

بررسی آزمایشگاهی اثر هندسه شکاف پایه پل و پایه‌های مجاور هم بر کاهش آبستنگی موضعی

امیرحسین آقاخانی افشار^{۱*}، کاظم اسماعیلی^۲ و محمود فغفور مغربی^۳

^۱ - نویسنده مسئول: دانش آموخته ی کارشناس ارشد عمران، گرایش سازه‌های هیدرولیکی دانشکده مهندسی دانشگاه

فردوسی مشهد. amirhoseinaghakhanei@yahoo.com

^۲ - استادیار گروه مهندسی آب دانشکده کشاورزی دانشگاه فردوسی مشهد esmaili@um.ac.ir

^۳ - استاد گروه مهندسی عمران دانشکده مهندسی دانشگاه فردوسی مشهد maghrebi@um.ac.ir

تاریخ دریافت: ۱۳۸۹/۴/۱۵

تاریخ پذیرش: ۹۰/۲/۱۴

چکیده

تعیین حجم و عمق حفره آبستنگی اطراف پایه یک پل که در بستر رودخانه احداث شده از نظر کنترل پایداری سازه حائز اهمیت است. از این رو تحقیقات وسیعی برای دستیابی به روش‌هایی که بتوان ابعاد آبستنگی موضعی را کنترل و مقدار آن را کاهش داد، انجام می‌پذیرد. این تحقیق با هدف کاهش اثرات آبستنگی موضعی ایجاد شکاف در پایه پل و نیز شبیه سازی آن با قرارگیری دو پایه در مجاورت یکدیگر مورد بررسی قرار گرفته است. در مقاله حاضر حالات مختلفی از شکاف با عرض‌های مختلف در تک پایه استوانه‌ای و در ترازهای مختلف و نیز فواصل قرارگیری بین دو پایه استوانه‌ای معادل با مساحت تک پایه‌های شکاف دار که در جهت عمود بر جریان قرار گرفته‌اند، در شرایط جریان آب زلال در حالت‌های مختلف آزمایشگاهی مورد بررسی قرار گرفته و در ادامه عمق، حجم و نیز منحنی‌های تراز حفره آبستنگی در مدل‌ها مورد مقایسه و بررسی قرار گرفتند. نتایج حاصل از آزمایش‌ها نشان داد که در تک پایه استوانه‌ای زمانی که در پایه شکافی به عرض $0.3D$ که D قطر پایه بوده و در داخل بستر فرسایش ناپذیر امتداد یافته است ایجاد گردد، عمق و همچنین حجم حفره آبستنگی به ترتیب به میزان $0.83/8$ و $0.72/5$ درصد کاهش می‌یابد. همچنین در تک پایه با ایجاد شکافی به عرض $0.3D$ که تا سطح بستر امتداد یافته، شکافی به عرض $0.2D$ که در داخل بستر گسترش یافته و نیز تا سطح بستر امتداد یافته عمق حفره آبستنگی به ترتیب به میزان $0.51/2$ ، $0.44/2$ درصد نسبت به تک پایه بدون شکاف کاهش یافت. در گروه پایه‌ها عمق آبستنگی بدون بعد d_s/D و در فواصل قرارگیری w/D برابر 0 ، 0.175 ، 0.35 و 0.525 (که w فاصله بین دو پایه، D قطر پایه و d_s عمق آبستنگی است) به ترتیب برابر $0.2/3$ ، $0.2/3$ ، $0.2/3$ و $0.2/3$ می‌باشد. از بین مدل‌های زوج پایه می‌توان گفت در حالت $w/D=1$ ، عمق و حجم حفره آبستنگی به میزان $0.13/2$ و $0.15/3$ درصد نسبت به تک پایه استوانه‌ای کاهش می‌یابد که نشان دهنده عملکرد مناسب این گونه آرایش زوج پایه در کاهش و کنترل عمق حفره آبستنگی نسبت به تک پایه بدون شکاف می‌باشد.

کلیدواژه‌ها: آبستنگی موضعی، حجم حفره آبستنگی، دو پایه مجاور هم، شکاف پایه، آب زلال.

