

بررسی آزمایشگاهی تأثیر دبی جریان بر میزان آبستگی اطراف گروه پایه‌های پل زبر در حضور گودال برداشت مصالح رودخانه‌ای

رسول دانشفراز*، مریم ستاریان کرج‌آباد، بابک علی‌نژاد و مهدی ماجدی اصل^۱

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۱۱/۲۴؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۴/۱۵)

چکیده

آبستگی اطراف پایه‌های پل از عوامل اصلی خرابی پل بوده و برداشت مصالح رودخانه‌ای، ممکن است سبب تشدید این پدیده شود. تحقیق حاضر به بررسی جامع آبستگی اطراف گروه پایه‌های پل در حضور گودال برداشت مصالح در دبی‌های مختلف پرداخته است. زبر کردن سطح پایه پل توسط شن در مقایسه گروه پایه‌های ساده نشان داد که اعمال زبری سبب کاهش عمق آبستگی، کاهش نرخ تغییرات عمق آبستگی و افزایش زمان تعادل می‌شود. نتایج نشان داد که کاهش عمق آبستگی در گروه پایه‌های پایین‌دست بیشتر از بالادست بود. همچنین در دبی پایین، وجود گودال برداشت مصالح تأثیر بیشتری بر میزان تفاوت وسعت آبستگی در اطراف گروه پایه‌های بالادست با پایین‌دست داشته و با افزایش دبی این تفاوت کم‌رنگ‌تر شد. نتایج آزمایش‌های مدل زبر نشان داد که با افزایش دبی، آبستگی موضعی بیشتر شده و پروفیل بستر در تراز پایین تری قرار می‌گیرد. در حالت کلی آبستگی گروه پایه‌های پایین‌دست گودال بیشتر از بالادست گودال بوده و نتایج حاصل از این پژوهش بیانگر مناسب بودن اعمال زبری شن برای کاهش آبستگی است.

واژه‌های کلیدی: آبستگی موضعی، گروه پایه‌های پل زبر، برداشت مصالح رودخانه‌ای، دبی جریان، پروفیل بستر

۱. گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه مراغه، مراغه، ایران

*: مسئول مکاتبات: پست الکترونیکی: daneshfaraz@yahoo.com

مقدمه

پدیده آبشستگی اطراف پایه‌های پل از تأثیرگذارترین پدیده‌های هیدرولیکی در عدم پایداری پل‌ها است. تحقیقات انجام شده در هشت منطقه مختلف در ایران نشان می‌دهد که حدود ۴۲ درصد از پل‌های این مناطق دچار آبشستگی شده‌اند (۲۴). علاوه بر این انجام برخی فعالیت‌ها مانند برداشت مصالح رودخانه‌ای، چنانچه در قالب ضوابط فنی و طبق دستورالعمل‌های مرتبط انجام نگیرد، ضمن تأثیر بر هندسه آبراهه، بر پارامترهای هیدرولیک جریان و رسوب نیز تأثیر می‌گذارد. این اثرات ممکن است به دلیل یکپارچگی سیستم رودخانه تا کیلومترها در پایین‌دست، بالادست و اطراف سازه‌های هیدرولیکی تأثیرگذار باشد. پل بالارود یکی از نمونه پل‌های تخریب شده در اثر برداشت مصالح رودخانه‌ای در ایران است.

محمد و همکاران (۲۲) آزمایشی روی پایه‌های بیضی‌شکل که همزمان از طوق مستطیلی شکل، شمع و نیز از تیغه‌های منحرف کننده جریان استفاده کرده بودند، انجام داده و آبشستگی موضعی را به میزان ۹۰ درصد کاهش دادند. گوئمو و همکاران (۱۳) به بررسی عددی آبشستگی اطراف پایه منفرد با شکل استوانه‌ای مقرر در ارتفاع پرداختند. این پژوهشگران نتیجه گرفتند که با اعمال تقعر در ارتفاع می‌توانند تنش برشی اطراف پایه را به میزان ۱۲ درصد کاهش دهند. وو و همکاران (۲۵) با انجام ۱۷ آزمایش به بررسی آبشستگی اطراف پایه پل در حضور صفحه شکافدار یک‌بار در مقابل و بار دیگر در پشت پایه پرداخته و دریافتند حداکثر کاهش عمق آبشستگی مربوط به صفحه نصب شده در مقابل پایه با طول ۱/۳۳ برابر قطر پایه بوده است. عطایی آشتیانی و بهشتی (۱) با انجام ۱۱۲ آزمایش به بررسی استفاده از گروه پایه‌ها پرداخته و مشاهده کردند که آبشستگی اطراف گروه پایه‌ها از پروسه متفاوتی نسبت به آبشستگی پایه منفرد تبعیت می‌کند. حیدرپور و همکاران (۱۵) آبشستگی اطراف گروه پایه دو و سه پایه‌ای در حضور طوقه دایره‌ای برای جریان آب زلال با رسوبات یکنواخت را بررسی کردند. این پژوهشگران نتیجه گرفتند که طوقه سبب تأخیر در

مکانیسم آبشستگی شده و با افزایش ابعاد طوقه، زمان تأخیر نیز افزایش می‌یابد. بزکوش و همکاران (۲) به بررسی آزمایشگاهی تأثیر زاویه قرارگیری گروه پایه‌های پل بر عمق آبشستگی پرداختند. در این پژوهش از دو مدل گروه پایه که پایه‌های ابتدایی و انتهایی آنها مایل بوده، استفاده شده است. این محققین علاوه بر ارائه رابطه‌ای تجربی برای تخمین عمق آبشستگی پایه‌های مایل، نتیجه گرفتند که استفاده از پایه‌های پل مایل سبب کاهش عمق آبشستگی حداکثر می‌شود. داوودی و همکاران (۸) به بررسی آزمایشگاهی تأثیر استفاده از کابل در کنترل آبشستگی اطراف گروه پایه‌های پل پرداختند. این محققین آزمایش‌های خود را با استفاده از سه قطر مختلف کابل، سه زاویه مختلف و سه دور ردیف کابل، انجام دادند. تحقیقات آنها نشان داد که در تمامی حالات، نصب کابل به دور پایه استوانه‌ای همواره سبب کاهش عمق آبشستگی در اطراف پایه‌ها می‌شود. معمار و همکاران (۲۱) با بررسی تأثیر زاویه قرارگیری دو پایه پل نسبت به جهت جریان بر روی عمق تعادل آبشستگی در جلو پایه‌ها نتیجه گرفتند که افزایش زاویه قرارگیری پایه‌ها، عمق و زمان تعادل آبشستگی در پایه‌ها را افزایش می‌دهد. لو و همکاران (۱۶) تأثیر عدد رینولدز بر آبشستگی موضعی اطراف پایه پل منفرد را بررسی کرده و نتیجه گرفتند که با افزایش عدد رینولدز عمق آبشستگی کاهش یافته و در اعداد رینولدز با مقادیر بسیار بالا، هم در بستر متحرک و هم در شرایط آب زلال، عمق آبشستگی به یک مقدار عددی ثابت نزدیک می‌شود. مالیک و ستیا (۱۸) به بررسی آبشستگی اطراف گروه پایه‌های پل در سه حالت پایه‌ها کنار هم، پشت سر هم و آرایش مثلثی پایه‌ها پرداختند. آنها دریافتند در آرایش پایه‌ها پشت سر هم هرگاه فاصله میان پایه‌ها از ۱۶ برابر قطر پایه‌ها بیشتر باشد، رفتار پایه‌ها مستقل خواهد بود. برای پایه‌های کنار هم و آرایش مثلثی این مقدار برابر ۱/۵ و ۲/۵ برابر قطر پایه بود. غفوری آذر و همکاران (۱۲) توانستند به صورت آزمایشگاهی تغییرات زمانی و مکانی حفره برداشت مصالح را تحت شرایط مختلف جریان بررسی کنند. این محققین همچنین توانستند

