



دانشگاه گیلان، دانشکده مهندسی

نشریه پژوهش‌های حفاظت آب و خاک  
جلد بیست و دوم، شماره اول، ۱۳۹۴  
<http://jwsc.gau.ac.ir>

## بررسی آزمایشگاهی الگوی جریان و آبستگي پیرامون تکیه‌گاه پل با مقطع مستطیلی

\* حسین خزیمه‌نژاد<sup>۱</sup>، مهدی قمشی<sup>۲</sup>، محمود شفاعی بجزستان<sup>۲</sup> و یوسف رضانی<sup>۱</sup>

<sup>۱</sup> استادیار گروه مهندسی آب، دانشگاه بیرجند، <sup>۲</sup> استاد گروه سازه‌های آبی، دانشگاه شهید چمران اهواز

تاریخ دریافت: ۹۲/۶/۲۵؛ تاریخ پذیرش: ۹۲/۱۲/۱۱

### چکیده

تاکنون مطالعات مختلفی در خصوص شناخت مکانیزم آبستگي اطراف سازه‌های هیدرولیکی و به‌خصوص پل‌ها انجام شده است. در زمینه آبستگي اطراف پل‌ها تمرکز پژوهش‌ها بیش‌تر بر روی پایه بوده و پژوهش‌های انجام شده در خصوص تکیه‌گاه بسیار اندک بوده است. بررسی منابع نشان می‌دهد که شکل تکیه‌گاه بر میزان آبستگي پیرامون آن تأثیر به‌سزایی دارد و در بین اشکال مختلف تکیه‌گاه، تکیه‌گاه مستطیلی بیش‌ترین میزان آبستگي را دارد. بنابراین در این پژوهش با انتخاب شکل مستطیلی برای تکیه‌گاه، علاوه بر بررسی تأثیر عدد فرود در دو زمان ۱۳ و ۵ ساعت، تأثیر پارامتر طول بی‌بعد (نسبت عرض به طول) تکیه‌گاه نیز بر میزان آبستگي پیرامون آن مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که با افزایش عدد فرود در زمان‌های نام‌برده، عمق آبستگي افزایش و بر وسعت چاله آبستگي افزوده می‌شود، در عدد فرود ۰/۲۲ بیش‌ترین عمق آبستگي رخ داد که این عمق تقریباً برابر عمق جریان بود. همچنین با کاهش پارامتر طول بی‌بعد تکیه‌گاه، عمق آبستگي و وسعت چاله آبستگي افزایش می‌یابد. در ادامه این پژوهش مؤلفه‌های سه‌بعدی سرعت جریان پیرامون تکیه‌گاه با استفاده از سرعت‌سنج الکترومغناطیس تعیین و برای رسم میدان جریان مورد استفاده قرار گرفتند. همچنین پروفیل مؤلفه‌های سه‌بعدی سرعت در گوشه بالادست تکیه‌گاه ترسیم و بررسی آن نشان داد، گردابی عمودی در این نقطه شکل گرفته که عامل اصلی آبستگي و توسعه آن پیرامون تکیه‌گاه پل می‌باشد.

واژه‌های کلیدی: الگوی جریان، مدل آزمایشگاهی، آبستگي، تکیه‌گاه پل

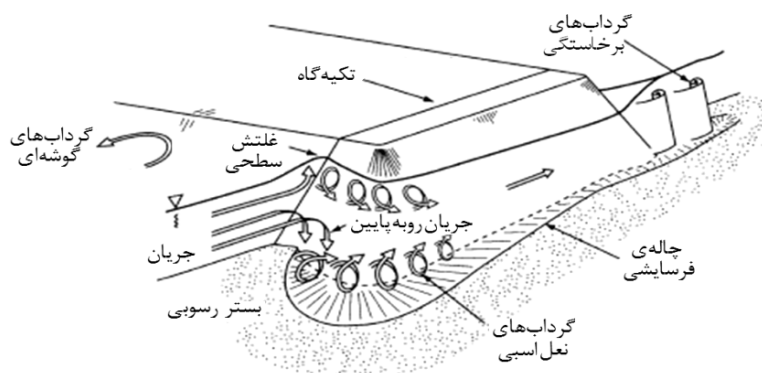
\* مسئول مکاتبه: [hkhozeymeh@birjand.ac.ir](mailto:hkhozeymeh@birjand.ac.ir)

## مقدمه

طراحی، محاسبه و احداث پایه و تکیه‌گاه پل‌ها، از مهم‌ترین و حساس‌ترین مراحل یک پروژه پل‌سازی می‌باشد؛ به‌خصوص وقتی که این پل در محل عبور یک رودخانه واقع شده باشد. در این زمان، طراح باید برای انتخاب طول و تعداد دهانه‌ها و عمق حداقل پی در محل پایه و تکیه‌گاه، اطلاعات هیدرولوژیکی و هیدرولیکی حوضه و رودخانه را در نظر گرفته و مورد تجزیه و تحلیل قرار دهد. از مهم‌ترین مواردی که در این رابطه می‌توان به آن اشاره نمود، اطلاعات مربوط به فرسایش بستر رودخانه می‌باشد که در صورت در نظر نگرفتن آن باید شاهد عواقب خطرناکی، از جمله تهدید پایداری پل و در نهایت خرابی آن بود. هر ساله با وقوع سیلاب در هر رودخانه تعداد زیادی از پل‌ها درست زمانی که بیش‌ترین نیاز به آن‌ها وجود دارد، تخریب می‌گردند. یکی از مؤثرترین عوامل این تخریب‌ها، آبستگي در محل پایه و تکیه‌گاه می‌باشد. تخریب پل‌ها به‌علت آبستگي، زیان‌های سنگین اقتصادی و جانی را به دنبال دارد. مطالعات انجام شده در زمینه شکست ۳۸۳ پل در ایالات متحده نشان می‌دهد که در ۲۵ درصد آن‌ها تخریب پایه و در ۷۲ درصد تخریب تکیه‌گاه، علت شکست پل بوده است. طبق مطالعات ملویل (۱۹۹۲)، از ۱۰۸ شکست پل که در فاصله سال‌های ۸۴-۱۹۶۰ در نیویورک رخ داد، ۲۹ مورد آن مربوط به آبستگي تکیه‌گاه پل بوده است. ملویل همچنین خاطرنشان می‌سازد که ۷۰ درصد هزینه‌ها روی شکست پل در نیویورک ناشی از آبستگي تکیه‌گاه پل بوده است. در داخل کشور هم مطابق گزارش سازمان راهداری و حمل و نقل جاده‌ای در سال ۱۳۹۱ میزان ۳۷ درصد خرابی پل‌های کشور ناشی از آبستگي پایه‌های میانی و کناری آن می‌باشد. همچنین در دهه ۸۰ تعداد ۱۸۳ پل در حوزه راه و ترابری استان خوزستان مورد بازدید و بررسی فنی قرار گرفتند. بخش عمده‌ای از آن‌ها، پل‌های احداث شده بر روی رودخانه‌های مختلف بودند. مطابق گزارش‌های این اداره، تقریباً بیش‌تر پل‌های رودخانه‌ای استان دچار تخریب‌های ناشی از آبستگي در محل پایه یا تکیه‌گاه شده بودند که این مسأله باعث تحمیل هزینه‌های هنگفت تعمیر و بازسازی آن‌ها گردید. در این بین تعداد ۷ پل بالارود جنوبی، بتوند، زهره، علاء، گلال کهنک، حمیدآباد و عبدالخان وضعیت بحرانی‌تری نسبت به سایر پل‌ها داشتند (خادمی و همکاران، ۲۰۱۱).

