



ساختار جریان و آبستگي موضعي در اطراف پایه‌های پل تکی و دوتایی

علیرضا کشاورزی^{۱*}، حسین حمیدی فر^۲ و لیلا خواجانه‌نوری^۳

^{۱*} - نویسنده مسئول، استاد، بخش مهندسی آب، دانشگاه شیراز، keshavrz@shirazu.ac.ir

^۲ - استادیار سازه‌های آبی، بخش مهندسی آب، دانشگاه شیراز.

^۳ - کارشناس ارشد سازه‌های آبی، بخش مهندسی آب، دانشگاه شیراز.

پذیرش: ۱۳۹۶/۱۱/۲

بازنگری: ۱۳۹۶/۱۰/۲۹

دریافت: ۱۳۹۶/۷/۳۰

چکیده

در این تحقیق به بررسی آزمایشگاهی ساختار جریان در اطراف پایه‌های پل استوانه‌ای پرداخته شده است. به منظور بررسی اثر فاصله پایه‌های پل بر آبستگي و ساختار جریان پیرامون پایه، آزمایش‌هایی در حالت‌های تک پایه و دو پایه با دو فاصله متفاوت نسبت به هم در یک فلوم آزمایشگاهی به طول ۱۵، عرض ۰/۷ و ارتفاع ۰/۶ متر انجام شده است. مؤلفه‌های طولی، عرضی و عمقی سرعت متوسط جریان در حفره آبستگي پیرامون پایه‌ها در شبکه‌ای از نقاط در چهار عمق ۱۰، ۱۵، ۲۰ و ۲۵ میلیمتری از بستر فرسایش یافته با استفاده از یک دستگاه سرعت‌سنج سه‌بعدی صوتی داپلر اندازه‌گیری گردید. بر اساس اطلاعات به دست آمده، تغییرات مؤلفه‌های سرعت در سه مقطع مختلف به تفصیل مورد بحث قرار گرفته است. نتایج نشان می‌دهد که اثر متقابل دو پایه با فاصله کم روی یکدیگر باعث تشدید فرآیند آبستگي در فاصله بین دو پایه و محل پایه دوم گردیده است. همچنین افزایش تعداد پایه‌ها منجر به توسعه عرضی حفره آبستگي و در نتیجه افزایش حجم گودال آبستگي شده است. از طرفی دیگر، تغییرات سرعت و تغییرات شکل حفره روند مشابهی را دنبال می‌کنند. به طور کلی نتایج نشان‌دهنده تأثیر قابل توجه فاصله بین پایه‌ها بر میدان جریان و آبستگي موضعی بستر است که بایستی در مرحله طراحی به دقت مورد توجه قرار گیرد. همچنین، مقایسه‌ای بین دقت برخی مدل‌های متداول در برآورد حداکثر عمق آبستگي در اطراف پایه‌های تکی و دوتایی انجام شده است.

کلید واژه‌ها: فرسایش، رسوب، رودخانه، سرعت جریان، سیلاب.

مقدمه

دست آمده تقریباً ۱/۶ و ۳/۳ برابر مقادیرشان در ناحیه جریان آزاد در بالادست بود. Zarrati et al. (2006) در بررسی تأثیر طوقه و سنگجین بر کاهش آبستگي اطراف پایه‌های پل، مشاهده کردند که این روش می‌تواند تا ۶۰ درصد عمق آبستگي را کاهش دهد.

Alamatiان و Jafarzadeh (2008) میزان بالا آمدگی جریان در برخورد با پایه پل با شکل‌های مختلف را به صورت عددی بررسی کردند. همچنین Raeisi و Ghomeshi (2014) نتیجه گرفتند که با کاهش قطر دانه‌بندی رسوب بستر، زمان رسیدن به حداکثر میزان عمق آبستگي اطراف پایه پل افزایش می‌یابد. Ranjkesh (2010) ضمن بررسی توسعه‌ی زمانی عمق آبستگي، تأثیر ساختار جریان در آبستگي گروه پایه‌های استوانه‌ای را بررسی نمود. نتایج آزمایش‌های وی نشان داد، عامل حفاظ بودن پایه‌های بالادست باعث کاهش عمق آبستگي در پایه‌های پایین‌دست شده است ولی با افزایش فاصله‌ی بین پایه‌ها این عامل کاهش می‌یابد. Houshmand et al. (2014) جریان اطراف پایه پل در بسترهای پیچانرودی را به صورت عددی مورد بررسی قرار دادند. این محققین مشاهده

برای یافتن اطلاعاتی کامل درباره فرآیندهای فیزیکی مؤثر بر آبستگي پایه‌های پل، پژوهش‌های زیادی انجام شده و در آنها پارامترهای متفاوتی از جریان، هندسه و مصالح بستر در نظر گرفته شده است. نتایج این پژوهش‌ها نشان می‌دهد که پیش‌بینی دقیق آبستگي پیرامون پایه‌های پل مستلزم درکی صحیح از ساختار جریان متلاطم و مکانیزم انتقال رسوبات می‌باشد. بررسی ساختار جریان در حفره آبستگي تشکیل شده پیرامون پایه‌های پل برای نخستین بار توسط Melville و Raudkivi (1977) انجام شد. Richardson و Panchang (1998) یک مدل سه‌بعدی دینامیک سیالات محاسباتی برای شبیه‌سازی جریان نزدیک یک پایه پل و انتقال رسوبات را ارائه دادند. نتایج این شبیه‌سازی عددی با مشاهدات آزمایشگاهی Melville و Raudkivi (1977) مقایسه شد و هر دو سری نتایج از لحاظ کیفی و کمی با هم بسیار تطابق داشتند. بررسی‌های Barbhuiya و Dey (2004) بیانگر وجود یک جریان گردابی اولیه همراه با یک جریان روبه پایین در نزدیکی استوانه می‌باشد. علاوه بر این، در جلو استوانه، سرعت و تنش‌های برشی کف به

و مقطع عرضی مستطیل شکل می‌باشد که شیب طولی آن قابل تغییر است. برای اندازه‌گیری دبی جریان از سرریز لبه تیز مثلثی ۹۰ درجه واسنجی شده که در انتهای فلوم و در مخزن خروجی تعبیه گردیده بود استفاده شد. عمق مورد نظر جهت انجام هر آزمایش بوسیله یک سرریز در انتهای فلوم تنظیم گردید.

در وسط فلوم، بازه‌ای به طول ۲ و ضخامت ۰/۱۲ متر با رسوب پر شده و مدل‌های پایه مورد بررسی در وسط آن قرار داده می‌شد. مدل‌های استفاده شده شامل سه مدل پایه استوانه‌ای با قطر خارجی ۵۰ میلی‌متر از جنس آهن گالوانیزه بود. برای پرهیز از اثر جریان جانبی به وسیله دیواره‌های روی آبشستگی موضعی اطراف پایه، Raudkivi و Ettema (1983) حداکثر نسبت عرض پایه به عرض کانال را $1:6/26$ بیان کرده‌اند. در این پژوهش برای اطمینان بیشتر، این نسبت برابر با $1:14$ در نظر گرفته شد. برای حذف تأثیر اندازه ذرات بر عمق آب شستگی موضعی، بر اساس نظر Raudkivi و Ettema (1983) نسبت قطر پایه به میانگین اندازه رسوبات باید بیشتر از ۵۰ باشد. رسوبات مورد استفاده دارای قطر میانگین برابر میلی‌متر $d_{50} = 0/63$ ، ضریب یکنواختی $1/58$ و مقدار انحراف معیار هندسی نیز برابر $1/03$ می‌باشد که با معیار مذکور هم‌خوانی دارد.

بر اساس بررسی‌های Raudkivi و Ettema (1983) شرایط آبشستگی آب زلال در $U \leq 0.95U_c$ برقرار می‌شود که U_c سرعت متوسط جریان و U_c سرعت بحرانی می‌باشد. ولی بیشینه عمق آبشستگی در شرایط آب زلال زمانی برقرار می‌شود که $U = 0.95U_c$ باشد. بنابراین، با توجه به دبی 20 لیتر بر ثانیه و با استفاده از معیار Melville (1997) عمق جریان به گونه‌ای در نظر گرفته شد که شرایط $U = 0.95U_c$ برقرار شود.

آزمایش‌ها با دبی $20 \pm 0/5$ لیتر بر ثانیه و عمق جریان $10 \pm 0/5$ سانتیمتر انجام شدند. آزمایش‌ها با نام‌های M1، M2 و M3 نشان داده شده‌اند که به ترتیب بیانگر حالت تک پایه، دوپایه با فاصله کم و دوپایه با فاصله زیاد پشت سر هم می‌باشد. فاصله بین پایه‌ها در آزمایش دوم 20 سانتیمتر ($L/D = 4$)، که L فاصله بین پایه‌ها و D قطر یا عرض هر پایه می‌باشد) و در آزمایش سوم 30 سانتی‌متر ($L/D = 6$) در نظر گرفته شد.