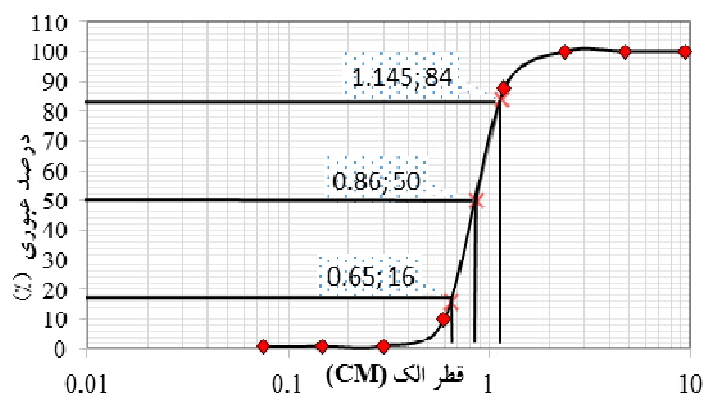
پرداخته و نشان دادند که با تغییر در قطر ذره رسوبي تأثیر چشمگیری در استهلاک انرژی جریان ایجاد نشده است. با مرور مطالعات انجام شده در زمینه آبستگي اطراف پایه‌های پل و تأثیر برداشت مصالح رودخانه‌ای مشاهده می‌شود که به‌کارگیری گروه پایه به‌جای تک‌پایه سبب کاهش این پدیده شده و علاوه بر آن برداشت مصالح سبب کنترل این پدیده در مناطق پایین‌دست می‌شود. اگرچه پژوهشگران فوق مطالعات ارزشمندی در زمینه بررسی پدیده آبستگي انجام داده‌اند. لیکن در این میان جای خالی پژوهشی که اجرای آن مقرون به صرفه و از نصب آن نیز ساده و سهل‌الاجرا باشد، احساس می‌شود. لذا در پژوهش حاضر با به‌کارگیری مفهوم گروه پایه به بررسی تأثیر شرایط هیدرولیکی مختلف بر عمق آبستگي گروه پایه‌ها در پایین‌دست و بالادست گودال حاصل از برداشت مصالح پرداخته شده است. در ادامه با اعمال زبری توسط شن با قطر متوسط ۱ سانتی‌متر اقدام به کاهش این پدیده شده است. زبر کردن پایه توسط شن راهکاری نوین، محیط زیست دوست، سهل‌الاجرا و مقرون به صرفه به دلیل دسترسی راحت به شن است.

مواد و روش‌ها

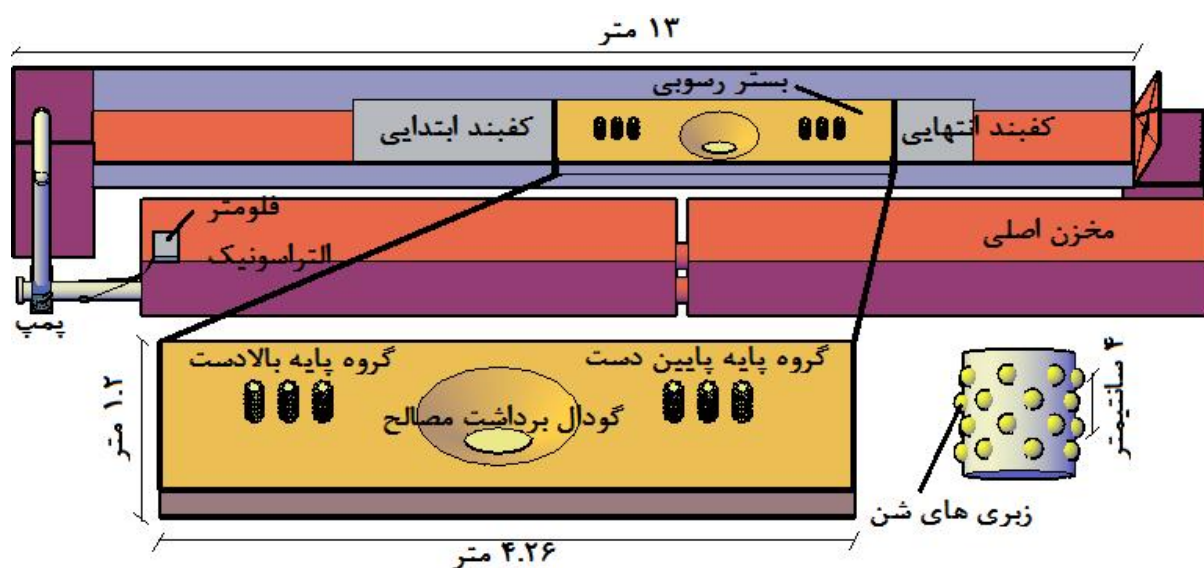
روش انجام آزمایش

آزمایش‌ها در یک فلوم آزمایشگاهی از جنس پلکسی گلس با ضخامت ۱ سانتی‌متر و مقطع مستطیلی شکل به ترتیب طول، عرض و ارتفاع ۱۳، ۱/۲ و ۰/۸ متر در آزمایشگاه هیدرولیک دانشگاه مراغه انجام شد. در ابتدای کانال یک توری برای تلاطم‌گیری جریان ورودی و در انتهای آن یک توری برای تل اندازی رسوبات شسته شده نصب شد. یک بستر رسوبي به طول ۴/۲۵ متر و ارتفاع ۰/۲۲۶ متری در میان دو کف‌بند با ابعاد ۲/۵ و ۱/۵ متر ایجاد شد. برای جلوگیری از تشکیل رپیل در بستر رسوبي قطر متوسط ذرات بایستی بزرگ‌تر از ۰/۷ میلی‌متر باشد (۲۳)، بدین ترتیب از رسوب با قطر متوسط

رابطه‌های تجربی برای محاسبه حداکثر عمق آبستگي و همچنین سرعت پیشروی حفره آبستگي در زمان ارائه کنند. حق نظر و همکاران (۱۴) تأثیر فاصله و نوع برداشت حفره‌های متوالی در مدیریت بهره‌برداری و برداشت مصالح رودخانه‌ای را بررسی کردند. آنها دریافتند در صورت برداشت مصالح در راستای عرض کانال، سرعت مهاجرت رسوبات در حدود ۴۲ درصد افزایش می‌یابد. رضایی و همکاران (۲۴) به صورت آزمایشگاهی به بررسی تأثیر افزودن رس و پلی‌اکریل آمید کاتیونی بر آبستگي پایه‌های پل و گودال‌های ایجاد شده ناشی از برداشت مصالح رودخانه‌ای پرداختند. این محققین پس از مشاهده کاهش حداکثری ۴۶/۷۸ درصدی عمق آبستگي نتیجه گرفتند که افزودن رس و پلی‌اکریل آمید کاتیونی روشی مناسب برای کاهش عمق آبستگي است. دانشفراز و همکاران (۴) به صورت آزمایشگاهی تأثیر حفره برداشت شن و ماسه رودخانه‌ای بر روی پایه پل مجاور را بررسی کرده و نتیجه گرفتند که پایه‌های پل بالادست بیش از پایه‌های پل پایین‌دست تحت تأثیر برداشت مصالح قرار می‌گیرند. ماجدی اصل و همکاران (۱۷) پس از انجام مطالعه آزمایشگاهی بر روی گروه پایه‌های پل مسلح شد با کابل در اثر وجود گودال مصالح نتیجه‌گیری کردند که برداشت مصالح از بالادست گروه پایه باعث کاهش و برداشت از پایین‌دست گروه پایه سبب افزایش عمق آبستگي حداکثر می‌شود. دانشفراز و همکاران (۵) به بررسی آزمایشگاه حداکثر عمق و طول انتقال گودال‌های ایجاد شده تحت تأثیر برداشت مصالح رودخانه‌ای پرداختند. نتایج این پژوهش نشان داد که زاویه ایستایی مصالح داخل آب، بیشترین تأثیر را در افزایش و نسبت ارتفاع گودال به عمق جریان بیشترین تأثیر را در کاهش طول و عمق آبستگي گودال دارد. دانشفراز و همکاران (۶) از تکنیک‌های نوین سازه‌های الحاقی مانند صفحات مشبک برای بررسی آبستگي استفاده کردند. تحقیقات آن‌ها نشان داد ضخامت و نسبت روزنه‌ها صفحه اسکرین بر هندسه حفره آبستگي مؤثرند. دانشفراز و همکاران (۷) به بررسی استهلاک انرژی ناشی از صفحات اسکرین و بستر رسوبي متحرک



شکل ۱. منحنی دانه‌بندی رسوبات بستر



شکل ۲. نمادین کانال آزمایش، محل قرارگیری پایه‌ها و موقعیت گودال برداشت مصالح

اساس یافته‌های عطایی آشتیانی و بهشتی (۱) برای بروز اثرات نگهداری و رفتار گروه پایه، بایستی نسبت فاصله پایه‌ها به قطر پایه کمتر از ۲ و بیش از ۰٫۱۵ باشد، بنابراین فاصله میان پایه‌ها و قطر آنها به ترتیب ۱۲ و ۹ سانتی‌متر انتخاب شدند. این پایه‌ها در دو مدل ساده و زبر در راستای جریان به تعداد سه عدد به صورت متوالی و پشت سر هم در بالادست و پایین‌دست گودال حفر شده قرار گرفتند. زبری‌های استفاده شده در این پژوهش شن‌های ریز با قطر متوسط ۱ سانتی‌متر بوده که در فواصل ۴ سانتی‌متری از هم بر روی سطح پایه‌ها نصب شدند (شکل ۲).