مسأله آبستگي در محدوده پل‌ها، سال‌ها است که ذهن پژوهشگران را به خود مشغول نموده است. هافمن و ورهيج (۱۹۹۷) به این موضوع اشاره داشتند که تحلیل آبستگي جزء لاینفک و مکمل طراحی زیرسازی و پی‌سازی پل‌های جدید می‌باشد و این تحلیل باید تضمین‌کننده مقاومت پل در

برابر جریان‌ها و سیلاب‌های بزرگ باشد. همان‌گونه که اشاره گردید، الگوی جریان و فرآیند آبشستگی اطراف تکیه‌گاه پل یک پدیده پیچیده است که از اثر متقابل جریان آشفته سه‌بعدی در میدان اطراف تکیه‌گاه ناشی می‌شود و فرسایش رسوبات بستر را به دنبال دارد. پژوهش‌ها در زمینه فرآیند آبشستگی در تکیه‌گاه پل‌ها توسط وانگ (۱۹۸۲)، کان (۱۹۸۸)، کانداسمی (۱۹۸۹)، دانگل (۱۹۹۴) و بسیاری دیگر نشان داده است که فرآیند آبشستگی در تکیه‌گاه پل‌ها بسیار شبیه به فرآیند آبشستگی در پایه پل‌ها است، با این تفاوت که لایه مرزی ناشی از دیواره کانال، وضعیت پیچیده‌تری را در جریان اطراف سازه نسبت به پایه‌های پل ایجاد می‌کند (ملویل، ۱۹۹۷). علاوه بر این، آزمایش‌های پژوهشگران مختلف، نشان داد که عمق آبشستگی در تکیه‌گاه‌ها کم‌تر از معادل آن در پایه‌های پل است که به دلیل اثرات لایه مرزی غالب شده ناشی از دیواره کانال است (کودیاری و رانگاراچو، ۲۰۰۱). جریان پایین‌رونده<sup>۱</sup> و گرداب اصلی<sup>۲</sup> در گوشه بالادست تکیه‌گاه پل، همراه با گرداب ثانویه<sup>۳</sup> و گرداب برخاستگی<sup>۴</sup> در قسمت میانی و گوشه انتهایی تکیه‌گاه پل، باعث ایجاد فعل و انفعال پیچیده‌ای بین سیال و مواد بستر می‌شود که دلیل اصلی آبشستگی در تکیه‌گاه پل‌ها است. در شکل ۱ فرآیند جریان و الگوی آبشستگی پیرامون تکیه‌گاه پل نشان داده شده است.



شکل ۱- فرآیند جریان و الگوی آبشستگی موضعی پیرامون تکیه‌گاه پل (به نقل از خزیمه‌نژاد، ۲۰۱۲).

- 1- Down Flow
- 2- Primary Vortex
- 3- Secondary Vortex
- 4- Wake Vortex

بررسی منابع نشان می‌دهد که در تعیین الگوی جریان پیرامون تکیه‌گاه پل، شکل مقطع پل در نظر گرفته نشده است و به صورت عمومی در خصوص میدان جریان پیرامون تکیه‌گاه پل صحبت شده است، البته در خصوص الگوی آبشستگی پیرامون تکیه‌گاه با اشکال مختلف بررسی‌هایی انجام شده است و این نکته به صراحت بیان گردیده که میزان آبشستگی موضعی در تکیه‌گاه‌ها بسته به شکل آن‌ها با هم متفاوت می‌باشد. مطالعات اینگلس (۱۹۴۹) در مورد تکیه‌گاه‌ها نشان داد که عمق آبشستگی در تکیه‌گاه‌ها به نسبت شکل انحنا و خمیدگی آن‌ها متغیر است. لیو و همکاران (۱۹۶۱) پی بردند که آبشستگی در تکیه‌گاه‌های بال‌دار، دو برابر آبشستگی در تکیه‌گاه‌های میان‌ریزشی<sup>۱</sup> است. پژوهش‌های لارسن و تاج (۱۹۵۶) نشان از تأثیر شکل تکیه‌گاه بر عمق آبشستگی و کاهش ۱۵ درصد برای تکیه‌گاه‌های آیرودینامیک داشت. راجاراتنام و نوچوکوا (۱۹۸۳)، مشاهده کردند که تنش برشی در دیواره ساحلی صفحه‌ای به مقدار ۱۴ درصد بیش‌تر از دیواره ساحلی دایره‌ای است (لی و همکاران، ۲۰۰۶). آزمایش‌های دانگل (۱۹۹۴) نشان داد که حداکثر عمق آبشستگی در تکیه‌گاه‌های با دیواره عمودی و کم‌ترین عمق آبشستگی در تکیه‌گاه‌های میان‌ریزشی با شیب ملایم اتفاق می‌افتد. فیلد (۱۹۷۱) و ملویل (۱۹۹۲) و دیگر پژوهشگران ضرایب و روابط مختلفی برای شکل تکیه‌گاه، برای طراحی بهتر پیشنهاد کردند. ملویل (۱۹۹۲، ۱۹۹۷) فاکتور شکل ( $K_s$ ) را برای بیان تأثیر شکل تکیه‌گاه روی عمق تعادل آبشستگی استفاده کرد. ملویل (۱۹۹۲) تأثیر طول تکیه‌گاه را بر عمق آبشستگی مورد بررسی قرار داد و نشان داد که با افزایش طول تکیه‌گاه، عمق آبشستگی افزایش می‌یابد. کایاترک (۲۰۰۵) تأثیر عدد فرود را بر میزان آبشستگی پیرامون تکیه‌گاه پل‌ها مورد بررسی قرار داد، آزمایش‌های وی در سه عدد فرود ۰/۲۰، ۰/۲۶ و ۰/۳۴ انجام گردید. نتایج نشان داد که با افزایش عدد فرود عمق آبشستگی افزایش می‌یابد. واقفی و همکاران (۲۰۱۰) در یک مطالعه آزمایشگاهی اثر عدد فرود جریان را بر الگوی آبشستگی پیرامون آبسکن مورد بررسی قرار دادند. نتایج آزمایش‌ها نشان داد که با افزایش عدد فرود جریان، بر میزان آبشستگی و ابعاد حفره آبشستگی افزوده می‌شود.

با توجه به این‌که شکل تکیه‌گاه بر روی میزان آبشستگی تأثیرگذار بوده و قطع به یقین و با استناد به منابع، الگوی آبشستگی کاملاً متأثر از میدان سه‌بعدی جریان یا به عبارت دیگر الگوی جریان پیرامون تکیه‌گاه می‌باشد، بنابراین در این پژوهش علاوه بر بررسی الگوی آبشستگی و بررسی تأثیر تعدادی از پارامترها بر میزان آن، الگوی جریان پیرامون تکیه‌گاه پل با شکل مستطیلی بیش‌ترین میزان آبشستگی را

دارد با استفاده از یک مدل آزمایشگاهی تعیین و عوامل مؤثر بر میزان و توسعه آبشستگی مورد بررسی قرار گرفت. در منابع در خصوص تعیین الگوی جریان و آبشستگی پیرامون تکیه‌گاه با شکل مستطیلی اشاره‌ای نشده است که از این نظر، پژوهش بر روی تکیه‌گاه مستطیلی نوآوری این پژوهش می‌باشد.