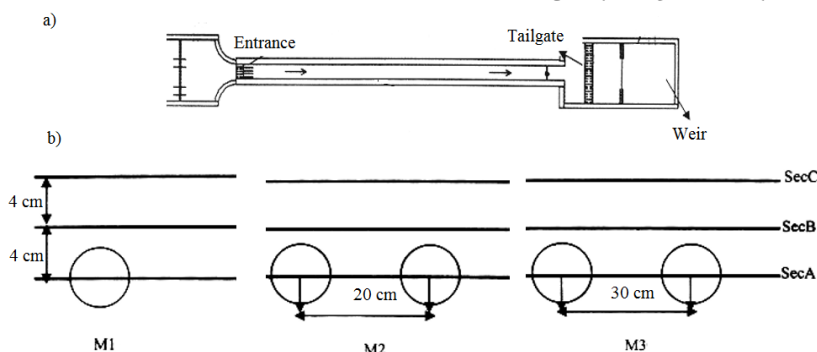


Fig. 1-a) Schematic view of the plan of the experimental flume, and b) measurement sections

شکل ۱ - الف) نمای شماتیک از پلان فلوم آزمایشگاهی و ب) مقاطع داده برداری

کردند که مدل آشفتنگی RSM نسبت به مدل‌های دیگر برای شبیه‌سازی سرعت جریان و جریان‌های ثانویه عملکرد بهتری داشته است. Esmaeili Varaki et al. (2015) تأثیر موقعیت آستانه بر آبشستگی اطراف پایه‌های پل را بررسی و مشاهده کردند که بسته به موقعیت نصب آستانه، مقدار عمق آبشستگی تا ۲۲ درصد کاهش می‌یابد. Keshavarzi et al. (2014) ساختار جریان آشفته در اطراف یک پایه دایره‌ای را بررسی و نقش رخدادهای سه‌بعدی آشفتنگی جریان بر فرآیند آبشستگی پایه منفرد را بررسی کردند. Natale و Fenocchi (2015) آبشستگی کل (مجموع آبشستگی حاصل از تنگ شدگی مقطع و آبشستگی موضعی) در اطراف پایه پل را به صورت عددی و آزمایشگاهی بررسی کردند. همچنین Baykal et al. (2015) جریان و آبشستگی در اطراف یک پایه منفرد دایره‌ای را بررسی و مشاهده کردند که فرآیند محو گردابه فقط در فازهای ابتدایی آبشستگی تأثیرگذار است. Mahjoob et al. (2014) به بررسی آبشستگی موضعی اطراف گروه پایه پل پرداختند و نتیجه گرفتند که عمق آبشستگی در پایه دوم کمتر از پایه اول و عمق آبشستگی در پایه سوم کمتر از مقادیر مربوط به پایه‌های اول و دوم است. Daneshfaraz et al. (2014) تأثیر شکاف گروه پایه‌ها بر عمق آبشستگی را بررسی کردند. نتایج این محققین حاکی از کاهش قابل توجه عمق آبشستگی نسبت به مدل گروه دوتایی پایه‌ی بدون شکاف می‌باشد.

با توجه به اهمیت شناسایی میدان جریان و تغییرات مؤلفه‌های سرعت در حفره آبشستگی پیرامون پایه‌های پل، در این تحقیق به بررسی ساختار چنین جریان‌هایی پرداخته شده است. همچنین به منظور بررسی اثر فاصله پایه‌های پل بر آبشستگی پایین‌دست و ساختار جریان پیرامون آن، آزمایش‌ها در حالت‌های تک پایه و دو پایه با دو فاصله متفاوت نسبت به هم انجام شده است.

مواد و روش‌ها

آزمایش‌ها در یک فلوم آزمایشگاهی در آزمایشگاه هیدرولیک رسوب دانشکده کشاورزی دانشگاه شیراز انجام شدند (شکل ۱). فلوم شیشه‌ای مذکور دارای طول ۱۵، عرض ۰/۷ و ارتفاع ۰/۶ متر

نتایج و بحث

تغییرات مؤلفه‌های سرعت در سه راستای X ، Y و Z در طول فلوم و در سه مقطع A ، B و C (شکل ۱ب) در فواصل مختلف از بستر در آزمایش مربوط به تک پایه در شکل‌های (۲ الف-ج) آمده است. در شکل (۲) تغییرات مؤلفه طولی سرعت V_x در سه مقطع A ، B و C در چهار فاصله از کف معادل ۱، ۱/۵، ۲ و ۲/۵ سانتیمتری نشان داده شده است. در آزمایش اول در مقطع A و در هر چهار فاصله مورد بررسی تغییرات مؤلفه طولی سرعت V_x شبیه شکل حفره آبستگي می‌باشد. همانند آنچه در بررسی‌های Barbhuiya و Dey (2004) مشاهده شد یک جریان روبه پایین در نزدیکی بالادست پایه استوانه‌ای وجود دارد. همچنین با فاصله گرفتن از کف، میزان حداقل سرعت V_x قبل و بعد از پایه افزایش یافته است. در مقطع A سرعت V_x منفی نبوده و این نشان می‌دهد که براساس محورهای مختصات فرض شده جریان برگشتی در راستای مذکور وجود نداشته است. حداقل سرعت V_x در فاصله بین ۵۰ و ۵۰- (۵۰ میلیمتری بالادست مبدأ مختصات و ۵۰ میلیمتری پایین دست) یعنی در جایی که حفره آبستگي دارای بیشترین عمق می‌باشد اتفاق می‌افتد.

برای تعیین مدت زمانی که چاله آبستگي به حالت تعادل می‌رسد از رابطه Chiew و Melville (1999) استفاده و براین اساس مدت زمان آزمایش ۱۱ ساعت منظور گردید. به منظور بررسی تغییرات مؤلفه‌های سرعت جریان در حفره آبستگي پیرامون پایه‌های پل مجموعه‌ای از نقاط به صورت یک شبکه در اطراف پایه‌ها در نظر گرفته شده است. مؤلفه‌های سرعت جریان در حفره آبستگي پیرامون پایه‌ها در چهار فاصله ۱۰، ۱۵، ۲۰ و ۲۵ میلی‌متری از بستر فرسایش یافته اندازه‌گیری گردید. سرعت نقطه‌ای جریان آب با استفاده از یک دستگاه سرعت‌سنج سه‌بعدی micro-ADV با فرکانس ۵۰ هرتز ساخت شرکت نورتنک اندازه‌گیری شد. از مزایای دیگر این دستگاه، علاوه بر دقت بسیار بالای سرعت‌سنجی بر اساس پدیده داپلر، آن است که به علت این که سرعت‌سنجی در نقطه‌ای دور از انتهای بازوی دستگاه انجام می‌شود و هیچ جسم فیزیکی در آن مکان وجود ندارد، میدان جریان توسط دستگاه تحت تأثیر قرار نگرفته و اندازه‌گیری سرعت با دقت بسیار خوبی انجام می‌شود. تعداد سرعت‌های لحظه‌ای برداشت شده در هر نقطه در حدود ۶۰۰۰ سرعت به مدت دو دقیقه بود که سرعت در هر سه جهت طولی، عرضی و عمقی که به ترتیب با X ، Y و Z نمایش داده می‌شوند، به صورت همزمان برداشت گردید.

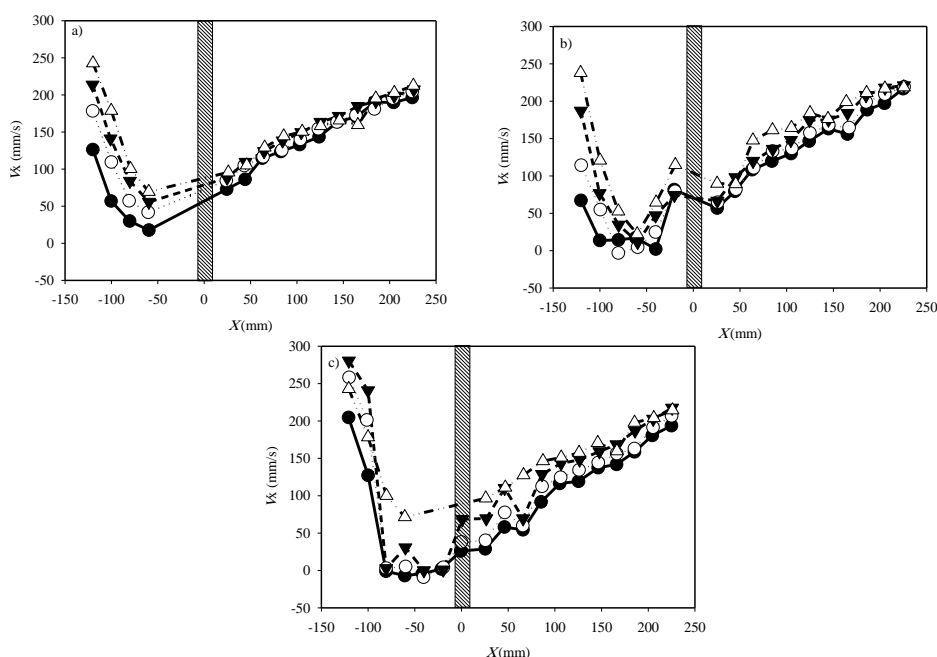


Fig. 2- The longitudinal component of the mean velocity at various distances in the M1 model (a) section A, B) section B, and C) section C (●10, ○ 15, ▼ 20, and ▲ 25 mm distance).