رسوبات ۰٫۸۶ میلی‌متر و انحراف معیار هندسی

$$\sigma_g = \sqrt{\frac{d_{84}}{d_{16}}} = 1.32$$

با توزیع یکنواخت انتخاب شد (شکل ۱).

به منظور مدل‌سازی برداشت مصالح و بررسی تأثیر آن یک گودال بیضی شکل به ابعاد ۱٫۰۱ متر در ۰٫۸ متر در میانه بستر حفر شد. طبق نظر چو و ملویل (۳)، برای حذف تأثیر دیواره‌های کانال بر آبشستگی موضعی پایه، قطر پایه نباید از ۱۰ درصد عرض کانال تجاوز کند و از نظر رادکیوی و اتما (۲۳)، برای حذف اثرات دیواره‌های کانال بر آبشستگی اطراف پایه‌های پل، نسبت عرض کانال به عرض پایه باید بیش از ۶٫۲۵ باشد. بر

جدول ۱. شرایط هیدرولیکی آزمایش

آزمایش	مدل پایه	عمق جریان (m)	دبی جریان (L/s)	قطر متوسط ذرات (mm)	قطر پایه (cm)	عدد فرود
۱	زبر	۰/۰۶۳۴	۱۵	۰/۸۶	۹	۰/۲۵
۲	زبر	۰/۱۰۶۰	۳۰	۰/۸۶	۹	۰/۲۵
۳	زبر	۰/۱۳۱۸	۴۵	۰/۸۶	۹	۰/۲۵
۴	ساده	۰/۰۶۳۴	۱۵	۰/۸۶	۹	۰/۲۵
۵	ساده	۰/۱۰۶۰	۳۰	۰/۸۶	۹	۰/۲۵
۶	ساده	۰/۱۳۱۸	۴۵	۰/۸۶	۹	۰/۲۵

ایجاد شده در وسعت حفره آبستگي و همچنین تغییرات ایجاد شده در گودال برداشت مصالح، به‌عنوان اطلاعات مورد نیاز این پژوهش برداشت و توسط نرم‌افزار اکسل و اتوکد مرتب‌سازی شدند.

آنالیز ابعادی

در این پژوهش برای بررسی پدیده آبستگي اطراف گروه پایه ها، پارامترهای بی بعد مؤثر به‌روش پی-باکینگهام استخراج شدند. پارامترهای مختلف و اصلی عبارتند از: V : سرعت جریان در بالادست، d_0 : عمق اولیه جریان، g : شتاب گرانش، ρ : چگالی سیال، ν : ویسکوزیته سینماتیکی سیال، B : عرض کانال، ρ_s : چگالی رسوب، d_{50} : اندازه قطر متوسط ذرات، σ_g : انحراف از معیار استاندارد ذرات، D : قطر پایه، K_r : زبری سطح پایه‌ها، t_e : زمان تعادل آبستگي، t : زمان آزمایش، L_{sx} : وسعت طولی آبستگي، L_{sy} : وسعت عرضی آبستگي، d_s : عمق آبستگي، d_{smax} : حداکثر عمق آبستگي، l_p : طول گودال برداشت مصالح و b_p : عرض گودال برداشت مصالح. بدین ترتیب خواهیم داشت:

$$F = f\left(\frac{V, d_0, g, \rho, \nu, B, \rho_s, d_{50}, \sigma_g, D, K_r, t_e}{t, L_{sx}, L_{sy}, d_s, d_{smax}, l_p, b_p}\right) \quad (2)$$

با در نظر گرفتن ρ ، g و d_0 به‌عنوان متغیرهای تکراری، پارامترهای بدون بعد به‌صورت زیر محاسبه می‌شوند:

$$\Pi = f\left(\frac{V}{\sqrt{gd_0}}, \frac{\nu}{d_0\sqrt{gd_0}}, \frac{B}{d_0}, \frac{\rho_s}{\rho}, \frac{d_{50}}{d_0}, \frac{D}{d_0}, \frac{K_r}{d_0}, \frac{g}{d_0}, \frac{L_{sx}}{d_0}, \frac{L_{sy}}{d_0}, \frac{d_s}{d_0}, \frac{d_{smax}}{d_0}, \frac{l_p}{d_0}, \frac{b_p}{d_0}, \frac{\sigma_g}{d_0}, \sqrt{\frac{g}{d_0}}t_e, \sqrt{\frac{g}{d_0}}t\right) \quad (3)$$

کلیه آزمایش‌ها در عدد فرود ۰/۲۵، با سه دبی مختلف ۱۵، ۳۰ و ۴۵ لیتر بر ثانیه و عمق‌های ۱۳/۱۸، ۱۰/۶۰ و ۰/۶۳۴ سانتی متر انجام شدند. دبی جریان توسط پمپ با قدرت پمپاژ ۷ تا ۵۲ لیتر بر ثانیه در کانال ایجاد شده و مقدار دقیق آن توسط فلومتر اولتراسونیک قرائت می‌شد. دبی‌های مورد نظر برای عدد فرود ۰/۲۵ توسط تنظیم عمق به‌وسیله دریچه انتهایی کانال طبق رابطه زیر انجام پذیرفت:

$$\frac{Q^2 T}{g A^3} = Fr^2 \quad (1)$$

در معادله فوق Q دبی جریان بر حسب متر مکعب، T عرض سطح آزاد جریان بر حسب متر، g شتاب گرانش بر حسب متر بر مجذور ثانیه، A سطح مقطع جریان بر حسب متر مربع است. جدول ۱ نشان‌دهنده شرایط هیدرولیکی آزمایش‌ها اعم از دبی جریان، قطر متوسط دانه‌های رسوبی، عدد فرود، عمق جریان و نیز انواع مدل‌های پایه پل است.

برای برداشت داده‌ها اعم از موقعیت و ارتفاع آبستگي موضعی اطراف گروه پایه‌ها از دستگاه اسکرن لیزری سه‌بعدی با دقت اندازه‌گیری ± 1 میلی‌متر استفاده شد. حین انجام آزمایش، داده‌ها در فواصل زمانی نیم ساعته، یک ساعته و دو ساعته تا زمان تعادل آزمایش برداشت می‌شدند. در انتهای آزمایش برای اینکه توپوگرافی بستر تغییر نکند، پمپ خاموش می‌شد و جریان داخل کانال توسط دریچه واقع در انتها به آرامی زهکشی می‌شد. داده‌هایی از قبیل عمق جریان، عمق آبستگي ایجاد شده اطراف پایه‌ها توسط جریان، تغییرات

ناچیز بود. بدین ترتیب در این موقع آبشستگی به تعادل خود رسیده بوده و زمان اتمام آزمایش‌ها بود.

تأثیر اعمال زبری بر زمان تعادل و آبشستگی اطراف گروه پایه‌ها

شکل ۳ نمودارهای تغییرات زمانی عمق آبشستگی در مقابل پایه‌ها را برای هر سه دبی ۴۵، ۳۰ و ۱۵ لیتر بر ثانیه نشان می‌دهد. در هر یک از این نمودارها عمق آبشستگی در سه دبی مختلف برای دو مدل پایه زبر و ساده برای مقایسه آورده شده است. مطابق شکل ۳ حداکثر عمق آبشستگی هم در بالادست و هم در پایین دست گودال برداشت مصالح مربوط به پایه‌های پیشین یعنی پایه‌های شماره ۱ و ۴ بود. بدین ترتیب پایه اول و چهارم از اهمیت ویژه‌ای نسبت به سایر پایه‌ها برخوردار هستند. با استفاده از شکل ۳ زمان تعادل آبشستگی برای تمام آزمایش‌ها برداشت شده و در جدول ۲ آورده شده است. انتخاب زمان تعادل آبشستگی در گروه پایه‌ها متفاوت از زمان تعادل در تک‌پایه‌ها است. در این مطالعه سعی شده است تا تمام پایه‌ها به تعادل آبشستگی برسند و سپس آزمایش متوقف شود. مهم‌ترین پایه از نظر زمان تعادل آبشستگی پایه شماره ۱ و ۴ بود. زیرا عمق آبشستگی این پایه‌ها بیشتر از سایر پایه بود. در نمودار عمق آبشستگی - زمان، ابتدا عمق آبشستگی با شیب تند پیش می‌رود و سپس شیب آن کم شده تا در زمان معینی شیب نمودار به افقی شدن می‌گراید که این زمان بیانگر زمان تعادل آبشستگی است. در این مطالعه نیز معیار انتخاب زمان تعادل افقی شدن روند نمودار عمق - زمان یا همان شکل ۳ بود.