### مواد و روش‌ها

پارامترهای مؤثر بر حداکثر عمق آبشستگی در محل تکیه‌گاه پل را می‌توان با استفاده از رابطه ۱ بیان نمود.

$$f_1(B, L_a, B_a, \phi, d_s, y_s, V, g, y, \alpha, \rho, \rho_s - \rho, \mu) = 0 \quad (1)$$

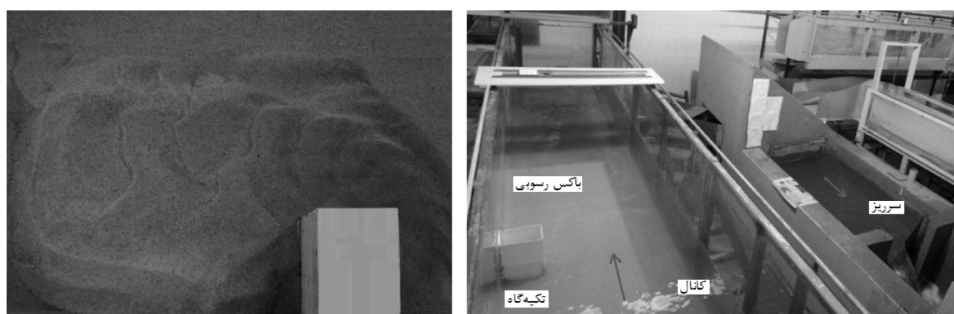
که در آن، پارامترها به ترتیب از سمت راست عرض کانال، طول، عرض و شکل تکیه‌گاه، قطر متوسط ذرات رسوب، حداکثر عمق چاله آبشستگی، سرعت متوسط جریان، شتاب ثقل، عمق جریان، زاویه برخورد جریان با تکیه‌گاه، جرم مخصوص آب، جرم مخصوص رسوب مستغرق و لزجت دینامیکی جریان می‌باشند. با استفاده از تحلیل ابعادی و استفاده از روش باکینگهام رابطه ۲ قابل ارایه است.

$$y_s / y = f_2(B / L_a, B_a / L_a, \phi, d_s / y, Fr, \alpha, Re, Gs) = 0 \quad (2)$$

که در آن،  $Re$ : عدد رینولدز و  $Gs$ : چگالی ذرات رسوب می‌باشد. از میان پارامترهای بالا عدد فرود و نسبت عرض به طول تکیه‌گاه به عنوان متغیر، تأثیرشان در  $y_s / y$  (عمق بی‌بعد آبشستگی) مورد بررسی قرار گرفت.

در این پژوهش عدد فرود از ۰/۱۵ تا ۰/۲۲ و نسبت عرض به طول تکیه‌گاه از ۰/۶ تا ۱/۵۶ متغیر بود. تعداد ۱۵ آزمایش این پژوهش در فلومی به طول ۸ متر، عرض ۱ متر، ارتفاع ۰/۶ متر و شیب ثابت ۰/۰۰۳ در آزمایشگاه هیدرولیک دانشگاه شهید چمران اهواز انجام شد. دیواره‌های کانال از جنس پلکسی‌گلاس و به ضخامت یک سانتی‌متر تشکیل شده‌اند. در فاصله ۲ متری از ابتدای فلوم، یک باکس فلزی قرار گرفته که طول، عرض و ارتفاع آن به ترتیب حدود ۲، ۰/۷ و ۰/۳ متر می‌باشد. این باکس از یک نمونه رسوب یکنواخت دارای چگالی ۲/۶۵ و قطر متوسط ۰/۷۶ میلی‌متر پر شده است به نحوی که پس از پر شدن در تراز بستر کانال قرار می‌گیرد. آب از طریق پمپ از مخزن زیرزمینی آزمایشگاه پمپاژ شده و به قسمت ابتدایی فلوم که بخش آرام‌کننده می‌باشد، هدایت می‌شود. در انتهای

فلوم دریچه کنترل جهت تنظیم عمق در رقوم مورد نظر قرار دارد. سپس آب وارد حوضچه آرامش می‌شود. در انتهای حوضچه آرامش، سرریز مثلثی ۵۳ درجه استاندارد قرار دارد که دبی جریان توسط آن اندازه‌گیری می‌شود. آب پس از عبور از سرریز، دوباره وارد مخزن زیرزمینی آزمایشگاه می‌شود و به این ترتیب یک جریان رفت و برگشتی در کل زمان آزمایش در فلوم برقرار می‌باشد. در این پژوهش از تکیه‌گاه مستطیلی با جنس ورق گالوانیزه و پارامتر طول بی‌بعد (نسبت عرض  $(B_a)$  به طول  $(L_a)$ )  $۰/۷۵$ ،  $۱$ ،  $۱/۲۴$  و  $۱/۵۶$  استفاده گردید. در شکل ۲ فلوم آزمایشگاهی نام‌برده به همراه مقطع آزمایش نشان داده شده است.



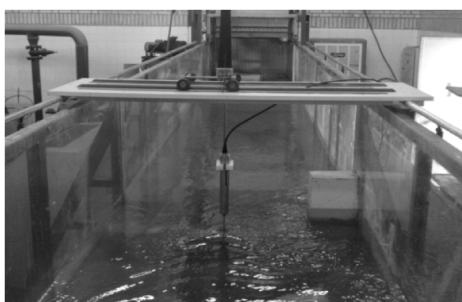
شکل ۲- الف) فلوم آزمایشگاهی مورد استفاده در این پژوهش و ب) مقطع آزمایش.

آزمایش‌های این پژوهش در شرایط آب زلال<sup>۲</sup> انجام شد، سرعت آستانه حرکت، مرز شرایط آب زلال و بستر زنده می‌باشد و بیش‌ترین میزان آبشستگی موضعی نیز در همین شرایط رخ می‌دهد. بنابراین ابتدا سرعت آستانه حرکت ذرات رسوب، بدون حضور تکیه‌گاه تعیین شد. یکی از روش‌های تعیین سرعت آستانه حرکت، استفاده از سرعت بحرانی است. سرعت بحرانی جریان با برقراری دبی ثابت و کاهش تدریجی عمق جریان، در چند مرحله محاسبه گردید. سرعت بحرانی با توجه به روش نام‌برده معادل  $۰/۲۸$  متر بر ثانیه تعیین شد، عدد فرود جریان در شرایط آستانه حرکت ذرات رسوب برابر  $۰/۲۳$  بود، بنابراین آزمایش‌ها در چهار عدد فرود  $۰/۲۲$ ،  $۰/۲۰$ ،  $۰/۱۸$  و  $۰/۱۵$  انجام شد. در این شرایط دبی به ترتیب برابر  $۴۰$ ،  $۳۶$ ،  $۳۲$  و  $۲۸$  لیتر بر ثانیه و و عمق جریان ثابت و برابر  $۰/۱۵$  متر بود.

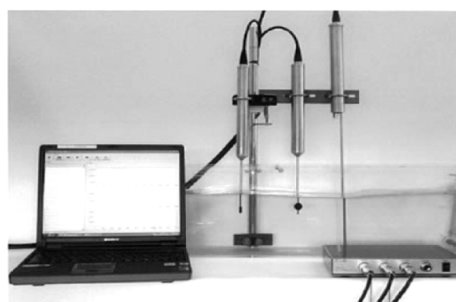
۱- بعد عمود بر جریان تکیه‌گاه به‌عنوان طول تکیه‌گاه نام‌گذاری گردید.

۲- در شرایط آب زلال، سرعت جریان کم‌تر از سرعت آستانه حرکت جریان می‌باشد.

در شروع هر آزمایش ابتدا فلوم با نرخ کم جریان پر می‌شود، این امر به این دلیل است که جلوی فرسایش ناشی از جریان ورقه‌ای در ابتدای آزمایش گرفته شود، سپس دبی آب به آرامی زیاد شده تا به دبی مورد نظر برسد، پس از تنظیم دبی توسط سرریز مثلی به وسیله دریچه کنترل، آب در عمق مورد نظر یعنی ۰/۱۵ متر قرار می‌گردد. سپس آزمایش به مدت زمان تعیین شده ادامه پیدا کرده و پس از اتمام آزمایش آب به آرامی از فلوم خارج می‌گردد. در انتها حداکثر عمق آبشستگی و الگوی رسوب‌گذاری ایجاد شده در اطراف تکیه‌گاه به وسیله متر لیزری برداشت می‌گردید. در بخش آزمایش‌های مربوط به تعیین الگوی جریان دوباره بر روی تکیه‌گاه با نسبت عرض به طول ۰/۶ که بالاترین میزان آبشستگی روی داد، آزمایشی در همان زمان و شرایط آزمایش‌های قبلی انجام و بستر رسوبی با استفاده از دوغاب سیمان تثبیت گردید و پس از تثبیت بستر، جریان با همان شرایط در فلوم برقرار و در نقاط مختلف پیرامون تکیه‌گاه مؤلفه‌های سه‌بعدی سرعت با استفاده از دستگاه سرعت‌سنج الکترومغناطیس برداشت و برای رسم و بررسی الگوی جریان مورد استفاده قرار گرفت. در شکل ۳ ابزار لازم برای اندازه‌گیری مؤلفه‌های سه‌بعدی سرعت و نحوه اندازه‌گیری سرعت نشان داده شده است.



