختلف نشان داد که با افزایش  $s/b$  و کاهش اثرات متقابل پایه‌ها

### منابع مورد استفاده

1. Amini, A., B. W. Melville, T. M. Ali and A. H. Ghazali. 2012. Clear-water local scour around pile groups in shallow-water flow. *Journal of Hydraulic Engineering* 138(2): 177-185.
2. Ataie-Ashtiani, B. and A. A. Beheshti. 2006. Experimental investigation of clear-water local scour at pile groups. *Journal of Hydraulic Engineering* 132(10): 1100-1104.
3. Ataie-Ashtiani, B. and A. Aslani-Kordkandi. 2013. Flow field around single and tandem piers. *Flow, Turbulence and Combustion* 90(3): 471-490.
4. Beheshti, A. A. and B. Ataie Ashtiani. 2010. Experimental study of three-dimensional flow field around a complex bridge pier. *Journal of Engineering Mechanics* 136(2): 143-154.
5. Breusers, H. N. C., G. Nicollet and H. W. Shen. 1977. Local scour around cylindrical piers. *Journal of Hydraulic Research* 15(3): 211-252.
6. Chang, W. Y., G. Constantinescu, H. C. Lien, W. F. Tsai, J. S. Lai and C. H. Loh. 2013. Flow structure around bridge piers of varying geometrical complexity. *Journal of Hydraulic Engineering* 139(8): 812-826.
7. Diab, R., O. Link and U. Zanke. 2010. Geometry of developing and equilibrium scour holes at bridge piers in gravel. *Canadian Journal of Civil Engineering* 37(4): 544-552.
8. Elhimer, M., G. Harran, Y. Hoarau, S. Cazin, M. Marchal and M. Braza. 2016. Coherent and turbulent processes in the bistable regime around a tandem of cylinders including reattached flow dynamics by means of high-speed PIV. *Journal of Fluids and Structures* 60: 62-79.
9. Eshaghian, M., S. Gohari and S. Okhravi. 2020. Single bridge pier scour in uniform and non-uniform sediment beds under steady and unsteady flow. *Journal of Hydraulics* 14(4): 19-33. (In Farsi)
10. Ettema, R. 1980. Scour at bridge piers. Ph.D. Thesis, Department of Civil Engineering, University of Auckland.
11. Gaudio, R., A. Tafarojnoruz and S. De Bartolo. 2013. Sensitivity analysis of bridge pier scour depth predictive formulae. *Journal of Hydroinformatics* 15(3): 939-951.
12. Guo, J. 2012. Pier scour in clear water for sediment mixtures. *Journal of Hydraulic Research* 50(1): 18-27.
13. Heidarpour, M., H. Afzalimehr and E. Izadinia. 2010. Reduction of local scour around bridge pier groups using collars. *International Journal of Sediment Research* 25(4): 411-422.
14. Keshavarzi, A., H. Hamidifar and L. Khajehouri. 2019. Mean flow structure and local scour around single and two-column bridge piers. *Irrigation Sciences and Engineering* 42(4): 75-90. (In Farsi)
15. Keykhee, M., M. Heidarpour and S. F. Mousavi. 2009. Investigation of riprap pattern in the vicinity of bridge piers group. *Journal of Water and Soil Science* 13(49): 13-29. (In Farsi)

16. Lança, R. 2013. Clear-water scour at single piers and pile groups. Ph.D. Thesis. Department of Engineering, Universidade Da Beira Interior.
17. Lança, R., C. Fael, R. Maia, J. P. Pêgo and A. H. Cardoso. 2013. Clear-water scour at pile groups. *Journal of Hydraulic Engineering* 139(10): 1089-1098.
18. Laursen, E. M. and A. Toch. 1956. Scour Around Bridge Piers and Abutments (Vol. 4). Ames, IA: Iowa Highway Research Board, Bureau of Public Roads, Iowa.
19. Melville, B. W. and A. J. Sutherland. 1988. Design method for local scour at bridge piers. *Journal of Hydraulic Engineering* 114(10): 1210-1226.
20. Melville, B. W. and Y. M. Chiew. 1999. Time scale for local scour at bridge piers. *Journal of Hydraulic Engineering* 125(1): 59-65.
21. Melville, B. W. and S. E. Coleman. 2000. Bridge Scour. Water Resources Publication. LLC, Denver.
22. Memar, S., M. Zounemat Kermani, M. Rahimpour, A. A. Beheshti and A. J. Schleiss. 2019. An investigation on the impacts of the skew angle on two bridge piers with respect to the flow direction on the equilibrium scour depth at the piers front. *Journal of Hydraulics* 14(1): 107-121. (In Farsi)
23. Mia, M. F. and H. Nago. 2003. Design method of time-dependent local scour at circular bridge pier. *Journal of Hydraulic Engineering* 129(6): 420-427.
24. Moreno, M., R. Maia and L. Couto. 2016. Prediction of equilibrium local scour depth at complex bridge piers. *Journal of Hydraulic Engineering* 142(11): 04016045.
25. Okhravi, S. and S. Gohari. 2020. Form friction factor of armored river beds. *Canadian Journal of Civil Engineering* 47(11): 1238-1248.
26. Raudkivi, A. J. and R. Ettema. 1985. Scour at cylindrical bridge piers in armored beds. *Journal of Hydraulic Engineering* 111(4): 713-731.
27. Richardson, E. V. and S. R. Davis. 2001. Evaluating Scour at Bridges: Hydraulic engineering circular No. 18. (HEC-18). Rep. Rep. No. FHWA NHI 01-001, Federal Highway Administration, Washington. DC.
28. Salim, M. and J. S. Jones. 1998. Scour around exposed pile foundations. In North American water and environment congress & destructive water, Reston.
29. Sheppard, D. M. and R. Renna. 2010. Bridge scour manual. Florida Department of Transportation, Tallahassee, FL.
30. Yanmaz, A. M. and Ö. Köse. 2007. Surface characteristics of scouring at bridge elements. *Turkish Journal of Engineering and Environmental Sciences* 31(2): 127-134.



## Local Scour at Single Column Arrangement of Bridge Piles Group

S. S. Okhravi and S.Gohari<sup>1\*</sup>

(Received: February 20-2020; Accepted: June 29-2020)

### Abstract

In regard to wide piers, the pile group rather than single pile is used frequently to bear the loading of the structure in a particular arrangement; piles group composed of only one column of piles in the flow direction has a great effect on supporting the bridge deck. In this study, local scour at a single column arrangement of the piles group made up of four rows of piles characterized by different piles spacing was studied for clear-water conditions with two flow discharges of 20 and 35 l/s (the effect of increasing the flow depth with the same flow intensity). The results indicated that an increase in the flow depth not only greatly enhanced the scour depth and the width of the scour hole. Besides, the investigation of the relative flow depth on scour extent showed the need for revision in deep water conditions, as reported in the literature. The results of the pile group experiments revealed the noticeable impacts of piles spacing on the local scour. The bigger pile spacing caused a feeble interaction of wake-horseshoe vortices, leading to a decrease of the scour depth; the separate view of the scour holes was generated at individual piles. Finally, the results were compared with commonly used comprehensive models. The findings of this study can be applied for the appropriate selection and positioning for the countermeasure of the scour at bridge piers.

**Keywords:** Local scour, Pile group, Scour depth, Time, Piles spacing

---

1. Department of Water Engineering, College of Agriculture, Bu-Ali Sina University, Hamadan, Iran  
Corresponding author, Email: S.gohari@basu.ac.ir