شکل ۲- مؤلفه طولی سرعت متوسط در فواصل مختلف در مدل M1 (الف) مقطع A، (ب) مقطع B و (ج) مقطع C (●فاصله ۱۰، ○فاصله ۱۵، ▼فاصله ۲۰ و ▲فاصله ۲۵ میلی‌متر).

در جهت مثبت در سرعت V_y و در مقطع عرضی ۵۰- (فاصله ۵۰ میلیمتری بالادست مرکز پایه) وجود دارد که این به دلیل اثری است که پایه بر روی جریان می‌گذارد و پایه باعث منحرف شدن و کاهش سرعت جریان از این نقطه به بعد خواهد شد که این امر در مقطع A به دلیل برخورد مستقیم جریان با پایه نسبت به دو مقطع دیگر مشهودتر است.

در شکل (۴) تغییرات سرعت در جهت Z برای مدل M1 در فواصل ۱، ۱/۵، ۲ و ۲/۵ سانتیمتری از کف نشان داده شده است. منحنی تغییرات سرعت برای مقطع A نشان‌دهنده جریان‌های روبه‌پایین در بالادست پایه برای هر چهار فاصله می‌باشد. اما در پایین‌دست، درست در مجاورت پایه، مؤلفه عمقی سرعت V_z یک جهش به سمت مقادیر مثبت داشته که این روند تا انتهای مقطع A ادامه پیدا می‌کند. این امر بیانگر وجود جریان‌های چرخشی رو به بالا درون حفره (به دلیل وجود پایه در این راستا) درست بعد از پایه می‌باشد. در مقطع B نیز این جریان روبه‌پایین در بالادست پایه وجود داشته که حداکثر این جریان‌ها درست در مجاورت پایه (مقطع ۲۵- سانتیمتر در بالادست پایه با فاصله ۲۵ میلیمتری از کف) اتفاق می‌افتد که این مقدار حداکثر با فاصله گرفتن از کف با شدت بیشتری دنبال شده است. برخلاف مقطع A، در مقطع B در پایین‌دست پایه و در فواصل ۲ و ۲/۵ سانتیمتری از کف، هنوز جریان‌های روبه‌پایین وجود داشته ولی در دو فاصله دیگر V_z به صفر نزدیک شده که بیانگر عدم وجود این مؤلفه عمقی سرعت می‌باشد.

در شکل‌های (۳ الف-ج) تغییرات مؤلفه عرضی سرعت V_y در طول فلوام در سه مقطع A، B و C و برای فواصل مختلف نسبت به کف کانال نشان داده شده است. در مقطع A در فاصله یک سانتیمتری از کف و از مرکز پایه به بعد، مؤلفه سرعت V_y منفی شده و در انتهای مقطع A (فاصله ۱۵۰ میلیمتری از مرکز پایه) مقادیر آن به صفر میل می‌کند. همچنین در مقطع A با فاصله گرفتن از بستر در پایین‌دست پایه، مقادیر منفی مؤلفه‌های سرعت V_y کوچک‌تر شده (بدون در نظر گرفتن علامت) و به صفر نزدیک می‌شوند. برای سایر مقاطع (B و C) حتی از بالادست پایه نیز مؤلفه عرضی سرعت V_y منفی شده است. در این مقاطع هر چه از کف فاصله گرفته می‌شود در طول مقطع سرعت‌های منفی با مقادیر بزرگتر (بدون در نظر گرفتن علامت) بیشتر به چشم می‌خورد.

با توجه به شکل‌های (۳ ب و ج)، مؤلفه عرضی سرعت V_y در طول مقاطع A و B در پایین‌دست پایه عمدتاً منفی است. با توجه به مطالب فوق می‌توان نتیجه گرفت که جریان‌های گردابی عرضی که در دو مقطع B و C اتفاق می‌افتد بزرگ‌تر و تحت تأثیر حفره آبستنگی می‌باشد اما در مقطع A تنها در فواصل یک سانتیمتری از کف این جریان‌ها بطور واضح به چشم می‌خورد و با نزدیک شدن به بستر در پایین‌دست پایه در مقطع A سرعت V_y تقریباً به صفر نزدیک می‌شود و این نشان‌دهنده عدم جریان‌های عرضی و گردابی در این فواصل و مقطع موردنظر می‌باشد. اما مسأله دیگر که در هر سه مقطع به چشم می‌خورد این است که در هر سه مقطع و در تمامی فواصل یک جهش ناگهانی

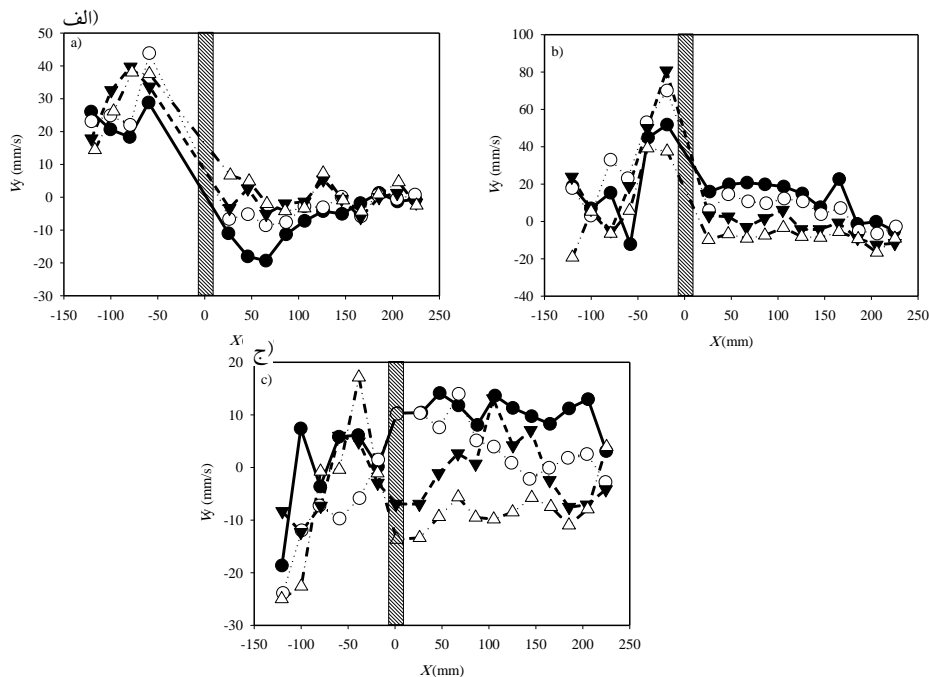


Fig. 3- The lateral component of the mean velocity at various distances in the M1 model (a) section A, B) section B, and C) section C (●10, ○ 15, ▼ 20, and Δ 25 mm distance).

شکل ۳- مؤلفه عرضی سرعت در فواصل مختلف در مدل M1 الف) مقطع A، ب) مقطع B و ج) مقطع C

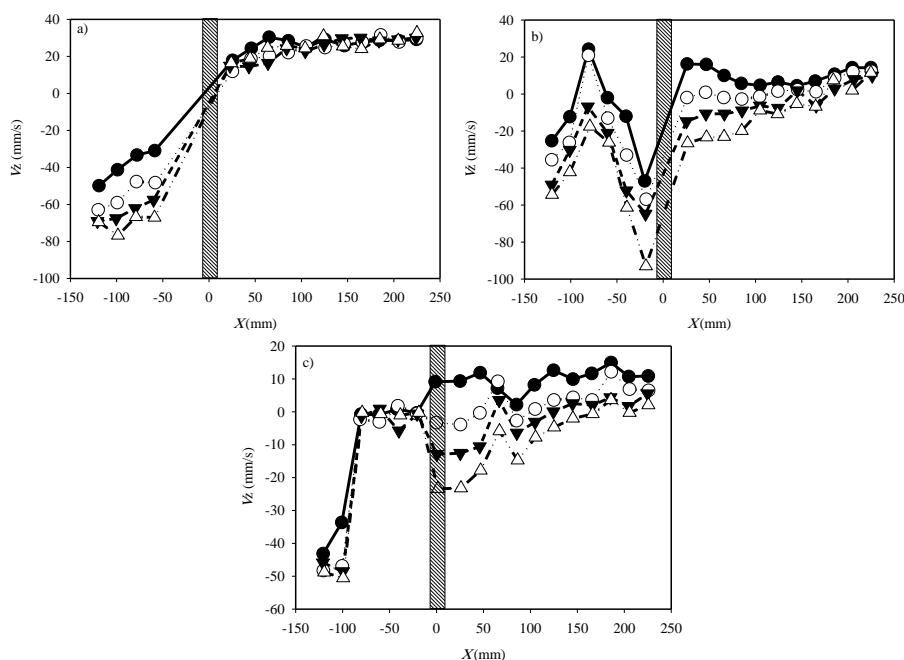


Fig. 4- The vertical component of the mean velocity at various distances in the M1 model (a) section A, B) section B, and C) section C (●10, ○ 15, ▼ 20, and Δ 25 mm distance).