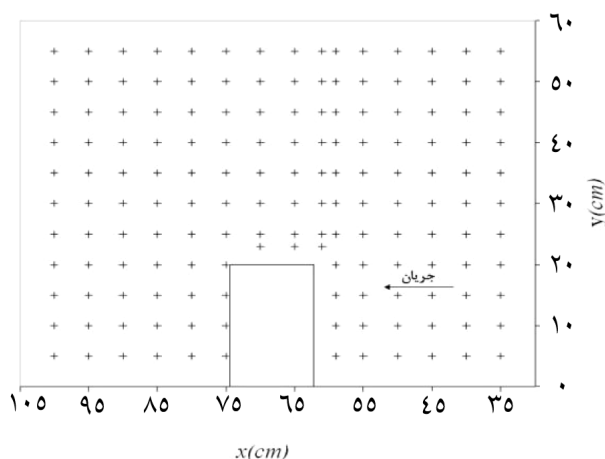
(ب)



(الف)

شکل ۳- الف) سرعت‌سنج الکترومغناطیس و تجهیزات مربوطه و  
ب) نحوه اندازه‌گیری سرعت بر روی بستر تثبیت شده به وسیله دوغاب سیمان.

مؤلفه‌های سه‌بعدی سرعت در ۵ عمق مختلف جریان برداشت شدند که شامل ۴، ۶/۵، ۹، ۱۱/۵ و ۱۴ سانتی‌متر از بستر اولیه فلوم می‌باشد. پلان شبکه برداشت نقاط اندازه‌گیری سرعت در یکی از اعماق جریان در شکل ۴ نشان داده شده است.



شکل ۴- موقعیت نقاط اندازه‌گیری مؤلفه‌های سه‌بعدی سرعت در یکی از اعماق جریان.

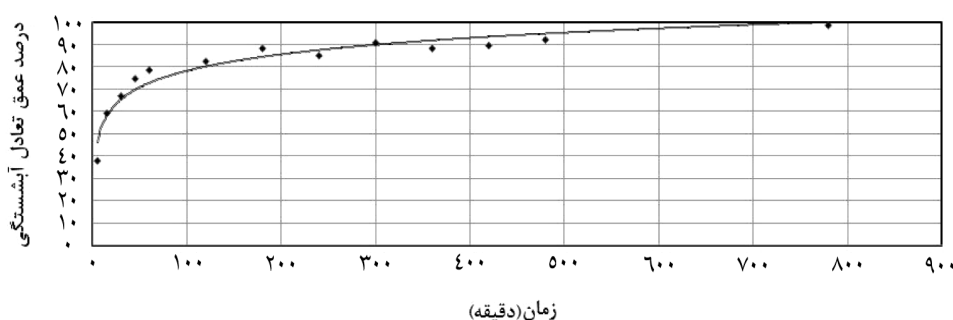
در هر نقطه بیش از ۵۰۰ سرعت مستمر در سه بعد توسط دستگاه ثبت شد. لازم به ذکر است در اعماق پایین به دلیل وجود پشته‌های رسوبی، امکان اندازه‌گیری در تعداد کمی از نقاط با محدودیت مواجه شده که با توجه به تپه‌های رسوبی و عدم وجود جریان در آن نقاط میزان سرعت صفر منظور گردید. به طور کلی در آزمایش‌های این مرحله در تعداد ۷۵۷ نقطه، بیش از یک میلیون مؤلفه سه‌بعدی سرعت ثبت گردید. همچنین، میانگین سرعت‌های مستمر در هر نقطه محاسبه شد. به این ترتیب در هر یک از نقاط مورد نظر، سه مؤلفه سرعت در سه بعد مختلف محاسبه و در بررسی الگوی جریان مورد استفاده قرار گرفت.

### نتایج و بحث

آزمایش‌های مرحله اول (تأثیر شرایط جریان بر میزان آبشستگی): در این پژوهش چهار آزمایش به مدت زمان ۱۳ ساعت در اعداد فرود ۰/۲۲، ۰/۲۰، ۰/۱۸ و ۰/۱۵ بر روی تکیه‌گاه با نسبت عرض به طول ۰/۶ انجام گردید. محدوده عدد فرود نام‌برده به گونه‌ای انتخاب گردید که شرایط آب زلال قابل تامین باشد. یکی از فرضیات این پژوهش، این بود که ۹۹ درصد عمق تعادل آبشستگی (عمق نهایی آبشستگی) در مدت زمان ۱۳ ساعت اتفاق می‌افتد در طول این مدت، در زمان‌های مختلف عمق



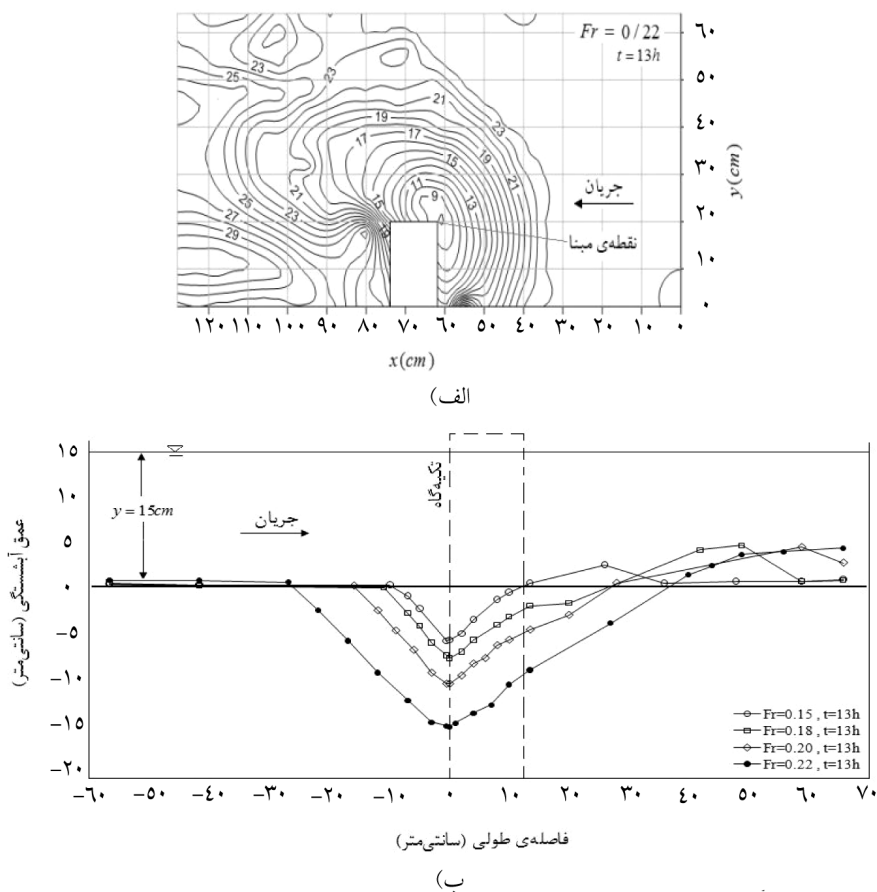
آبشستگی در نقطه مبنا (گوشه بالادست تکیه‌گاه) - که حداکثر عمق چاله آبشستگی در این نقطه اتفاق افتاد - برداشت گردید. نمونه‌ای از این نتایج در شکل ۵ نشان داده شده است. در این پژوهش الگوی رسوب‌گذاری و فرسایش به وسیله متر لیزری برداشت گردید.



شکل ۵- عمق آبشستگی در نقطه مبنا (گوشه بالادست تکیه‌گاه) در عدد فرود ۰/۲۲.