مطابق شکل ۳ و جدول ۲ اعمال زبری سبب افزایش زمان تعادل تمام پایه‌ها هم در بالادست و هم در پایین دست گودال برداشت مصالح شده است. حداکثر افزایش زمان تعادل مربوط به دبی ۳۰ لیتر بر ثانیه با افزایش ۲۲۰ دقیقه بود. در حالت کلی نتایج حاصل از شکل ۳ و جدول ۲ نشان می‌دهد که استفاده از زبری در سطح پایه‌ها موجب افزایش زمان تعادل آبشستگی می‌شود.

در ادامه می‌توان از تقسیم پارامترهای بی بعد بر هم به پارامترهای بی بعد جدیدتری دست یافت:

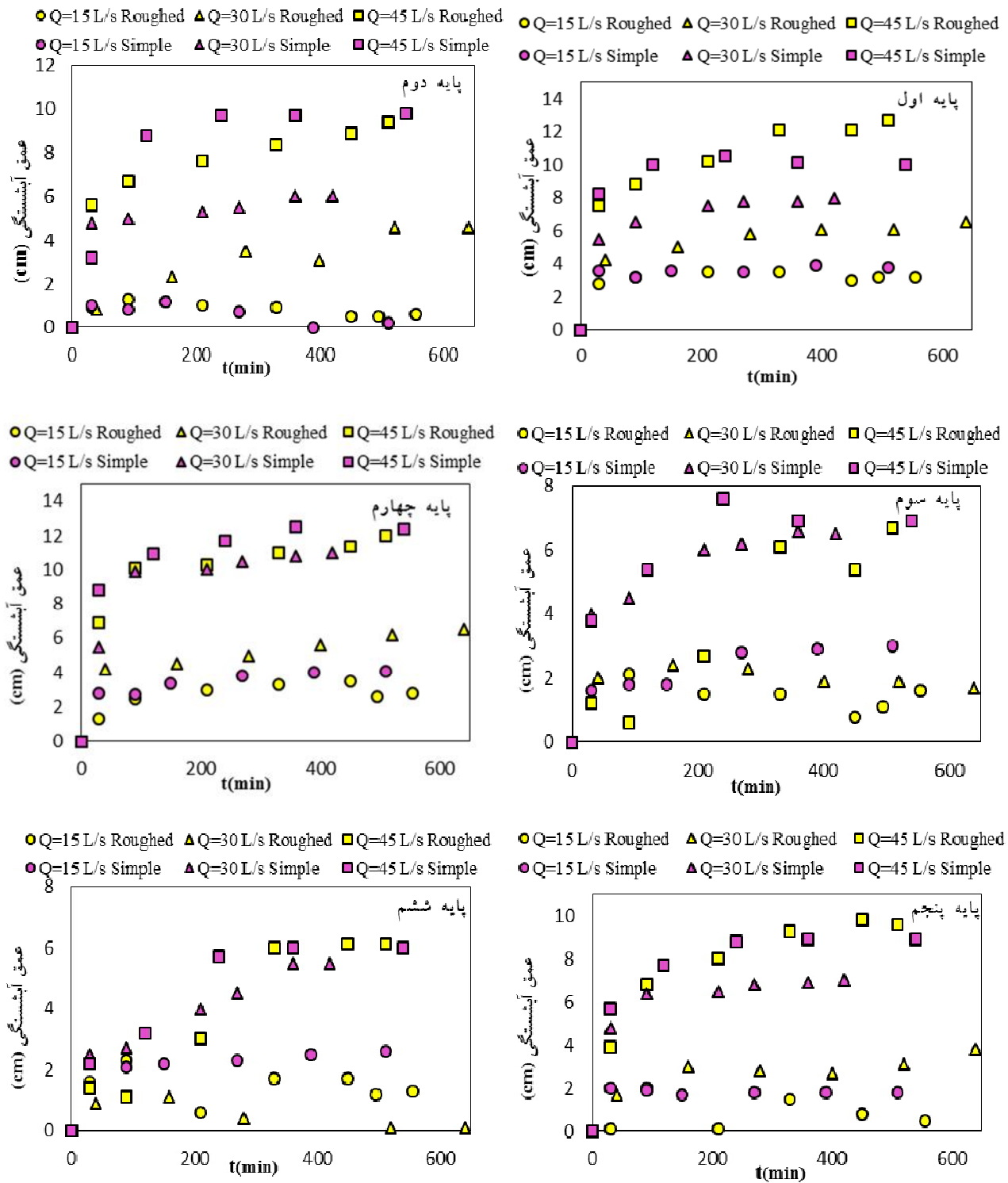
$$\Pi = f\left(\frac{Vd_0}{v}, \frac{B}{D}, \frac{\rho_s}{\rho} = G_s, \frac{d_{50}}{d_0}, \frac{K_r}{d_0}, \sigma_g, \frac{t}{t_e}, \frac{L_{sx}}{L_{sy}}, \frac{d_s}{d_{s,max}}, \frac{l_p}{d_0}, \frac{l_p}{b_p}\right) \quad (4)$$

در معادله فوق عبارت اول عدد رینولدز بوده و برای دبی‌های ۱۵، ۳۰ و ۴۵ لیتر بر ثانیه مقادیر آن به ترتیب ۱۲۱۵۳/۷۸، ۲۴۹۹۴/۸ و ۳۷۴۹۷/۱ محاسبه می‌شود. بر اساس نتایج فرانتزی و همکاران (۱۱) در صورتی که $Re \geq 7000$ باشد تأثیر ویسکوزیته سینماتیکی بر آبشستگی از بین می‌رود. علاوه بر این طبق پژوهش ملویل و چو (۲۰) اگر $\frac{B}{D} = \frac{1.2}{0.09} = 10$ باشد می‌توان از تأثیر دیواره کانال بر عمق آبشستگی اطراف پایه‌های پل صرف نظر کرد. برای حذف تأثیر رسوبات بایستی پارامتر بی بعد $\frac{D}{d_{50}} = \frac{0.09}{0.00086} = 25$ باشد (۱۹). همچنین طبق نتایج دی و همکاران (۹) در صورتی که توزیع رسوبات یکنواخت باشد یا به عبارتی $1.32 \leq \sigma_g \leq 1.4$ باشد، می‌توان از تأثیر رسوبات بر آبشستگی اطراف پایه‌های پل صرف نظر کرد، بنابراین پارامتر بی بعد σ_g حذف می‌شود. با توجه به ثابت بودن شیب کف کانال و جنس رسوبات در تمام آزمایش‌ها، می‌توان از تأثیر دو پارامتر G_s و S_0 چشم‌پوشی کرد. در این صورت پارامترهای بدون بعد به صورت معادله ۳ مانند زیر خلاصه می‌شوند:

$$\frac{d_s}{d_{s,max}} = f\left(\frac{t}{t_e}, \frac{K_r}{d_0}, \frac{L_{sx}}{L_{sy}}, \frac{l_p}{b_p}\right) \quad (5)$$

نتایج و بحث

در تمام آزمایش‌ها پس از تنظیم شرایط هیدرولیکی و برقراری جریان در فلوم، گردابه‌ها با سرعت زیادی در اطراف پایه‌ها ایجاد و رسوبات شسته شده از بالادست به پایین دست منتقل شده و حفره آبشستگی در اطراف پایه‌ها تشکیل شدند. این عمل تا جایی ادامه یافت که جریان دیگر توانایی انتقال رسوبات به پایین دست را نداشته و تغییرات هندسه حفره آبشستگی



شکل ۳. تغییرات زمانی آبستگي مقابل پایه‌ها در دبی‌های مختلف برای تمام پایه‌ها (رنگی در نسخه الکترونیکی)