شکل ۴ - مؤلفه عمقی سرعت متوسط در فواصل مختلف در مدل M1 الف) مقطع A، ب) مقطع B و ج) مقطع C (● فاصله ۱۰، ○ فاصله ۱۵، ▼ فاصله ۲۰ و Δ فاصله ۲۵ میلیمتر).

تغییرات شروع می‌شود که این اثر متقابل دو پایه روی یکدیگر و روی جریان باعث افت سریع سرعت در محل پایه دوم شده و باعث تشدید فرآیند آبشستگی در فاصله بین دو پایه و محل پایه دوم گردیده است که در قسمت‌های بعدی در مورد آن بحث خواهد شد. مطابق نمودارها در راستای A، مقادیر منفی مؤلفه طولی سرعت V_x مشاهده نمی‌شود که نشان می‌دهد جریان‌های برگشتی در این راستا وجود نداشته است. تغییرات سرعت در مقاطع B و C نیز مشابه مقطع A بوده که این دلیل گستردگی زیاد حفره آبشستگی برای این مدل می‌باشد.

تغییرات مؤلفه عرضی سرعت در فواصل مختلف برای مدل M2 در سه مقطع A، B و C در شکل‌های (۶ الف-ج) نشان داده شده است. در شکل ۶-الف که مربوط به مقطع A می‌باشد مقادیر سرعت V_y در این مقطع در هر چهار فاصله مورد بررسی مثبت بوده و مقدار حداکثر آن در محل پایه اول و مجاورت آن می‌باشد و در سایر نقاط صفر و نزدیک به آن می‌باشد که این نشان‌دهنده عدم انحراف جریان در این نقاط می‌باشد. اما برای مقطع B سرعت V_y در هر چهار فاصله از بالادست پایه اول از منفی به مثبت تبدیل شده که نشان‌دهنده چرخش جریان در این نقطه می‌باشد و از حدود نقطه صفر (مبدأ مختصات) به سرعت مثبت تبدیل می‌شود که نشان‌دهنده شروع چرخش جریان حول پایه از این نقطه به بعد می‌باشد. در این مقطع حداقل سرعت V_y در محل پایه‌ها اتفاق می‌افتد که هر دو دارای حداقل مقدار منفی هستند.

در مقطع C جریان‌های روبه‌پایین قابل توجه در بالادست و پایین دست و در نزدیکی پایه وجود نداشته که وجود V_z های صفر و نزدیک به صفر در این راستا این مسأله را نشان می‌دهد. البته به جز در نقاط ۱۰۰- و ۱۲۰- میلیمتری که این به دلیل شروع حفره از این نقاط و تغییر جهت جریان به سمت داخل حفره و جداسازی جریان، در نقاط مذکور می‌باشد.

با توجه به مطالب ذکر شده فوق می‌توان نتیجه گرفت که حداکثر جریان‌های روبه‌پایین در بالادست پایه و در مقاطع A و B (خط مرکزی حفره که از مرکز پایه نیز عبور می‌کند و مجاور آن) وجود دارد. در نهایت مشاهده تغییرات سرعت در هر سه راستای X ، Y و Z و در سه مقطع برای مدل M1 بیانگر این مسأله می‌باشد که وجود پایه تا فاصله حدود دو برابر قطر پایه در بالا دست و تا شش برابر قطر پایه در پایین دست بر خطوط جریان اثر گذاشته و از کناره‌ها نیز تا فاصله حدود دو برابر قطر پایه وجود پایه بر جریان پیرامون اثرگذار می‌باشد. در مدل M2 دو پایه با فاصله معادل چهار برابر قطر پایه از یکدیگر در کانال کار گذاشته شده‌اند. شکل‌های (۵ الف-ج) مربوط به تغییرات مؤلفه طولی سرعت V_x در سه راستای A، B و C برای مدل M2 و در ۴ فاصله ۱، ۱/۵، ۲ و ۲/۵ سانتیمتری از کف می‌باشد. در مقطع A در دو موقعیت، حداقل سرعت اتفاق می‌افتد که این دو موقعیت، مکان‌های قرارگیری پایه‌ها و مجاورت آنها می‌باشد. همان طور که نمودارها نشان می‌دهند قبل از اینکه کاهش سرعت جریان ناشی از وجود پایه اول تمام شود از نقاط حدود (۱۲۵ میلیمتری مرکز پایه اول)

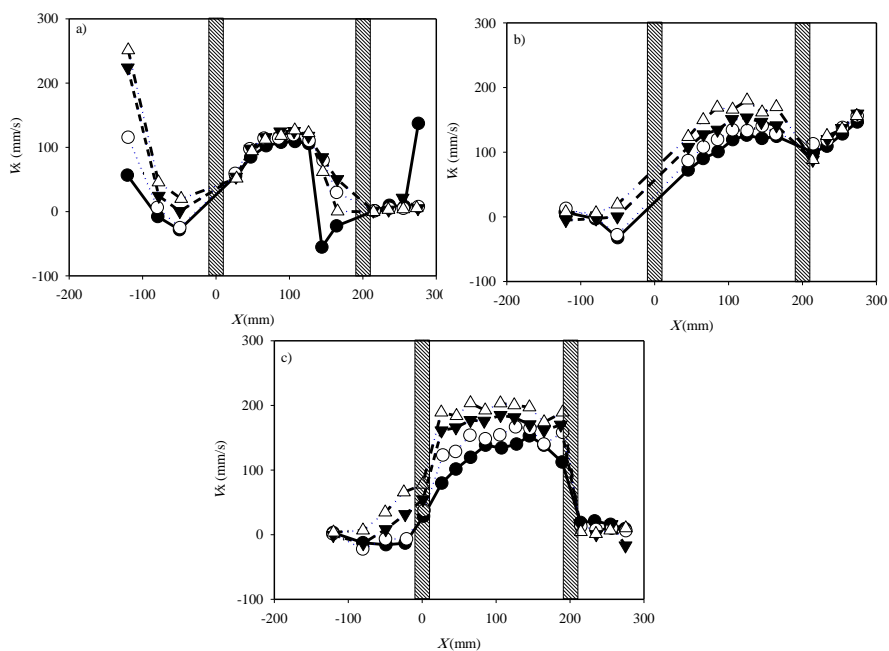


Fig. 5- The longitudinal component of the mean velocity at various distances in the M2 model (a) section A, B) section B, and C) section C (●10, ○ 15, ▼ 20, and Δ 25 mm distance).

شکل ۵- مؤلفه طولی سرعت در فواصل مختلف در مدل M2 الف) مقطع A، ب) مقطع B و ج) مقطع C (● فاصله ۱۰، ○ فاصله ۱۵، ▼ فاصله ۲۰ و Δ فاصله ۲۵ میلیمتر).

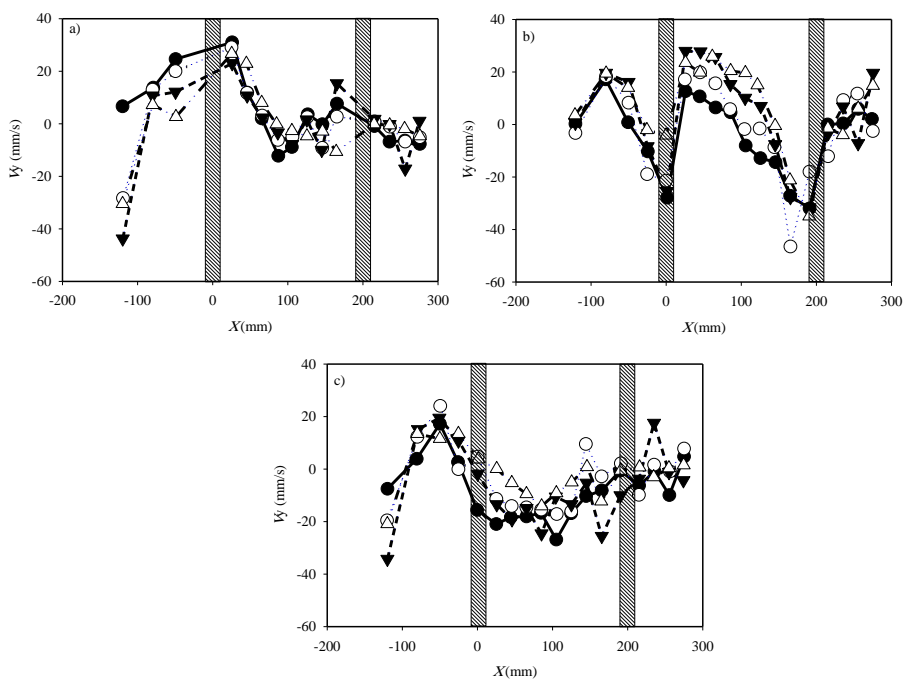


Fig. 6- The lateral component of the mean velocity at various distances in the M2 model (a) section A, B) section B, and C) section C (●10, ○ 15, ▼ 20, and Δ 25 mm distance).