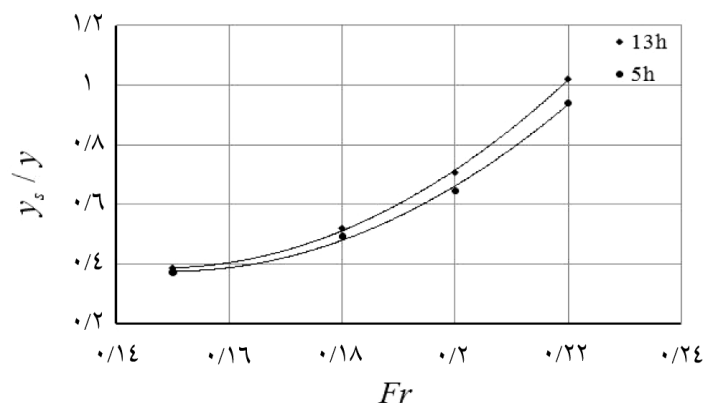
مطابق شکل ۵ در زمان‌های ابتدایی به سرعت بر عمق چاله آبشستگی افزوده می‌شود به طوری که در همان ساعت اول آزمایش حدود ۸۰ درصد عمق نهایی آبشستگی و ۲۰ درصد دیگر در ۱۲ ساعت باقی‌مانده اتفاق افتاد. در سایر اعداد فرود نیز وضعیت بر همین منوال بود با این تفاوت که با کاهش عدد فرود چاله آبشستگی زودتر به عمق نهایی آبشستگی نزدیک می‌شد. نکته قابل ذکر دیگر این است که توسعه چاله آبشستگی بر خلاف عمق آن کاملاً تدریجی بود و تفاوت محسوسی در روند توسعه چاله آبشستگی در زمان‌های مختلف مشاهده نگردید. در شکل ۶ الگوی فرسایش و رسوب‌گذاری در عدد فرود ۰/۲۲ و همچنین پروفیل رسوبات بستر پیرامون تکیه‌گاه در شرایط مختلف جریان پس از زمان ۱۳ ساعت نشان داده شده است.

مطابق شکل ۶ حداکثر عمق چاله آبشستگی در گوشه بالادست تکیه‌گاه که به‌عنوان نقطه مبنا نام‌گذاری گردید، اتفاق افتاده است. چاله آبشستگی به سمت بالادست نیز توسعه یافته و با افزایش عدد فرود بر وسعت چاله افزوده می‌شود.



شکل ۶- الف) الگوی فرسایش و رسوب‌گذاری پیرامون تکیه‌گاه در عدد فرود ۰/۲۲ و ب) پروفیل رسوبات بستر پیرامون تکیه‌گاه در شرایط مختلف جریان.

در آزمایش‌های ۱۳ ساعته ۹۱، ۹۲، ۹۴ و ۹۶ درصد عمق تعادل آبشستگی به ترتیب در اعداد فرود ۰/۲۲، ۰/۲۰، ۰/۱۸ و ۰/۱۵ اتفاق افتاد، بنابراین مدت زمان ۵ ساعت به‌عنوان زمان آزمایش، برای آزمایش‌های بعدی (آزمایش‌های مربوط به بررسی تأثیر پارامتر طول بی‌بعد تکیه‌گاه بر آبشستگی پیرامون آن و تعیین میدان سه‌بعدی جریان پیرامون تکیه‌گاه) انتخاب گردید. در شکل ۷ عمق بی‌بعد آبشستگی (عمق آبشستگی به عمق جریان) در نقطه مبنا در مقابل عدد فرود در دو زمان ۱۳ و ۵ ساعت نشان داده شده است.



شکل ۷- عمق آبشستگی در نقطه مبنا در مقابل عدد فرود در دو زمان ۵ و ۱۳ ساعت.

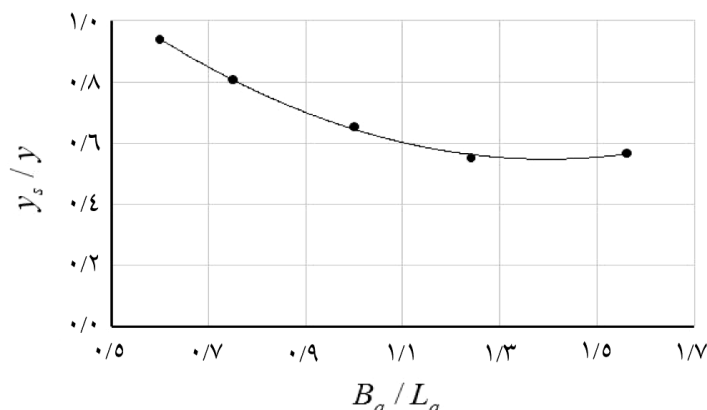
رابطه‌های ۳ و ۴ به ترتیب روابط رگرسیونی دو پارامتر عمق بی‌بعد آبشستگی و عدد فرود را در دو زمان ۱۳ و ۵ ساعت نشان می‌دهد که از ضراب همبستگی بالایی نیز برخوردار می‌باشند.

$$y_s / y = 121/2(Fr)^2 - 35/9(Fr) + 3 \quad R^2 = 0/999 \quad (3)$$

$$y_s / y = 112/6(Fr)^2 - 33/7(Fr) + 2/9 \quad R^2 = 0/997 \quad (4)$$

مطابق شکل ۷ و رابطه‌های ۳ و ۴ با کاهش عدد فرود عمق بی‌بعد آبشستگی کاهش یافته و همین‌طور از فاصله بین دو منحنی کاسته می‌شود که نشان‌دهنده این است که در اعداد فرود پایین و یا به عبارتی سرعت‌های پایین جریان، عمق چاله آبشستگی در زمان کم‌تری به تعادل می‌رسد. البته با گذشت زمان بر وسعت چاله آبشستگی، حتی در اعداد فرود پایین نیز افزوده می‌شود، علی‌رغم این‌که عمیق شدن چاله آبشستگی متوقف می‌گردد.

آزمایش‌های مرحله دوم (تأثیر ابعاد تکیه‌گاه بر میزان آبشستگی پیرامون آن): در مرحله دوم آزمایش‌ها، تأثیر ابعاد تکیه‌گاه بر میزان آبشستگی پیرامون تکیه‌گاه مورد بررسی قرار گرفت. آزمایش‌های این مرحله در مدت زمان ۵ ساعت و در عدد فرود ۰/۲۲ که بیش‌ترین میزان آبشستگی در آن اتفاق می‌افتاد، انجام گردید. در شکل ۸ تأثیر ابعاد تکیه‌گاه بر میزان عمق آبشستگی در نقطه مبنا نشان داده شده است.



شکل ۸- تأثیر ابعاد تکیه‌گاه بر میزان عمق آبشستگی در نقطه مبنا.

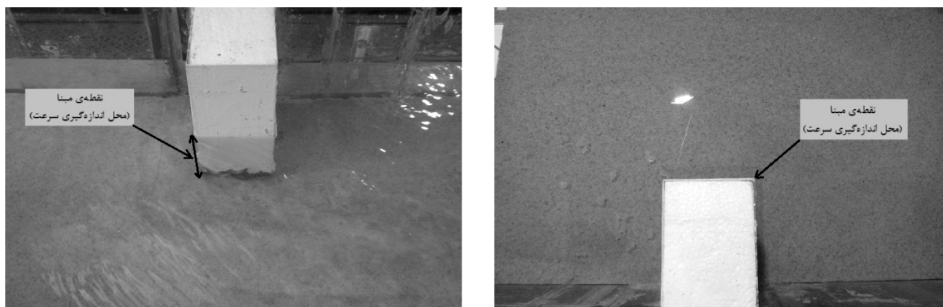
رابطه ۵، رابطه رگرسیونی بین دو پارامتر عمق بی‌بعد آبشستگی و طول بی‌بعد تکیه‌گاه را نشان می‌دهد که از ضریب همبستگی بالایی برخوردار می‌باشد.

$$y_s / y = 0.62(B_a / L_a)^2 - 1.74(B_a / L_a) + 1.76 \quad R^2 = 0.998 \quad (5)$$

مطابق شکل ۸ و رابطه ۵ هرچه میزان پارامتر طول بی‌بعد تکیه‌گاه افزایش یابد، در ابتدا از میزان عمق آبشستگی کاسته شده، اما پس از آن، افزایش پارامتر نام‌برده تأثیری در میزان عمق آبشستگی ندارد. این نکته در حقیقت نشان‌دهنده این است که طول تکیه‌گاه که بعد عمود بر جریان می‌باشد در مقایسه با عرض تکیه‌گاه، تأثیر بیشتری بر آبشستگی پیرامون آن دارد، مطابق شکل ۸ بیش‌ترین میزان آبشستگی پیرامون تکیه‌گاه در طول بی‌بعد ۰/۶ اتفاق افتاد، بنابراین آزمایش‌های مرحله سوم نیز در حضور این تکیه‌گاه انجام گردید.