جدول ۲. زمان تعادل عمق آبشستگی برای تمام پایه‌ها برحسب دقیقه

دبی جریان (L/s)	مدل پایه	پایه اول	پایه دوم	پایه سوم	پایه چهارم	پایه پنجم	پایه ششم
۱۵	زبر	۲۱۰	۴۵۰	۳۳۰	۴۵۰	۳۳۰	۳۹۰
	ساده	۱۵۰	۳۹۰	۲۷۰	۳۹۰	۲۷۰	۳۳۰
	تغییرات	۶۰	۶۰	۶۰	۶۰	۶۰	۶۰
۳۰	زبر	۶۴۰	۵۲۰	۴۰۰	۶۴۰	۶۴۰	۵۲۰
	ساده	۴۲۰	۳۶۰	۳۶۰	۴۲۰	۴۲۰	۳۶۰
	تغییرات	۲۲۰	۱۶۰	۴۰	۲۲۰	۲۲۰	۱۶۰
۴۵	زبر	۳۳۰	۵۱۰	۵۱۰	۵۱۰	۵۴۰	۳۳۰
	ساده	۲۴۰	۳۶۰	۳۶۰	۳۶۰	۴۵۰	۲۴۰
	تغییرات	۹۰	۱۵۰	۱۵۰	۱۵۰	۹۰	۹۰

جدول ۳. میزان کاهش عمق آبشستگی مدل زبر نسبت به ساده در مقابل پایه‌ها در زمان تعادل

دبی پایه	مقابل پایه اول	مقابل پایه دوم	مقابل پایه سوم	مقابل پایه چهارم	مقابل پایه پنجم	مقابل پایه ششم
۱۵	-۰/۶	۰/۴	-۱/۴	-۱/۳	-۱/۳	-۱/۳
۳۰	-۱/۵	-۱/۴	-۴/۸	-۴/۵	-۳/۲	-۵/۴
۴۵	۲/۷	-۰/۴	-۰/۲	-۰/۴	-۰/۷	-۰/۱

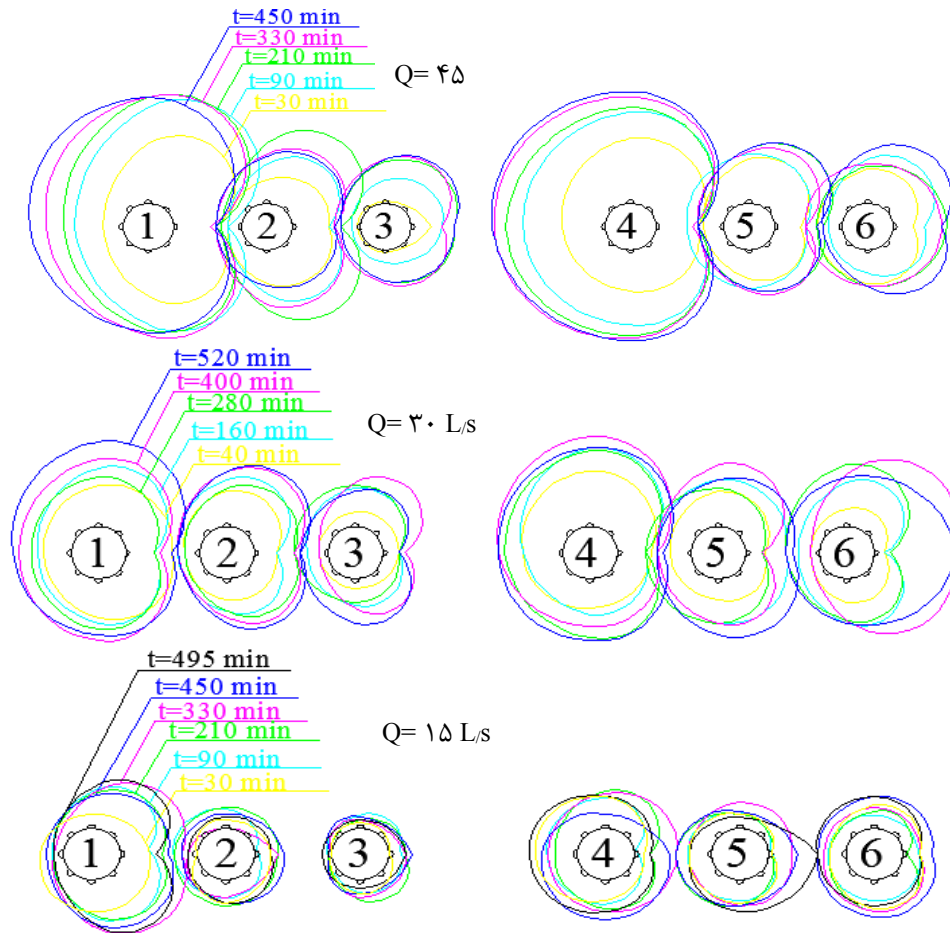
جدول ۴. میزان کاهش عمق آبشستگی مدل زبر نسبت به ساده در پشت پایه‌ها در زمان تعادل

دبی پایه	پشت پایه اول	پشت پایه دوم	پشت پایه سوم	پشت پایه چهارم	پشت پایه پنجم	پشت پایه ششم
۱۵	-۱/۴	۱/۷	۲/۸	-۰/۹	-۰/۲	-۰/۳
۳۰	-۱/۴	-۲/۴	۲/۲	-۳/۸	-۴/۲	-۲/۷
۴۵	۰/۸	-۰/۵	-۰/۸	-۰/۶	-۱/۶	-۰/۴

این دبی تمام مقادیر عمق آبشستگی کاهش یافته است. مقایسه نتایج مربوط به بالادست و پایین دست گودال برداشت مصالح نشان می‌دهد که گروه پایه‌های پل پایین دست بیشتر تحت تأثیر اعمال زبری قرار گرفته‌اند.

شکل ۴ نشان‌دهنده تغییرات زمانی وسعت آبشستگی برای سه دبی ۴۵، ۳۰ و ۱۵ لیتر بر ثانیه است. مشاهده می‌شود که حداکثر وسعت آبشستگی هم در جهت طولی و هم در جهت عرضی مربوط به دبی ۴۵ لیتر بر ثانیه با مقادیر ۳۶/۵ و ۴۸ سانتی متر بود. همچنین در این دبی وسعت آبشستگی اطراف پایه‌های پایین دست بیشتر از پایه‌های بالادست بود. از مقایسه

جدول ۳ و ۴ بیانگر میزان تغییرات عمق آبشستگی مدل زبر نسبت به مدل ساده در مقابل و پشت پایه‌ها در زمان تعادل است. در این جدول‌ها اعداد منفی بیانگر میزان کاهش عمق آبشستگی زمان تعادل در مدل زبر نسبت به مدل ساده است. حداکثر کاهش عمق آبشستگی مربوط به مقابل پایه ششم در دبی ۴۵ لیتر بر ثانیه با کاهش ۵/۴ سانتی متری بوده و حداقل کاهش مربوط به پشت پایه سوم برای دبی ۱۵ لیتر بر ثانیه با افزایش ۲/۸ سانتی متری بود. نتایج حاصل از جدول ۲ و ۳ نشان می‌دهد مطلوب‌ترین نتایج پس از اعمال زبری بر سطح پایه پل مربوط به دبی ۳۰ لیتر بر ثانیه بود، زیرا پس از اعمال زبری در



شکل ۴. تغییرات زمانی و وسعت آبستگي اطراف گروه پایه‌های پل بالادست و پایین دست گودال برداشت مصالح در دبی‌های مختلف