شکل ۶- مؤلفه عرضی سرعت در فواصل مختلف در مدل M2 الف) مقطع A، ب) مقطع B و ج) مقطع C (● فاصله ۱۰، ○ فاصله ۱۵، ▼ فاصله ۲۰ و Δ فاصله ۲۵ میلیمتر).

فاصله ۲/۵ سانتیمتری از کف این جریان‌ها بزرگ‌تر بوده و با فاصله گرفتن از بستر این جریان‌ها تقویت شده و با نزدیک‌تر شدن به کف به دلیل اثر بستر جریان‌های روبه‌پایین تضعیف می‌شوند.

تغییرات مؤلفه طولی سرعت برای مدل M3 در شکل‌های ۸ الف-ج) ترسیم گردیده است. برای مدل M3 در مقطع A سرعت-های V_x با علامت منفی در نقاط مجاور پایه‌ها دیده می‌شود. که بیانگر وجود جریان‌های برگشتی در این نقاط می‌باشد اما در فاصله بین دو پایه مقدار سرعت تقریباً به سرعت متوسط جریان در کانال نزدیک شده که این نشان‌دهنده از بین رفتن اثر پایه اول روی جریان در محلی که اثر پایه دوم شروع می‌شود می‌باشد. در این حالت نیز مانند مدل M2 نقاط دارای حداقل سرعت در محل قرارگیری پایه‌ها و مجاورت آنها دیده می‌شود که این نقاط حداقل برای پایه اول قبل از پایه (نقطه ۲۵- میلیمتری بالادست) و برای پایه دوم بعد از پایه (نقطه ۳۲۵) دیده می‌شود. اما برای مقطع B و C تنها در یک نقطه نمودار دارای حداقل است و این مقدار V_x حداقل در محل قرارگیری پایه اول اتفاق افتاده و در سایر نقاط سرعت V_x به حالت عادی برگشته و در محل پایه دوم تنها افت ناچیزی دیده می‌شود که این نقاط نشان اثر کم پایه دوم بر میزان آبشستگی می‌باشد یعنی در حالت M3 دو پایه اثر متقابل بسیار کمی روی یکدیگر و در نتیجه روی جریان پیرامون پایه‌ها داشته‌اند. این امر باعث شده است که عرض حفره در محل پایه دوم بسیار کمتر از عرض حفره در محل پایه اول باشد.

در مقطع C، مؤلفه عرضی سرعت به ویژه برای فاصله یک سانتیمتری از کف بیشتر دارای مقادیر منفی است (از نقطه ۵۰- میلیمتری به بعد) که نشان‌دهنده جریان‌های چرخشی در این فاصله و مقطع می‌باشد که به دلیل کاهش اثر پایه در این مقطع علت آن می‌تواند به وجود چاله آبشستگی نسبت داده شود. با مقایسه الگوی تغییرات مؤلفه عرضی سرعت در مدل‌های مورد بررسی مشاهده می‌شود که در فاصله حدود ۵۰ میلیمتری بالادست پایه، مقدار حداکثر موضعی سرعت واقع می‌شود که می‌تواند ناشی از برخورد جریان به پایه باشد.

شکل‌های ۷ الف-ج) تغییرات مؤلفه عمقی سرعت V_z را در سه مقطع A، B و C و فواصل مختلف برای مدل M2 نشان می‌دهد. در خط مرکزی کانال (مقطع A)، مؤلفه عمقی سرعت V_z در محل دو پایه دارای مقدار حداقل منفی می‌باشد که نشان‌دهنده جریان‌های روبه‌پایین در این مکان‌ها می‌باشد البته حداقل V_z برای فاصله یک سانتیمتری بزرگ‌تر و دارای علامت منفی می‌باشد. اما در فاصله بین دو پایه V_z مثبت است که نشان‌دهنده جریان‌های رو به بالا در این نقاط می‌باشد.

در مقطع B سرعت V_z از محل ۱۰۰ میلیمتری بالادست پایه اول منفی شده و تا انتهای مقطع تقریباً در تمام نقاط V_z منفی باقی می‌ماند. مقادیر مطلق V_z در این مقطع بزرگ‌تر از مقطع A و همچنین در فاصله ۲/۵ سانتیمتری از کف بزرگ‌تر از سایر فواصل می‌باشد. در مقطع C نیز همانند مقطع B در بیشتر نقاط V_z های منفی غالب بوده که نشان‌دهنده وجود جریان‌های روبه‌پایین قابل توجه (به دلیل وجود حفره) در این راستاها می‌باشد که در

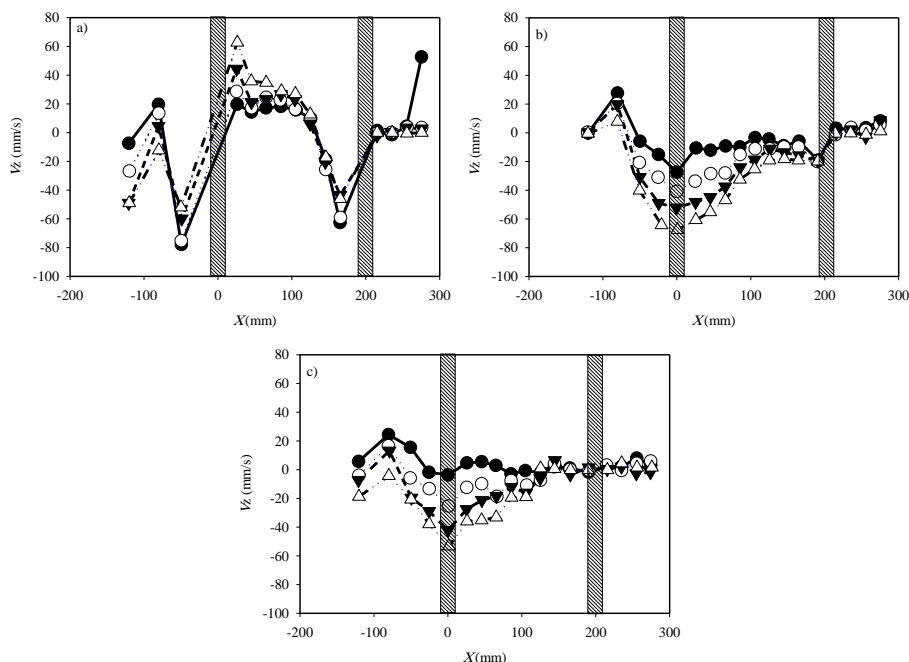


Fig. 7- The vertical component of the mean velocity at various distances in the M2 model (a) section A, B) section B, and C) section C (●10, ○ 15, ▼ 20, and Δ 25 mm distance).

شکل ۷- مؤلفه عمقی سرعت در فواصل مختلف در مدل M2 الف) مقطع A، ب) مقطع B و ج) مقطع C

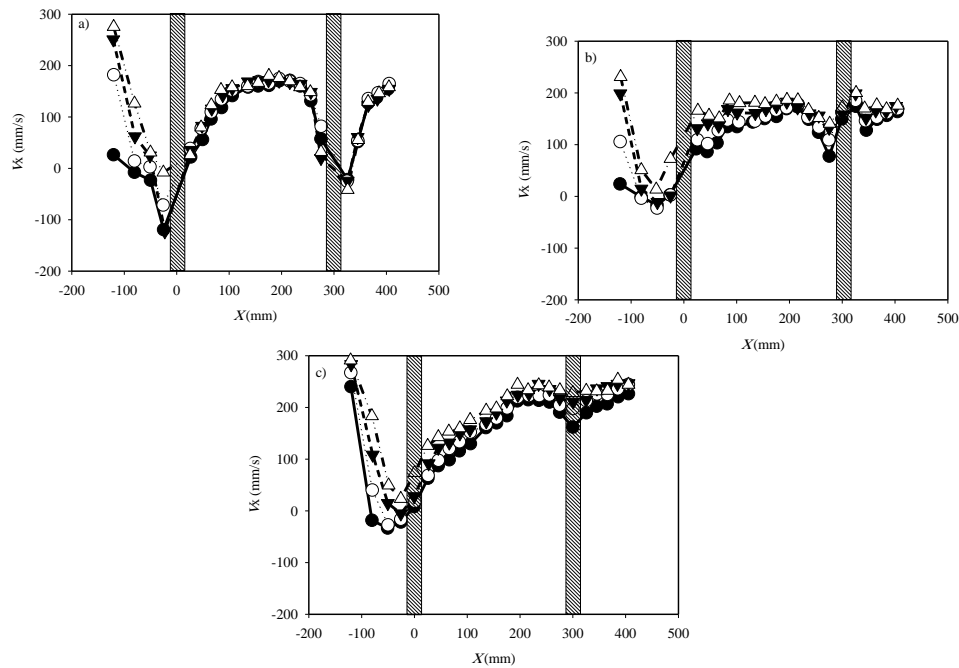


Fig. 8- The longitudinal component of the mean velocity at various distances in the M3 model (a) section A, B) section B, and C) section C (●10, ○ 15, ▼ 20, and Δ 25 mm distance).