آزمایش‌های مرحله سوم (آزمایش‌های سرعت‌سنجی و تعیین الگوی جریان پیرامون تکیه‌گاه مستطیلی): در این بخش ابتدا مؤلفه‌های سه‌بعدی سرعت جریان در اعماق مختلف جریان در نقطه مبنا (گوشه بالادست تکیه‌گاه) تعیین گردید و پس از آن مؤلفه‌های سه‌بعدی سرعت جریان پیرامون تکیه‌گاه در چند عمق مختلف برداشت و برای رسم و بررسی میدان سه‌بعدی جریان پیرامون تکیه‌گاه مورد استفاده قرار گرفتند.

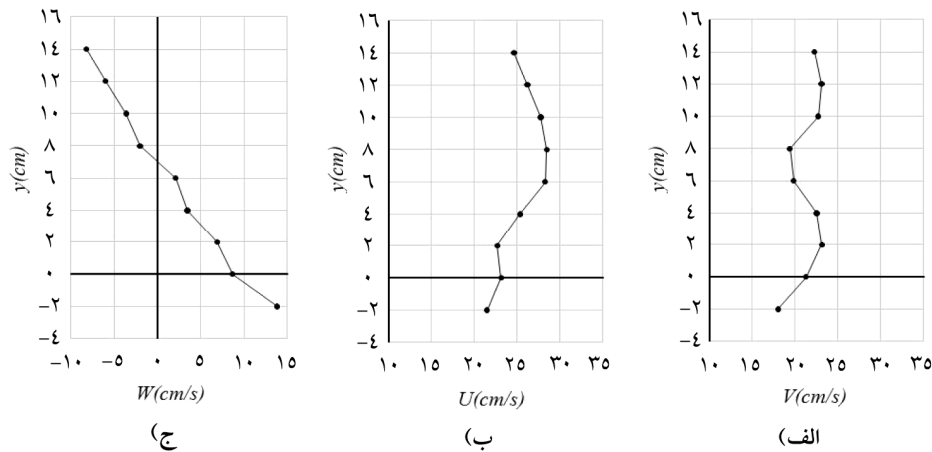
بررسی پروفیل عمقی مؤلفه‌های سرعت در نقطه مبنا: با توجه به این‌که در آزمایش‌های آبشستگی از نقطه مبنا (گوشه بالادست تکیه‌گاه) شروع شده و به تدریج بر عمق و حجم چاله آبشستگی در این نقطه افزوده می‌شود، بنابراین این نقطه و عمق آبشستگی ایجاد شده در آن اهمیت زیادی دارد. برای بررسی توزیع سرعت در این نقطه، مؤلفه‌های سه‌بعدی سرعت در اعماق مختلف از سطح آب تا نزدیک کف چاله آبشستگی اندازه‌گیری شدند. در شکل ۹ محل اندازه‌گیری سرعت (نقطه مبنا) و در شکل ۱۰ پروفیل سرعت‌های طولی، عرضی و عمقی نشان داده شده است.



(ب)

(الف)

شکل ۹- محل اندازه‌گیری سرعت (الف) پلان و (ب) از نمای مقابل.



(ج)

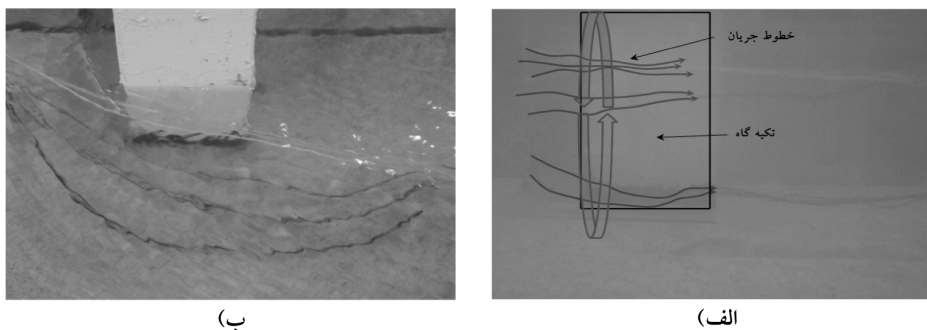
(ب)

(الف)

شکل ۱۰- پروفیل سرعت در نقطه مبنا (گوشه بالادست تکیه‌گاه)

(الف) سرعت طولی، (ب) سرعت عرضی و (ج) سرعت عمقی.

در شکل ۹،  $U$ ،  $V$  و  $W$  به ترتیب مؤلفه‌های طولی، عرضی و عمقی سرعت جریان و  $\lambda$  عمق جریان می‌باشد. با توجه به شکل ۱۰ کاملاً مشخص است که بیش‌ترین مقدار سرعت مربوط به سرعت عرضی می‌باشد که به حدود ۲۹ سانتی‌متر بر ثانیه هم می‌رسد، البته این سرعت در کف کاهش یافته و به حدود ۲۲ سانتی‌متر بر ثانیه می‌رسد. در خصوص سرعت عمقی نیز همان‌طور که ملاحظه می‌شود، از سطح آب تا عمق حدود ۷ سانتی‌متری یک جریان روبه پایینی شکل می‌گیرد که به تدریج از میزان سرعت آن کاسته می‌شود و در عمق ۷ سانتی‌متری مقدار سرعت صفر می‌شود و سپس جهت آن عوض شده و جریان رو به بالا شکل می‌گیرد. این نکته بیانگر وجود یک گرداب عمودی در نزدیک بستر در نقطه مبنا می‌باشد. این گرداب که در حقیقت بخشی از گرداب‌های اولیه شکل‌گرفته پیرامون تکیه‌گاه می‌باشد، باعث اعمال نیروی بالا برنده بر ذرات رسوب و جدا کردن آن‌ها از گوشه بالادست تکیه‌گاه می‌شود، وجود جریان پرسرعت عرضی و طولی نیز باعث می‌شود که ذرات رسوب بلند شده از بستر، در اختیار جریان عمومی کانال قرار گرفته و به این ترتیب آبستگي سریع در این نقطه را به وجود می‌آورند. در شکل ۱۱ پراکندگی خطوط جریان که ناشی از تلاطم به وجود آمده در اثر گرداب‌های پیرامون تکیه‌گاه می‌باشد، نشان داده شده است.

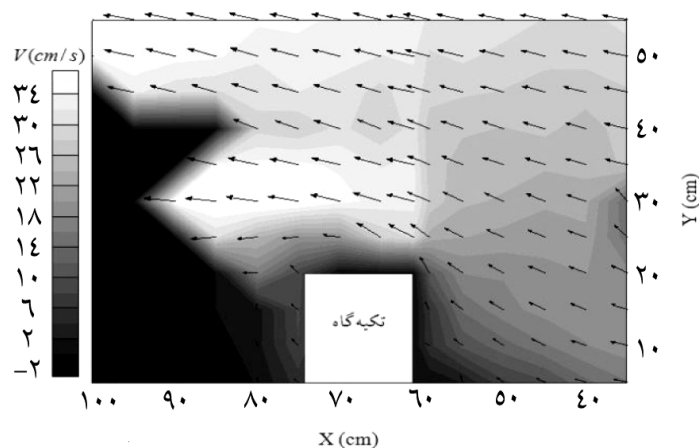


شکل ۱۱- الف) پراکندگی خطوط جریان در اثر گرداب ایجاد شده در نقطه مبنا از نمای مقابل و ب) انحراف خطوط جریان در اثر ایجاد سرعت عرضی از نمای بالا.