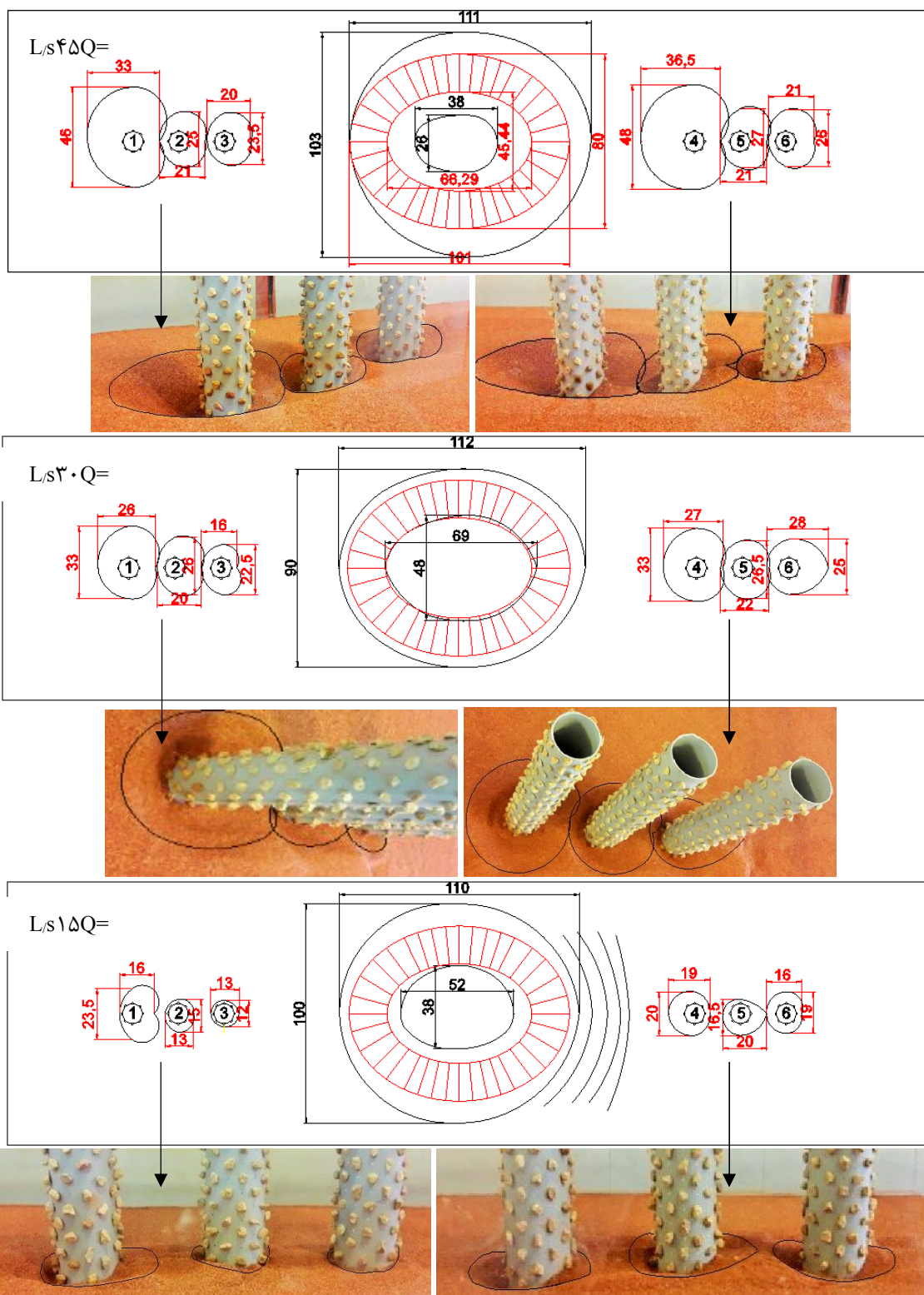
(رنگی در نسخه الکترونیکی)

پایه ۱ به‌عنوان مانع در برابر جریان عمل کرده و سبب کاهش ناگهانی سرعت جریان شده است. سپس به‌دلیل اینکه مقدار سرعت در پشت پایه ۱ که مقابل پایه ۲ است بسیار کم بوده و اثرات نگهدارنده پایه اول و سوم بر پایه ۲ تأثیر گذاشته‌اند، لذا وسعت آبستگي اطراف این پایه نوسان داشته و در نهایت پس از رسیدن به زمان تعادل این نوسانات منقطع شده‌اند.

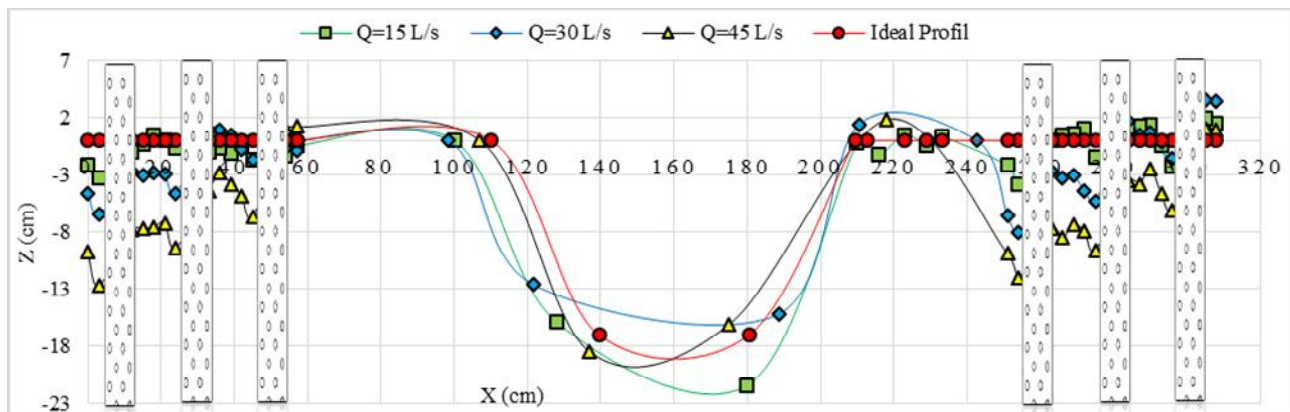
تأثیر دبی جریان بر وسعت آبستگي بستر در انتهای آزمایش‌ها برای مدل زبر

تغییرات نهایی وسعت گودال برداشت مصالح و حفره آبستگي اطراف گروه پایه‌های زبر در بالادست و پایین دست آن در زمان تعادل آبستگي در شکل ۵ نشان داده شده است. در این شکل،

سه نمودار نتیجه‌گیری شد که با افزایش دبی وسعت آبستگي نیز افزایش یافته است. در طول مدت آزمایش در دو دبی ۳۰ و ۴۵ لیتر بر ثانیه، وسعت آبستگي در حال افزایش بوده و در دبی ۱۵ لیتر بر ثانیه این پارامتر دارای روند نوسانی بود. دلیل این پدیده این است که در دبی‌های ۳۰ و ۴۵ لیتر بر ثانیه مقدار رسوبات شسته شده از آبستگي کلی بستر پس از ورود به حفره آبستگي به‌دلیل سرعت بالای جریان پایدار نبوده و آن مقدار رسوبات خیلی سریع از حفره خارج شده‌اند اما در دبی ۱۵ لیتر بر ثانیه رسوبات متقل شده در اثر آبستگي کلی بستر پس از ته‌نشینی در حفره آبستگي، مدت‌زمان زیادی را در حفره مانده و سپس توسط آبستگي موضعی به بیرون راه یافته‌اند. این پدیده در پایه دوم در دبی ۴۵ نیز مشهود است، در این دبی به‌دلیل سرعت بالای جریان،



شکل ۵. پلان بستر و وسعت حفره آبشستگی در زمان تعادل آبشستگی برای دبی‌های مختلف



شکل ۶. تأثیر دبی جریان بر پروفیل طولی بستر در مدل زبر (رنگی در نسخه الکترونیکی)

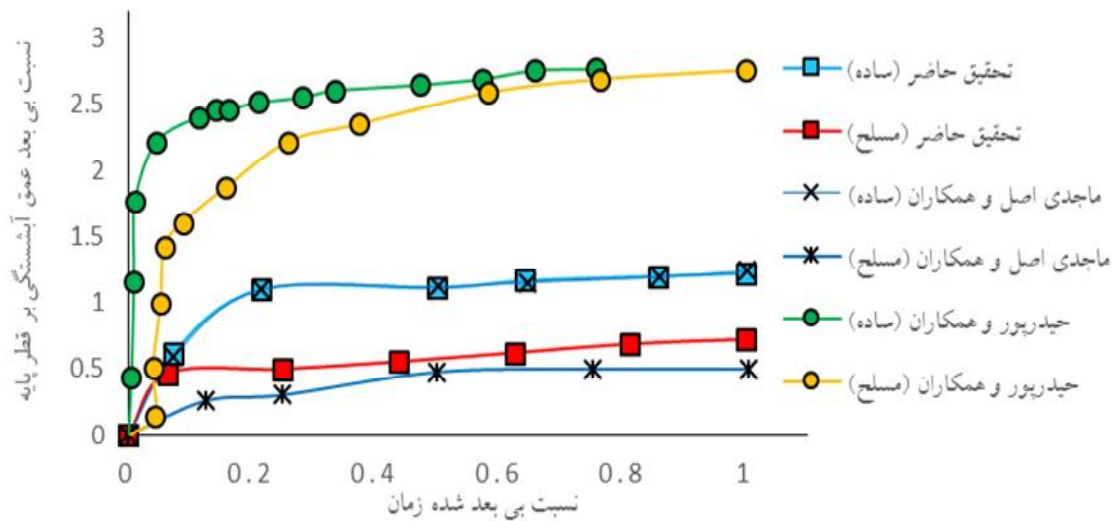
افزایش وسعت آبستگي را در جهت طولی کانال شاهد هستیم. در دبی ۴۵ لیتر بر ثانیه به دلیل افزایش بیشتر سرعت جریان، گودال برداشت مصالح نتوانسته است به سمت بالادست گسترش یابد. به همین دلیل رسوبات بالادست حاصل از آبستگي کلی بستر و موضعی اطراف گروه پایه‌های پل در نوک و همچنین داخل گودال برداشت مصالح ته‌نشین شده است.