شکل ۸- مؤلفه طولی سرعت در فواصل مختلف در مدل M3 الف) مقطع A، ب) مقطع B و ج) مقطع C
 (● فاصله ۱۰، ○ فاصله ۱۵، ▼ فاصله ۲۰ و Δ فاصله ۲۵ میلیمتر).

و ناچیزی روی یکدیگر داشته‌اند اما در دو مقطع B و C حتی در پایین‌دست پایه‌ها نیز V_z های منفی در بسیاری از نقاط این راستاها دیده شده و تنها در فاصله کوچکی بین دو پایه V_z حدود صفر خواهد شد. لازم به ذکر است که مقادیر V_z در مقطع B بزرگ‌تر می‌باشد که این نشان‌دهنده جریان‌های گردابی روبه‌پایین به ویژه در مقطع B می‌باشد. به طور کلی در هر سه مقطع در مجاورت پایه‌ها V_z افت شدیدی پیدا کرده و مقادیرشان حداقل می‌گردد.

پروفیل طولی حفره آبستگي در سه مقطع A، B و C برای هر سه مدل مورد بررسی در شکل‌های (۱۱ الف-ج) آورده شده است. با مقایسه این شکل با شکل‌های مربوط به تغییرات مؤلفه طولی سرعت، ملاحظه می‌شود که شکل کلی پروفیل حفره با الگوی تغییرات V_x مشابه است. بنابراین در این سه مقطع و در هر چهار فاصله ۱، ۱/۵، ۲ و ۲/۵ سانتیمتری از کف، تغییرات سرعت و تغییرات شکل حفره یک روند را دنبال می‌کند. همان‌طور که در مقطع A آبستگي به حداکثر خود رسیده است (متناظر با حداقل تراز کف)، موقعیت وقوع آن متناظر با حداقل سرعت در این راستا می‌باشد. همچنین با مقایسه مقدار حداکثر عمق آبستگي در مدل‌های M1، M2 و M3 ملاحظه می‌شود که در حالت دوپایه با فاصله کم (مدل M2) مقدار آبستگي در مجاورت پایه اول و همچنین پایه دوم در مقایسه با حالت تک پایه افزایش یافته است.

شکل (۹ الف-ج) تغییرات مؤلفه عرضی سرعت در سه مقطع A، B و C و فواصل مختلف برای مدل M3 را نشان می‌دهد. طبق این شکل‌ها در هر سه مقطع و در تمام فواصل از کف، سرعت V_y در بالادست و نزدیکی دو پایه کاهش یافته و در دو مقطع A و B مقادیر آن منفی می‌باشد اما در فاصله بین دو پایه و در مقطع C، مقادیر V_y دارای علامت مثبت می‌باشد و در انتهای مقاطع نیز به سمت صفر میل می‌کنند که این نشان می‌دهد در دو مقطع A و B در بالادست پایه‌ها و مجاورت آن‌ها خطوط از راستای اصلی منحرف شده و تمایل به چرخش حول پایه‌ها دارند در نقاطی که V_y مثبت می‌باشد مثل مقطع C خطوط جریان در حال دور شدن از محل پایه‌ها و رفتن به سمت دیواره‌ها می‌باشند که همین جریان‌های عرضی باعث گسترش عرض حفره آبستگي می‌شوند.

شکل‌های (۱۰ الف-ج) مربوط به تغییرات مؤلفه عمقی سرعت در سه مقطع A، B و C و فواصل مختلف برای مدل M3 می‌باشد. در شکل ۱۰-الف که مربوط به مقطع A می‌باشد، مقادیر V_z با علامت منفی در بالادست پایه‌ها ملاحظه می‌شود که در فاصله بین پایه‌ها، مقادیر V_z به سمت صفر میل می‌کنند که این مسئله بیانگر وجود جریان‌های روبه‌پایین در بالادست پایه‌ها می‌باشد و همچنین V_z های صفر نشان می‌دهد که جریان در فاصله بین دو پایه به حالت عادی بازگشته و دو پایه اثر متقابل کم

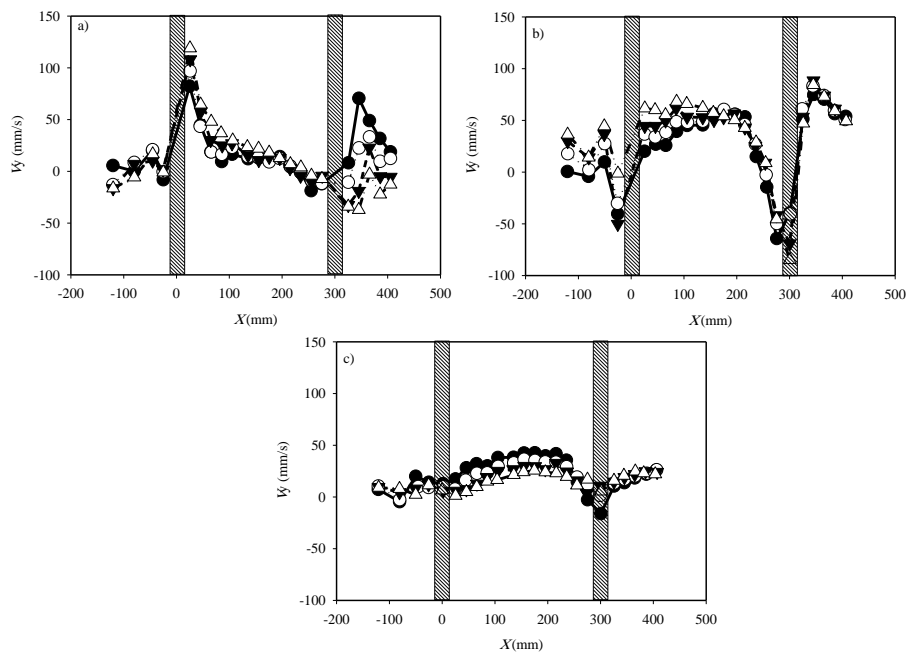


Fig. 9- The lateral component of the mean velocity at various distances in the M3 model (a) section A, B) section B, and C) section C (●10, ○ 15, ▼ 20, and Δ 25 mm distance).

شکل ۹- مؤلفه عرضی سرعت در فواصل مختلف در مدل M3 الف) مقطع A، ب) مقطع B و ج) مقطع C (● فاصله ۱۰، ○ فاصله ۱۵، ▼ فاصله ۲۰ و Δ فاصله ۲۵ میلی‌متر).

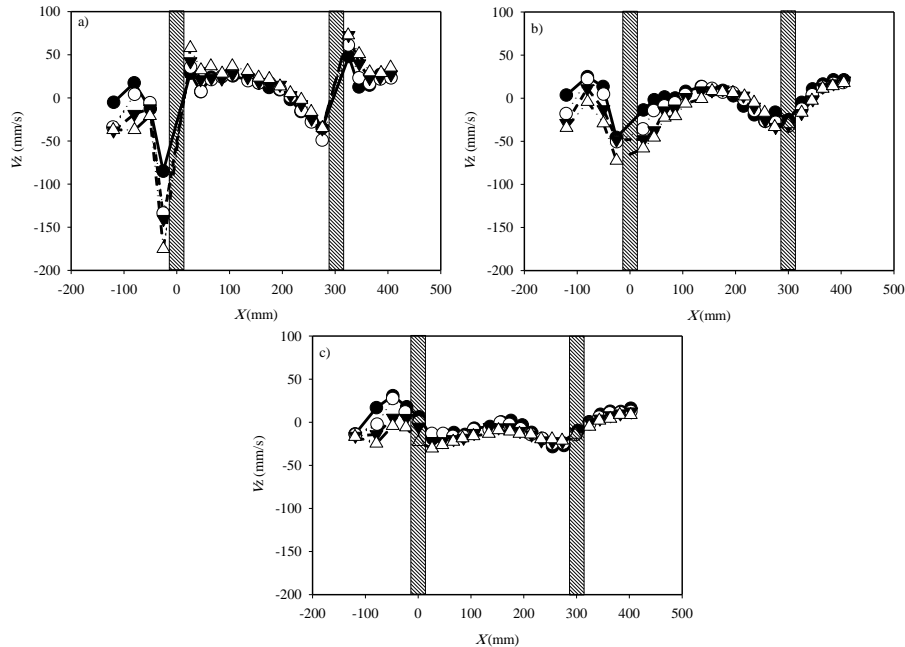


Fig. 10- The vertical component of the mean velocity at various distances in the M3 model (a) section A, B) section B, and C) section C (●10, ○ 15, ▼ 20, and Δ 25 mm distance).