وجود گرداب عمودی در نقطه مبنا سبب شده که خطوط جریان در لایه‌های بالایی و پایینی جریان فشرده‌تر شوند. همچنین مطابق شکل ۱۱- ب خطوط جریان پس از عبور از مقابل تکیه‌گاه، به سمت پشت تکیه‌گاه تمایل پیدا می‌کنند، در حقیقت به دلیل سرعت پایین جریان در این منطقه و حتی

برگشت جریان در بعضی از لایه‌ها، گرداب‌های افقی شکل می‌گیرند- که در منابع با عنوان گرداب‌های برخاستگی شناخته می‌شوند- این گرداب‌های پتانسل رسوب‌گذاری دارند و به همین دلیل است که تپه‌های رسوبی در این منطقه نهشته می‌شوند.

**بررسی الگوی جریان در نیم‌رخ‌های عمودی پیرامون تکیه‌گاه:** در شکل ۱۲ میدان جریان اطراف تکیه‌گاه در عمق ۴ سانتی‌متری از بستر کانال از نمای بالا با استفاده از نرم‌افزار تک‌پلات<sup>۱</sup> ترسیم شده است. بردارها در حقیقت نشان‌دهنده خطوط جریان می‌باشند. مطابق راهنمای شکل، هرچه زمینه تصویر تیره‌تر شود نشان‌دهنده کاهش میزان سرعت می‌باشد که این وضعیت در پایین‌دست تکیه‌گاه اتفاق افتاده است. در این محدوده، سرعت کاملاً کاهش یافته و حتی میل به برگشت جریان بر خلاف جهت جریان عمومی کانال نیز مشاهده می‌شود. همچنین در پایین‌دست تکیه‌گاه وجود تپه‌های رسوبی نهشته شده، الگوی جریان را به‌ویژه نزدیک بستر رسوبی تغییر داده است.

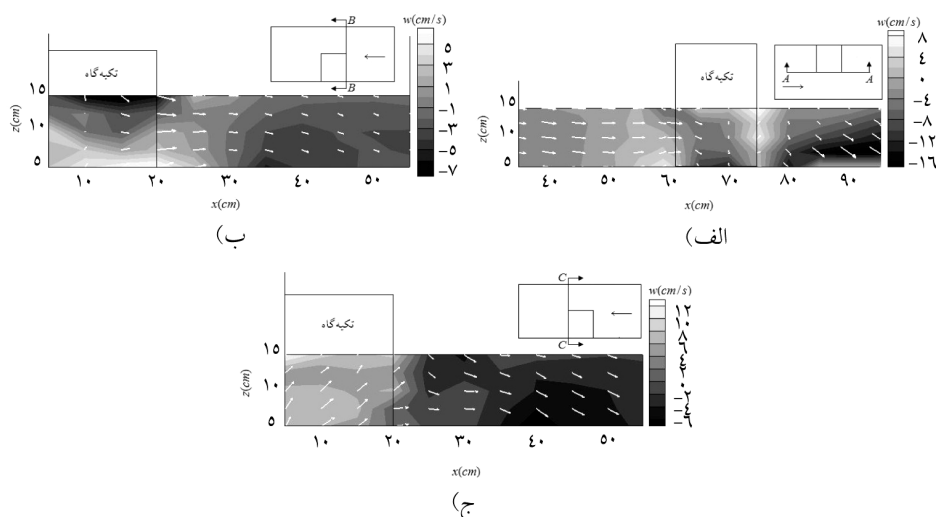


شکل ۱۲- میدان جریان اطراف تکیه‌گاه در عمق ۴ سانتی‌متری در آزمایش‌های مرحله سوم.

مطابق شکل ۱۲ جریان قبل از رسیدن به تکیه‌گاه به سمت محور کانال منحرف شده و در قسمت بالادست تکیه‌گاه یک منطقه کم‌سرعت شکل می‌گیرد که البته تا حد زیادی تحت‌تأثیر جداره کانال نیز می‌باشد. در گوشه بالادست تکیه‌گاه (نقطه مبنا) یک جریان پرسرعت عرضی شکل می‌گیرد. در منطقه پیشانی تکیه‌گاه نیز یک منطقه با جریان راکد شکل می‌گیرد که متأثر از دیواره تکیه‌گاه می‌باشد. در قسمت

1- Tecplot

پایین دست تکیه‌گاه نیز جریان‌های برگشتی و گردابه‌های افقی مشاهده می‌شود. همان‌گونه که قبلاً اشاره گردید، گردابه‌های افقی بر خلاف گردابه‌های عمودی پتانسیل رسوب‌گذاری دارند و تأثیر به‌سزایی در شکل‌گیری تپه‌های رسوبی در بخش پایین دست تکیه‌گاه دارند. مطابق شکل ۱۲، سرعت طولی جریان هنگام رسیدن به تکیه‌گاه کاهش می‌یابد، طبق معادله انرژی، به دلیل این‌که رژیم جریان زیربحرانی بوده و با اتمسفر در تماس می‌باشد، کاهش سرعت جریان با افزایش عمق جبران می‌شود، از آنجایی‌که سرعت از سطح آب به طرف کف کم می‌گردد، فشار دینامیکی روی قسمت جلوی تکیه‌گاه نیز از بالا به پایین کم می‌شود و گردادین فشار ایجاد شده باعث ایجاد جریانی به طرف کف می‌شود، مکانیزم نام‌برده در اشکال ۱۳-الف و ۱۳-ب نشان داده شده است. این جریان روبه پایین، پس از برخورد با بستر، آن را حفر کرده و به جهات مختلف پراکنده می‌کند. مقداری از این جریان که رو به سمت بالادست بازگشت می‌کند، در برخورد با جریان عمومی مجبور به حرکت در جهت جریان می‌شود. این چرخش جریان و بازگشت مجدد آن، باعث گرداب نعل اسبی (گرداب اولیه) می‌شود. به این ترتیب حرکت جریان رو به پایین، باعث ایجاد حفره‌ای در قسمت جلوی تکیه‌گاه می‌شود و با تشکیل این حفره، گرداب اولیه در آن تشکیل می‌شود، گرداب اولیه هم به سبب تنشی که به کف وارد می‌کند و هم اعمال نیروی بالابرنده (به‌خاطر مؤلفه سرعت رو به بالا) به ذرات کف، باعث جدا شدن ذرات از کف بستر می‌شود و آن‌ها را در اختیار جریان عمومی آبراهه، قرار داده تا به سمت پایین دست حمل شوند.



شکل ۱۳- میدان جریان اطراف تکیه‌گاه در نیم‌رخ الف (A-A) ب (B-B) و ج (C-C).



مطابق شکل ۱۳- الف جریان نزدیک سطح آب، رو به پایین حرکت کرده و در نزدیک بستر پس از برخورد به کف به سمت جهت جریان اصلی کانال منحرف می‌شود و به عبارتی گرداب اولیه شکل می‌گیرد. جریان رو به پایین و گرداب اولیه از عوامل اساسی شروع و توسعه آبستگي پیرامون تکیه‌گاه پل می‌باشد. در شکل ۱۳- ب الگوی جریان در نیم‌رخ (B-B) رسم شده است. در این نیم‌رخ وجود جریان رو به پایین و گرداب اولیه شکل گرفته در قسمت جلوی تکیه‌گاه مشخص می‌باشد. در شکل ۱۳- ج الگوی جریان در نیم‌رخ (C-C) رسم شده است. گرداب برخاستگی در شکل کاملاً نمایان است. مؤلفه‌های روبه بالای سرعت باعث کنده شدن ذرات از بستر می‌شود. گرداب برخاستگی در حقیقت مانند یک گردباد عمل کرده که رسوبات را از سطح بستر مکیده و در اختیار جریان عمومی کانال قرار می‌دهد و این رسوبات در جایی که نیروهای هیدرودینامیکی برای جابجایی آن‌ها غالب نباشند، نهشته می‌شوند. که معمولاً این اتفاق کمی پایین‌دست تکیه‌گاه و نزدیک دیواره کانال اتفاق می‌افتد.