در تمام آزمایش‌ها وجود گودال حاصل از برداشت مصالح محلی را فراهم کرده است تا عمق جریان افزایش یافته و به دلیل ثابت بودن دبی جریان، سرعت آن در این مناطق کاهش یابد. این پدیده سبب ایجاد تفاوت در پروسه آبستگي اطراف گروه پایه‌های بالادست و پایین‌دست شده که در دبی ۱۵ لیتر بر ثانیه بیشتر محسوس بود. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت در دبی کم، گودال برداشت مصالح تأثیر بیشتری بر میزان تفاوت وسعت آبستگي در اطراف گروه پایه‌های بالادست و پایین‌دست گذاشته و در ادامه با افزایش دبی این تفاوت کم‌رنگ‌تر شده است. در حالت کلی گروه پایه‌های پایین‌دست گودال بیشتر از گروه پایه‌های بالادست گودال آبستگي داشتند. بنابراین بهتر است در صورت برداشت مصالح رودخانه‌ای این اقدام از پایین‌دست گروه پایه‌ها صورت گیرد.

تأثیر دبی جریان بر پروفیل طولی بستر در مدل زبر

شکل ۶ نشان‌دهنده تغییرات پروفیل بستر در دبی‌های مختلف برای مدل زبر است. در این شکل علاوه بر تغییرات پروفیل

گودال قرمز رنگ، مربوط به گودال برداشت مصالح قبل از شروع آزمایش و گودال مشکی رنگ مربوط به تغییرات گودال برداشت مصالح در انتهای آزمایش‌ها است. با توجه به این شکل گودال برداشت مصالح در دبی ۴۵ لیتر بر ثانیه در جهت عرضی با مقدار ۳۳ سانتی‌متر افزایش به سمت بیرون و ۱۹٫۴۴ سانتی‌متر کاهش به سمت درون گسترش زیادی نسبت به سایر دبی‌ها داشته است. در این دبی وسعت آبستگي اطراف گروه پایه‌های پایین‌دست هم در جهت طولی و هم در جهت عرضی بیشتر از گروه پایه‌های بالادست بود. در دبی ۳۰ لیتر بر ثانیه تغییرات طولی گودال برداشت مصالح با ۱۱ سانتی‌متر افزایش بیشتر از سایر دبی‌ها بود اما تغییرات عرضی آن با مقدار ۱۰ سانتی‌متر افزایش، کمتر از دبی ۴۵ لیتر بر ثانیه بود. با توجه به شکل نتیجه می‌گیریم که نقاط پایین‌دست گودال برداشت مصالح بیش از نقاط بالادست آن دستخوش تغییرات بوده‌اند. پس از برقراری جریان، گودال برداشت مصالح خواستار گسترش در هر دو جهت طولی و عرضی بوده است. در دبی ۱۵ لیتر بر ثانیه گودال برداشت مصالح در تمام جهت‌ها شروع به گسترش کرده است. در این دبی جریان آب پس از گذر از گودال برداشت مصالح به پایه شماره ۴ برخورد کرده و در خلاف جهت جریان پس از غلبه بر سرعت آن به سمت بالادست برگشته و ایجاد شیارهایی بر سطح بستر کرده است. این پدیده اجازه گسترش زیاد گودال برداشت مصالح را به سمت پایین‌دست نداده است. درحالی که در جهت عرضی کانال به میزان ۲۰ سانتی‌متر گسترش یافته است. در دبی ۳۰ لیتر بر ثانیه، قدرت جریان برگشتی کمتر شده و بدین ترتیب



شکل ۷. مقایسه منحنی توسعه زمانی آبشستگی تحقیق حاضر و سایر محققین برای حداکثر عمق آبشستگی (رنگی در نسخه الکترونیکی)

(۱۷) و حیدرپور و همکاران (۱۵) برای مقایسه استفاده شده است. داده‌های انتخابی در این مطالعه مربوط به دبی ۳۰ لیتر بر ثانیه برای پایه شماره چهار (اولین پایه از پایین دست گودال برداشت مصالح) است زیرا به دلیل اینکه دبی جریان در مطالعه ماجدی اصل و همکاران ۳۰ لیتر بر ثانیه است لذا تلاش شده است تا به شرایط آزمایشگاهی سایر پژوهشگران نزدیک باشد. با توجه به شکل ۷ مشاهده می‌شود که در این داده انتخابی برای مقایسه در گروه پایه‌ها با کاهش ۴۰ درصدی عمق آبشستگی نتایج مطلوب‌تری در مقایسه با مطالعه حیدرپور و همکاران (۱۵) با کاهش ۱۲ درصد داشته اما در مقایسه با نتایج ماجدی اصل و همکاران (۱۷) که کاهش ۵۹ درصدی عمق آبشستگی داشتند، نتایج این پژوهشگران مطلوب‌تر از نتایج این مطالعه بود.

نتیجه‌گیری کلی

در این پژوهش تأثیر تغییرات دبی جریان بر آبشستگی اطراف گروه پایه‌های پل در بالادست و پایین دست گودال حاصل از برداشت مصالح با دو مدل پایه پل (پایه پل ساده و پایه پل زبر) در حضور گودال حاصل از برداشت مصالح به صورت آزمایشگاهی بررسی شد. نتایج حاصل از اعمال زبری بر

بستر در زمان اتمام آزمایش‌ها، تغییرات پروفیل طولی گودال حاصل از برداشت مصالح نیز نشان داده شده است. نمودار قرمز رنگ مربوط به پروفیل طولی بستر قبل از شروع آزمایش‌ها است. مطابق شکل با افزایش دبی آبشستگی موضعی بیشتر شده و تراز بستر کاهش بیشتری داشته است. پروفیل بستر در دبی ۴۵ لیتر بر ثانیه دارای پایین‌ترین تراز و در دبی ۱۵ لیتر بر ثانیه دارای بالاترین تراز بوده است. تراز گودال برداشت مصالح در دبی ۱۵ لیتر بر ثانیه با مقدار ۲۱٫۴- سانتی‌متر کمتر از سایر دبی‌ها بود. دلیل این پدیده این است که در دبی ۱۵ لیتر بر ثانیه مقدار رسوبات شسته شده از بالادست گودال کمتر بوده و بنابراین رسوبات وارد شده به گودال کمتر بوده است. همچنین به دلیل اینکه سرعت جریان در دبی ۱۵ لیتر بر ثانیه کمتر از سایر دبی‌هاست بنابراین آبشستگی کلی بستر نیز کمتر بوده و تغییرات گودال برداشت مصالح کمتر از سایر دبی‌ها بود.

مقایسه نتایج حاصل از این مطالعه با نتایج سایر پژوهشگران با توجه به اینکه بررسی آبشستگی اطراف گروه پایه‌های زبر شده با شن در حضور گودال برداشت مصالح انجام نشده است، لذا سعی شده است تا مطالعاتی نزدیک به مطالعه حاضر برای مقایسه انتخاب شود. لذا از مطالعات ماجدی اصل و همکاران

افزایش دبی این تفاوت کم‌رنگ‌تر شد. در حالت کلی گروه پایه‌های پایین دست گودال بیشتر از گروه پایه‌های بالادست گودال آبستگي داشتند. بنابراین بهتر است در صورت برداشت مصالح رودخانه‌ای علاوه بر رعایت ضوابط فنی این اقدام از پایین دست گروه پایه‌ها صورت گیرد. بررسی تأثیرات دبی جریان بر پروفیل طولی بستر در مدل زبر نشان داد که با افزایش دبی آبستگي موضعی بیشتر شده و تراز بستر کاهش بیشتری داشته است. نتایج حاصل از این پژوهش و مقایسه آن با مطالعات سایر پژوهشگران بیانگر مناسب بودن اعمال زبری و استفاده از گروه پایه به‌جای پایه منفرد برای کاهش آبستگي بود. همچنین به‌دلیل اینکه مصالحی نظیر شن مقرون به‌صرفه و سهل‌الاجرا بوده و دسترسی به این مصالح آسان است، استفاده از این مصالح راهکار معقولى برای کنترل و کاهش آبستگي موضعی اطراف پایه‌ها است.