شکل ۱۰- مؤلفه عمقی سرعت در فواصل مختلف در مدل M3 الف) مقطع A، ب) مقطع B و ج) مقطع C (● فاصله ۱۰، ○ فاصله ۱۵، ▼ فاصله ۲۰ و Δ فاصله ۲۵ میلی‌متر).

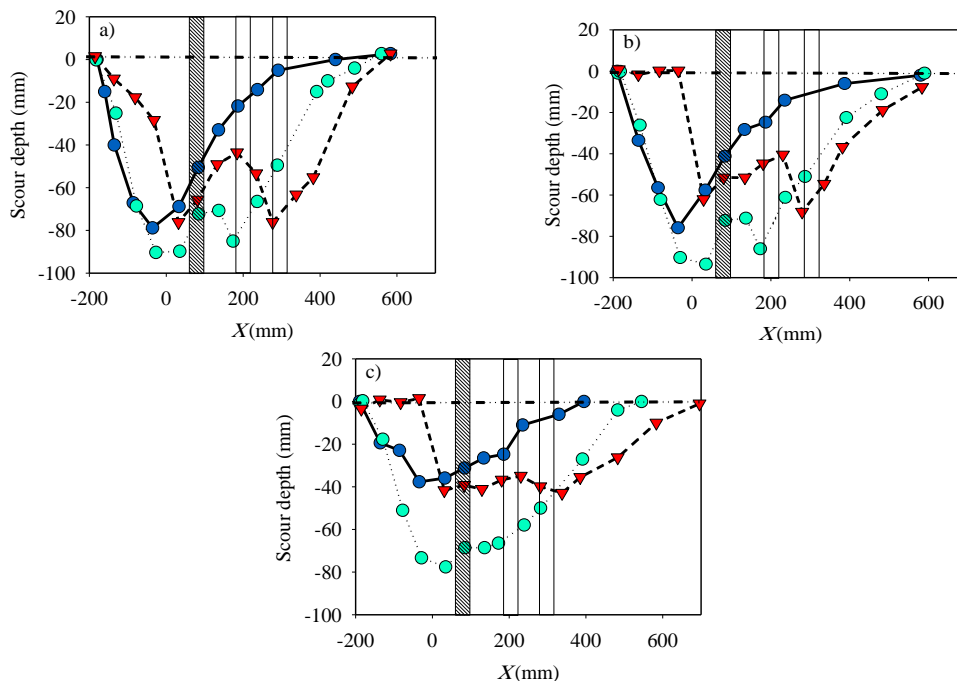


Fig. 11 - Longitudinal profile of the scour hole in different models, (a) cross section A, b) cross section B, and c) cross section C (● M1, ● M2, and ▼ M3).

شکل ۱۱- پروفیل طولی حفره آبستگي در مدل های مختلف، الف) مقطع A، ب) مقطع B و ج) مقطع C (● مدل M1، ● مدل M2 و ▼ مدل M3).

Laursen (1980) برای بستر متحرک، معادله دانشگاه ایالتی کلرادو (CSU) که توسط Richardson et al. (1993) ارائه گردید و معادله Froehlich (1988) در جدول (۱) آورده شده است. در این جدول دقت مدل‌ها بر حسب پارامتر درصد خطا (PE) که به صورت معادله (۱) تعریف می‌شود، ذکر شده است.

$$PE (\%) = \frac{X_{com} - X_{meas}}{X_{meas}} \times 100 \quad (1)$$

که در این رابطه، X_{com} و X_{meas} به ترتیب مقدار محاسبه شده و اندازه‌گیری شده حداکثر عمق آبستگي می‌باشد. با توجه به این جدول ملاحظه می‌شود که در حالت تک پایه، مدل Laursen (1980) برای بستر متحرک کمترین میزان خطا در محاسبه حداکثر عمق آبستگي را دارد به گونه‌ای که عمق آبستگي را به میزان ۱۹ درصد بیش از مقدار اندازه‌گیری شده برآورد می‌کند. همچنین در حالت پایه پل دوتایی، به طور میانگین مدل Laursen (1980) برای بستر متحرک و معادله Froehlich (1988) کمترین مقدار خطا را داشته و مقدار حداکثر عمق آبستگي را حدود ۱۳ درصد به ترتیب بیشتر و کمتر از مقدار اندازه‌گیری شده برآورد می‌کنند.

در مقابل با افزایش فاصله بین پایه‌ها (مدل M3)، مقدار آبستگي کاهش یافته است که این مشاهدات نشان‌دهنده تأثیر قابل توجه فاصله بین پایه‌ها بر میزان آبستگي بستر در مجاروت پایه است و در تحقیق Ranjkesh (2010) نیز مشاهده شده است. در مدل M2 و در مقطع C برخلاف دو مقطع دیگر عمق آبستگي در مقایسه با مدل‌های M1 و M3 همچنان قابل توجه است. از طرفی گسترش طولی حفره آبستگي با افزایش تعداد پایه‌ها افزایش یافته است. بنابراین مشاهدات نشان می‌دهد که حداکثر عمق آبستگي در مدل‌های M1 و M3 تقریباً برابر بوده و مدل M2 بیشترین مقدار عمق آبستگي را نشان می‌دهد.

خطوط هم‌تراز بستر در مدل‌های مختلف در اطراف پایه‌ها نیز در شکل‌های (۱۲ الف-ج) نشان داده شده است. با مقایسه این شکل‌ها ملاحظه می‌شود که افزایش تعداد پایه‌ها منجر به توسعه عرضی حفره آبستگي و در نتیجه افزایش حجم گودال آبستگي شده است. این مسأله در مورد مدل M2 یعنی پایه دوتایی با فاصله کم در مقایسه با مدل‌های دیگر مشهودتر است.

به منظور ارزیابی مدل‌های ارائه شده در برآورد حداکثر عمق آبستگي پایه‌های پل در حالت تکی و دوتایی، دقت برخی مدل‌ها شامل مدل Laursen (1963) برای آب زلال، مدل

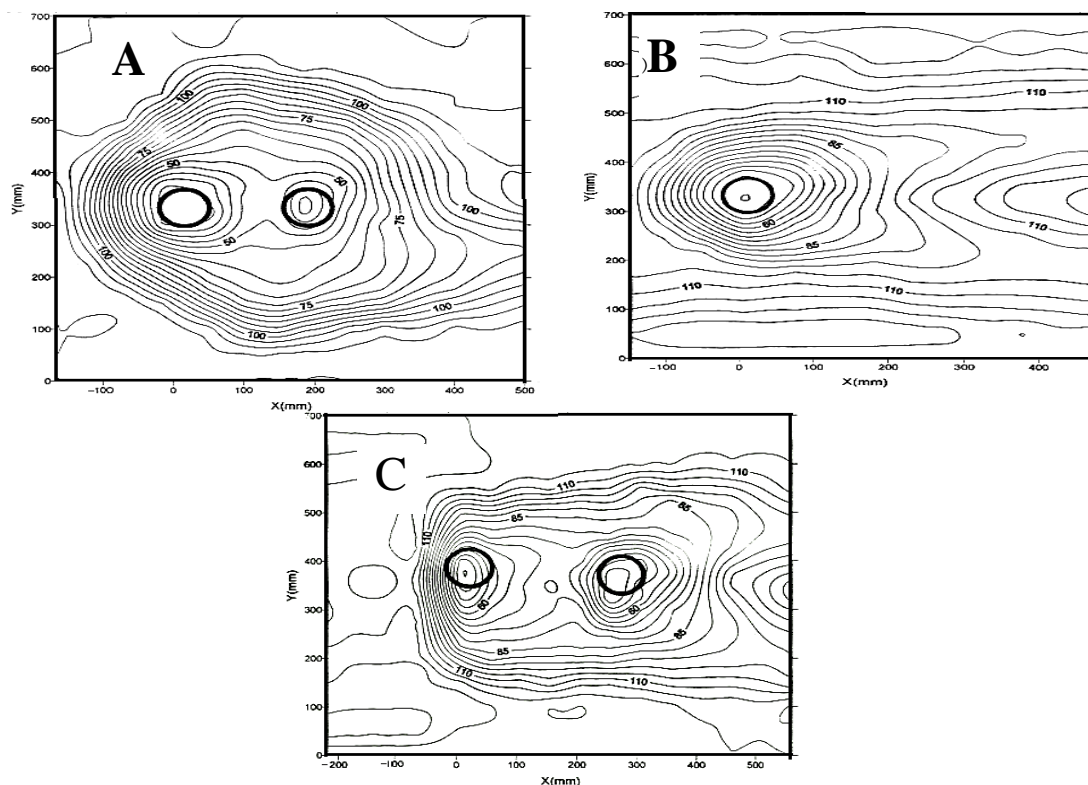


Fig. 12 – Contour lines of a) M1, b) M2, and c) M3 models.
 شکل ۱۲ - خطوط هم‌تراز بستر الف) مدل M1، ب) مدل M2 و ج) مدل M3