### نتیجه‌گیری کلی

در این پژوهش با استفاده از مدل آزمایشگاهی و سرعت‌سنج سه‌بعدی الکترومغناطیس، الگوی آبستگي و همین‌طور الگوی جریان پیرامون تکیه‌گاه با شکل مستطیلی که بیش‌ترین میزان آبستگي را در بین اشکال دیگر دارد بررسی و ترسیم گردید و عوامل مؤثر بر شروع و توسعه آبستگي مورد بررسی قرار گرفتند. همچنین تأثیر عدد فرود و پارامتر طول بی‌بعد تکیه‌گاه بر میزان آبستگي پیرامون آن نیز مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که با افزایش عدد فرود و کاهش طول بی‌بعد تکیه‌گاه میزان آبستگي پیرامون آن افزایش می‌یابد. به گونه‌ای که با افزایش عدد فرود از ۰/۱۵ به ۰/۲۲ عمق بی‌بعد آبستگي در زمان ۱۳ ساعت از ۰/۳۸ به ۰/۰۲ و در زمان ۵ ساعت از ۰/۳۷ به ۰/۹۴ افزایش یافت. نتایج این پژوهش با نتایج کایاترک (۲۰۰۵) و واقفی و همکاران (۲۰۱۰) که نشان داده بودند با افزایش عدد فرود عمق آبستگي پیرامون تکیه‌گاه و آبشکن افزایش می‌یابد، مطابقت دارد. همچنین در عدد فرود ۰/۲۲ و مدت زمان ۵ ساعت، کاهش طول بی‌بعد تکیه‌گاه (عرض تکیه‌گاه به طول آن) از مقدار ۱/۵۶ به ۰/۶ عمق بی‌بعد آبستگي را از مقدار ۰/۵۶ به ۰/۹۴ افزایش داد. نتایج پژوهش‌های ملویل (۱۹۹۲) نیز بیانگر افزایش عمق آبستگي در برابر طول تکیه‌گاه بوده است که با نتایج این پژوهش همخوانی دارد. همچنین نتایج این پژوهش بیانگر تأثیر جریان رو به پایین و گرداب‌های ایجاد شده در محدوده تکیه‌گاه پل با شکل مستطیلی بر شروع و توسعه آبستگي پیرامون آن می‌باشد.

منابع

1. Dongol, D.M.S. 1994. Local scour at bridge abutments. Report No. 544. University of Auckland, School of T, Engineering, Department of Civil Engineering Private Bag, Auckland, New Zealand.
2. Field, W.G. 1971. Flood protection at highway bridge openings. University of Newcastle, N.S.W. Engineering Bulletin CE3.
3. Hoffmans, G.J., and Verheij, H.J. 1997. Scour manual. 5<sup>th</sup> edition, London. Balkema Publishing. 205p.
4. Inglis, C.C. 1949. The behavior and control of rivers and canals. Research Publication. No. 13. Parts I and II, Central Waterpower Irrigation and Navigation Research Station, Poona, India.
5. Kandasamy, J.K. 1989. Abutment scour. Rep. No. 458. School of Engrg, University of Auckland, Auckland. New Zealand.
6. Kayaturk, S.Y. 2005. Scour and scour protection at bridge abutment. Ph.D. Thesis, Middle East Technical University. 239p.
7. Khademi, Kh., Khozaymeh-Nezhad, H., and Shafaei Bejestan, M. 2011. High extraction of river material in Khozestan province is the main factors of bridge abutment scour. 3<sup>rd</sup> Irrigation and Drainage Network Management National Conference (IDNC). Shahid Chamran University.
8. Khozaymeh-Nezhad, H. 2012. Investigation of the effect of dimension and position of collar on local scour in abutment of bridge. Ph.D. Thesis, Shahid Chamran University. 167p.
9. Kothiyari, U.C., and Ranga Raju, K.G. 2001. Scour Around Spur Dikes and Bridge Abutment. J. Hydr. Res. 39: 4. 367-374.
10. Kwan, F. 1988. Study of Abutment Scour. Report No. 451. University of Auckland, School of T. Engineering, Department of Civil Engineering Private Bag, Auckland, New Zealand.
11. Laursen, E.M., and Toch, A. 1956. Scour around bridge piers and abutments. Iowa Highway Research Board Bulletin, No. 4.
12. Li, H., Barkdoll, B.D., Kuhnle, R., and Alonso, C. 2006. Parallel Walls as an Abutment Scour Countermeasure. J. Hydr. Engin. 132: 5. 510-520.
13. Liu, M.K., Chang, F.M., and Skinner, M.M. 1961. Effect of bridge construction on scour and backwater. Report No. CER60-HKL22, Department of Civil Engineering, Colorado State University, Fort Collins, Colorado.
14. Melville, B.W. 1992. Local Scour at Bridge Abutments. J. Hydr. Engin. ASCE. 118: 4. 615-631.
15. Melville, B.W. 1997. Pier and Abutment Scour an Integrated Approach. J. Hydr. Engin. ASCE. 123: 2. 125-136.
16. Rajaratnam, N., and Nwachukwu, B.A. 1983a. Flow near groin-like structures. J. Hydr. Engin. ASCE. 109: 3. 463-480.

17. Vaghefi, M., GHodsiyan, M., and Salehi Neyshabouri, S.A. 2010. Laboratory investigations of froud number on scour pattern around T eppi on 90 degree bend. The 8th. International congress of civil eng. Shiraz University.
18. Wong, W.H. 1982. Scour at Bridge Abutments. Report No. 275, Dcept.of Civil Engineering, University of Auckland, Auckland, New Zealand.



Gorgan University of Agricultural  
Sciences and Natural Resources

*J. of Water and Soil Conservation, Vol. 22(1), 2015*  
<http://jwsc.gau.ac.ir>

## **Laboratory investigation of flow pattern and scour around bridge abutment with rectangular section**

**\*H. Khozaymehnezhad<sup>1</sup>, M. Ghomeshi<sup>2</sup>, M. Shafai-Bejestan<sup>2</sup>  
and Y. Ramezani<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>Assistant Prof., Dept. of Water Engineering, University of Birjand,

<sup>2</sup>Professor, Dept. of Water Structure, Shahid Chamran University of Ahwaz

Received: 09/16/2013; Accepted: 03/02/2014

### **Abstract**

Already various studies have been done on the mechanism of scour around hydraulic structures especially bridges. In the field of scour around bridges, researches are more focused on scour of piers in comparison with abutments. While the review of available information on the bridge required cost, the major problems are related to abutment. Therefore most costs have to be spent in this regard. Literature review shows that abutment form has considerable impact on the scour depth around it. Among various abutment forms, the maximum scour depth occurs in the case of rectangular abutment. Therefore in this research rectangular form for abutment was selected and the effects of froude number and non dimensional abutment length (Width to length ratio) were investigated on scour development. Result shows, that increasing froude number and decreasing non dimensional abutment length, will increase the amount of scour. Following this research, three-dimensional components of velocities were determined with electromagnetic velocimeter and then used for drawing flow pattern. Result shows, that vertical vortex in upstream corner of abutment are an effective factor on maximum depth of scour at this point. Also result confirms that ,down flow and generated vortex are effective parameters on abutment bridge scour.

**Keywords:** Flow pattern, Laboratory model, Scour, Bridge abutment

---

\* Corresponding Author; Email: [hkhkozaymeh@birjand.ac.ir](mailto:hkhozaymeh@birjand.ac.ir)