آبستگي اطراف گروه پایه‌ها و مقایسه آن با گروه پایه‌های ساده نشان داد که اعمال زبری سبب کاهش عمق آبستگي در اکثر پایه‌ها شد. نتایج مربوط به عمق آبستگي گروه پایه‌های بالادست و پایین دست گودال برداشت مصالح نشان داد که گروه پایه‌های پل پایین دست بیشتر از گروه پایه‌های پل بالادست تحت تأثیر اعمال زبری قرار گرفته‌اند. علاوه بر این اعمال زبری سبب افزایش زمان تعادل و کاهش نرخ تغییرات عمق آبستگي شده است. پس از بررسی تغییرات زمانی وسعت آبستگي اطراف گروه پایه‌ها در دبی‌های مختلف در مدل زبر مشاهده شد که با افزایش دبی وسعت آبستگي نیز افزایش یافت. نتایج حاصل از بررسی تأثیر دبی جریان بر وسعت آبستگي بستر در زمان تعادل برای مدل زبر نشان داد که در دبی کم، وجود گودال برداشت مصالح تأثیر بیشتری بر میزان تفاوت آبستگي در اطراف گروه پایه‌های بالادست و پایین دست گذاشته و با

منابع مورد استفاده

1. 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.
2. Bozkuş, Z., M. C. Özalp and A. E. Dinçer. 2018. Effect of pier inclination angle on local scour depth around bridge pier groups. *Arabian Journal for Science and Engineering* 43(10): 5413-5421.
3. Chiew, Y. M. and B. W. Melville. 1987. Local scour around bridge piers. *Journal of Hydraulic Research* 25(1): 15-26.
4. Daneshfaraz, R., J. Chabokpour, M. Dasineh and A. Ghaderi. 2019. The experimental study of the effects of river mining holes on the bridge piers. *Iranian Journal of Soil and Water Research* 50(7): 1619-1633. (In Farsi).
5. Daneshfaraz, R., J. Chabokpour and M. Dasineh. 2019. The experimental investigation of the maximum depth and length of the created pit holes due to the bed material removal under subcritical flow condition. *Journal of Water and Soil Conservation* 26(1): 111-130. doi: 10.22069/jwsc.2019.14817.2986. (In Farsi).
6. Daneshfaraz, R., J. Chabokpour and H. Nezafat. 2019. Experimental investigation of the scouring due to hydraulic jump in screens. *Iranian Journal of Soil and Water Research* 50(5): 1039-1051. doi: 10.22059/ijswr.2018.251621.667846. (In Farsi).
7. Daneshfaraz, R., S. Sadeghfam and A. Tahni. 2019. Experimental investigation of screen as energy dissipators in the movable-bed channel. *Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Civil Engineering* 44: 1237-1246.
8. Davodi, H., A. R. Masjedi, M. Heidarnajad, A. Bordbar and A. A. Kamanbedast. 2019. Investigation of the effect of cable on the control of scour around the piles group in the river. *Journal of Hydrology and Soil Science* 23(2): 73-86. magiran.com/p2024496. (In Farsi).
9. Dey, S., S. K. Bose and G. L. N. Sastry. 1995. Clear Water Scour at Circular Piers: a model. *Journal of Hydraulic Engineering* 121(12): 869-876.
10. EL-Ghorab, E. A. 2013. Reduction of scour around bridge piers using a modified method for vortex reduction. *Alexandria Engineering Journal* 52(3): 467-478.
11. Franzetti, S., S. Malavasi and C. Piccinin. 1994. sull'erosione alla base pile di ponte in acquechiare. *Proc., XXIV Convegno di Idraulica e Costruzioni Idrauliche* 2: T4 13-24. (in Italian).
12. Ghafouri, A., M. Mohammadi Davoodi and E. Amiri Teklodani. 2019. Effects of sand cavity harvesting on river bed profiles. 6th National Congress of Civil Engineering, Semnan, Semnan University, <https://www.civilica.com/Paper> -

- NCCE06-NCCE06_1050.html. (In Farsi).
13. Guemou, B., A. Seddini and A. N. Ghenim. 2018. Scour around bridge piers: numerical investigations of the longitudinal biconcave pier shape. *Periodica Polytechnica Mechanical Engineering* 62(4): 298-304.
 14. Haghazad, H., R. Aminineghad and M. Saneie. 2018. Experimental study of the Location and type of pits extraction on the management of bed materials mining. *Iranian Journal of Soil and Water Research* 49(1): 221- 231. (In Farsi).
 15. 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.
 16. Lou, X., L. Cheng, Z. Chen, G. Tang and F. Yang. 2019. The effect of Reynolds number on local scour around a monopile. In International Conference on Asian and Pacific Coasts. Springer, Singapore.
 17. Majedi Asl, M., R. Daneshfaraz and S. Valizadeh. 2019. Experimental investigation of the river materials mining effect on the scouring around armed pier groups. *Iranian Journal of Soil and Water Research* 50(6): 1363-1380. doi: 10.22059/ijswr.2019.269942.668062. (In Farsi).
 18. Malik, R., and B. Setia. 2020. Interference between pier models and its effects on scour depth. *SN Applied Sciences* 2(1): 68.
 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. Memar, S., M. Zounemat-Kermani, M. Zahimpour, A. Beheshti and A. 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. doi: 10.30482/jhyd.2019.153381.1334. (In Farsi).
 22. Mohammed, Y. A., Y. K. Saleh and A. A. M. Ali. 2015. Experimental investigation of local scour around multi-vents bridge piers. *Alexandria Engineering Journal* 54(2): 197-203.
 23. Raudkivi, A. J. and R. Ettema. 1983. Clear-water scour at cylindrical piers. *Journal of Hydraulic Engineering* 109(3): 338-350.
 24. Rezaie, M., R. Daneshfaraz and M. Dasineh. 2018. Experimental investigation of adding clay and PAM on scour reduction bridge piers under the influence removal of river materials. *Journal of Hydraulics* 13(3): 59-70. doi: 10.30482/jhyd.2018.81358. (In Farsi).
 25. Wu, P., R. Balachandar and A. Ramamurthy. 2018. Effects of splitter plate on reducing local scour around bridge pier. *River Research and Applications* 34(10): 1338-1346.
 26. Zare, M. and T. Honar. 2016. The effect of groyne on reduction of the scour depth around bridge piers in river bends. *JWSS-Isfahan University of Technology* 19(74): 167-192.

Experimental Investigation of the Effects of Flow Discharge on the Scour Rate around the Groups of Bridge Piers with a Rough Surface in the Presence of Aggregate Extraction Pits

R. Daneshfaraz*, M. Sattariyan Karajabad, B. Alinejad and M. Majedi Asl¹

(Received: February 13-2020; Accepted: July 05-2020)

Abstract

The scour around the bridge piers is one of the main causes of bridge failure and the extraction of aggregates may aggravate this phenomenon. The present study comprehensively investigated the scour around the groups of bridge piers in the presence of aggregate extraction pits, using different discharges. The bridge piers roughened by gravel had been compared with the simple bridge piers; so, the results showed that the roughening caused the reduction of the scour depth. Scour depth change rate led to an increase in the equilibrium time. The results also showed that the reduction of the scour depth at the downstream groups of piers was more than that in the upstream. For the lowest discharge, the aggregate extraction pits had a considerable effect on the scour depth difference for the groups of piers in the downstream and upstream. On the other hand, the effects were decreased when the rate of discharge was increased. The experimental results obtained by the rough surface models showed that as the discharge was increased, the local scour was increased too; at the same time, the bed profile was posed at the low level. Generally, the scour depth of the groups of piers in the downstream of the extraction pit was more than that in the upstream. The results of the current research, therefore, demonstrated that the surface of the bridge pier roughened by gravel reduced the scour depth.

Keywords: Local scour, Bridge piers with rough surface, Aggregate extraction, Flow discharge, Bed profile

1. Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, University of Maragheh, Maragheh, Iran.
Corresponding author, Email: daneshfaraz@yahoo.com