Table 1- Percentage error of different models for prediction of maximum scour depth around single and two column bridge piers

جدول ۱- میزان خطای مدل‌های مختلف در برآورد عمق آبستگي پایه پل تکی و دو تایی

| Model | Equation for prediction of scour depth | PE (%) |
|-------|--|--------|
| M1 | Laursen (clear water) | -98 |
| | Laursen (live bed) | 19 |
| | CSU | 113 |
| | Froehlich | -41 |
| M2 | Laursen (clear water) | -98 |
| | Laursen (live bed) | 12 |
| | CSU | 67 |
| | Froehlich | -20 |
| M3 | Laursen (clear water) | -98 |
| | Laursen (live bed) | 14 |
| | CSU | 99 |
| | Froehlich | -7 |

مالی قابل توجهی در اثر تخریب پل‌ها در اثر وقوع آبستگي وارد می‌شود. یکی از دلایل این اتفاق، عدم شناخت کافی میدان جریان در اطراف پایه و همچنین عدم آگاهی کافی از اندرکنش پایه‌های متوالی بر یکدیگر می‌باشد. در این تحقیق، ساختار جریان متوسط در اطراف پایه‌های پل استوانه‌ای و همچنین اثر فاصله بین دو پایه

نتیجه‌گیری

آبستگي موضعی یکی از معضلات مرتبط با پل‌های مورد استفاده در مسیر رودخانه‌ها می‌باشند. علیرغم تحقیقات ارزشمندی که در زمینه برآورد مقدار حداکثر عمق آبستگي در مجاورت پایه‌های پل انجام شده است، هنوز هم سالانه خسارات جانی و

تا فاصله حدود دو برابر قطر پایه وجود پایه بر جریان پیرامون اثر گذار می باشد.

- در حالت دوپایه با فاصله کم (مدل M2) مقدار آبستنگی در مجاورت پایه اول و همچنین پایه دوم در مقایسه با حالت تک پایه افزایش یافته است.
- با افزایش فاصله بین پایه ها (مدل M3)، مقدار آبستنگی در مقایسه با سایر مدل ها کاهش یافته است.
- معادله Laursen (1980) برای بستر متحرک و معادله Froehlich (1988) کمترین مقدار خطا در برآورد حداکثر عمق آبستنگی را دارند.

تقدیر و تشکر

از کارشناسان آزمایشگاه هیدرولیک رسوب دانشگاه شیراز که در انجام این پژوهش همکاری داشته اند، کمال تشکر و قدردانی به عمل می آید.

بر آبستنگی و تغییرات مؤلفه های سرعت متوسط به صورت آزمایشگاهی بررسی شده است. به طور کلی موارد زیر را می توان به عنوان نتایج تحقیق حاضر برشمرد:

- مقدار حداقل مؤلفه طولی سرعت متوسط V_x در جایی که حفره آبستنگی دارای بیشترین عمق می باشد اتفاق می افتد.
- تغییرات مؤلفه طولی سرعت V_x شبیه شکل حفره آبستنگی می باشد.
- با فاصله گرفتن از بستر در پایین دست پایه، مقادیر منفی مؤلفه های عرضی سرعت V_y کوچک تر شده و به صفر نزدیک تر می شوند.
- حداکثر جریان های روبه پایین در بالادست پایه و در مقاطع A و B (خط مرکزی حفره که از مرکز پایه نیز عبور می کند و مجاور آن) وجود دارد.
- در دامنه تغییرات پارامترهای تحقیق حاضر، وجود پایه تا فاصله حدود دو برابر قطر پایه در بالادست و تا شش برابر قطر پایه در پایین دست بر خطوط جریان اثر گذاشته و از کناره ها نیز

References

- 1- Alamatian A. and Jafarzadeh, M. 2008. Numerical study of flow around a bridge pier. 8th international Conference of River engineering, Shahid Chamran University, Ahvaz, Iran. (In Persian)
- 2- Barbhuiya, A. and Dey, S. 2004. Measurement of turbulent flow field at a vertical semicircular cylinder attached to the sidewall of a rectangular channel. *Flow Measurement and Instrumentation*, 15(2), pp. 87-96.
- 3- Baykal, C., Sumer, B.M., Fuhrman, D.R., Jacobsen, N.G. and Fredsøe, J., 2015. Numerical investigation of flow and scour around a vertical circular cylinder. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 373(2033), p.20140104.
- 4- Daneshfaraz, R., Ashrafi, S. and Nezafat, H. 2014. Numerical analysis on the effect of slot on the maximum scour depth around a group of bridge piers. 10th International Congress on Civil Engineering, Tabriz University, Tabriz, Iran. (In Persian).
- 5- Esmaeili Varaki, M., Saadati S. and Fazl R. 2015. Experimental investigation of the bed sill effect on the temporal evolution of local scour hole around an inclined pier group on a foundation, *Journal of Hydraulics*, 10(2), pp. 13-25. (In Persian).
- 6- Fenocchi, A. and Natale, L., 2015. Using numerical and physical modeling to evaluate total scour at bridge piers. *Journal of Hydraulic Engineering*, 142(3), p.06015021.
- 7- Froehlich, D.C., 1988. Analysis of onsite measurements of scour at piers. In *Hydraulic Engineering: Proceedings of the 1988 National Conference on Hydraulic Engineering* (pp. 534-539).
- 8- Houshmand, D., Esmaili, K., Keshavarzi, A. and Faridhosseini, A. 2014. Numerical Modeling of Flow around Bridge Piers in Meandering Channel. *Journal of Water and Soil*, 27(5), pp. 973-984. (In Persian).
- 9- Keshavarzi, A., Melville, B. and Ball, J., 2014. Three-dimensional analysis of coherent turbulent flow structure around a single circular bridge pier. *Environmental Fluid Mechanics*, 14(4), pp.821-847.
- 10-Laursen, E.M., 1963. An analysis of relief bridge scour. *Journal of the Hydraulics Division*, 89(3), pp.93-118.

- 11-Laursen, , E.M., 1980. Predicting scour at bridge piers and abutments. *General Report*, 3, Arizona Department of Transportation, Phoenix, AZ.
- 12-Mahjoob, B., Mohammadnezhad, B. and Behmanesh, J. 2014. Numerical modeling of local scouring around group bridge piers and compared with experimental results. *Journal of Water and Soil*, 28(2), pp. 267-275. (In Persian).
- 13-Melville, B.W. and Chiew, Y.M., 1999. Time scale for local scour at bridge piers. *Journal of Hydraulic Engineering*, 125(1), pp.59-65.
- 14-Melville, B.W., 1997. Pier and abutment scour: integrated approach. *Journal of Hydraulic Engineering*, 123(2), pp.125-136.
- 15-Melville, B. W., and Raudkivi, A. J. 1977. Flow characteristics in local scour at bridge piers. *Journal of Hydraulic Research*, 15(4), pp.373-380.
- 16-Raeisi, N. and Ghomeshi, M. 2014. Local Scour around the cylindrical bridge pier with two sizes of bed material. *Journal of Irrigation Science and Engineering*, 38(2), pp. 77-89. (In Persian)
- 17-Ranjesh, M. 2010. The effect of flow structure on the scouring around cylindrical bridge piers, M.Sc. thesis, Department of Irrigation and Drainage Engineering, Isfahan University of Technology. (In Persian).
- 18-Raudkivi A, and Ettema R, 1983. Clear-water scour at cylindrical piers. *Journal of Hydraulic Engineering*, 109(3), pp.338-350.
- 19-Richardson, E.V., Harrison, L.J., Richardson, J.R. and Davis, S.R., 1993. *Evaluating scour at bridges* (No. HEC 18 (2nd edition)).
- 20-Richardson, J.E. and Panchang, V.G., 1998. Three-dimensional simulation of scour-inducing flow at bridge piers. *Journal of Hydraulic Engineering*, 124(5), pp.530-540.
- 21-Zarrati, A.R., Nazariha, M. and Mashahir, M.B., 2006. Reduction of local scour in the vicinity of bridge pier groups using collars and riprap. *Journal of Hydraulic Engineering*, 132(2), pp.154-162.