مقدمه

ایران نیز در سال ۱۳۶۵ تعداد زیادی از پل‌های ساخته شده در اثر وقوع سیلاب در استان فارس از بین رفت (قربانی، ۱۳۶۷). عواملی نظیر تنگ شدگی مسیر جریان و ایجاد جریان‌های ثانویه و گردابی در اطراف پایه‌ها موجب آبستنگی موضعی ذرات در اطراف پایه می‌شود که شکل غالب جریان در نزدیک یک پایه سیستم گردابی است که در اطراف پایه توسعه یافته و مکانیزم اصلی آبستنگی را تشکیل می‌دهد که اجزای اصلی این سیستم جریان رو به پایین، گرداب نعل اسبی و گرداب‌های جاری می‌باشند. وقوع آبستنگی موضعی یکی از دلایل عمده عدم پایداری پل‌ها و در نهایت شکست آنها می‌باشد. تعیین حجم و عمق حفره آبستنگی اطراف سازه از این بابت دارای اهمیت است که از یک طرف بیانگر میزان پتانسیل

همه ساله پل‌های زیادی در سراسر جهان به دلیل در نظر نگرفتن نقش عوامل هیدرولیکی در طراحی آنها تخریب می‌شوند. بر طبق آمارهای ارائه شده توسط کشورهای مختلف می‌توان گفت تخریب اکثر پل‌ها نه در اثر ضعف‌های سازه‌ای بلکه در زمان وقوع سیل و در اثر پدیده آبستنگی در اطراف پایه‌ها رخ می‌دهند که نشان دهنده عدم شناخت لازم از خصوصیت رودخانه به عنوان یک بستر زنده می‌باشد. در این ارتباط می‌توان به خرابی چند پل بر روی رودخانه سچونهاری^۱ در سال ۱۹۸۷ در نیویورک و یا به تخریب پنج پل در سال ۱۹۹۵ در کالیفرنیا اشاره کرد. در

در عمق آبستنگی موضعی پدید آمده نشان ندادند در حالی که با قرار گرفتن شکافها در نزدیک بستر کانال کاهش بیشتری در عمق حفره آبستنگی مشاهده گردید. الرازک و همکاران^۳ (۲۰۰۳) تحقیقاتی را به منظور بررسی اثر شکاف پایه و اندازه آن بر کاهش عمق آبستنگی موضعی اطراف پایه پلها با استفاده از شکافهایی که در مقطع عرضی به صورت سه بازو و با زوایایی متفاوت نسبت بهم در پایهها ایجاد شده بودند انجام دادند. این شکافها با استفاده از قرار دادن لولههای پلاستیکی نازکی در عرض پایههای پل ایجاد گردیده بودند. نتایج نشان داد که بهترین حالت زمانی حاصل خواهد شد که شکافها در مقطع عرضی پایه پل حالتی عمود بر هم داشته باشند که سبب کاهش عمق آبستنگی موضعی اطراف پایههای پل به میزان ۵۴ درصد خواهد شد. همچنین با افزایش قطر شکافها کاهش بیشتری در آبستنگی موضعی اطراف پایههای پل به وقوع پیوست. شکاف با منحرف نمودن جریان رو به پایین و همچنین کاهش قطر موثر پایه موجب کاهش آبستنگی موضعی در اطراف پایه می شود. شکل (۱) نحوه استفاده از شکاف قائم را در یک پایه استوانه‌ای نشان می‌دهد که D قطر پایه، u_0 سرعت جریان، y_0 عمق جریان، y_L ارتفاع شکاف و w در تک پایه برابر عرض شکاف و در زوج پایه برابر فاصله بین دو پایه می‌باشد.

بر روی استفاده همزمان از شکاف پایه و دیگر روش‌های کاهش آبستنگی موضعی نیز تاکنون تحقیقاتی صورت گرفته است. چپو (۱۹۹۲) استفاده همزمان از شکاف پایه و طوقه قرار گرفته بر روی پایه پل را مورد آزمایش قرار داد. پیرمحمدی و حیدرپور (۱۳۸۵) بر روی استفاده از شکاف پایه و پوشش سنگریزه (ریپ ریپ) تحقیقاتی انجام دادند. نتایج نشان داد که استفاده از شکاف پایه مساحت پوشش سنگریزه لازم را کاهش داده و پایداری آن را افزایش می‌دهد. گرمالدی و همکاران^۴ (۲۰۰۹) استفاده همزمان از شکاف پایه و تیغه قرار گرفته در کف کانال و پشت پایه پل را مورد مطالعه قرار دادند. نتایج حاکی از آن بود که استفاده همزمان از این دو روش باعث کاهش قدرت گردابه‌های حلقوی برخاستی و نعل اسبی و لذا باعث کاهش بیشتر عمق حفره آبستنگی می‌گردد.

در زمینه کنترل و کاهش آبستنگی در تک پایه‌ها، روش‌های مختلفی توسط محققان پیشنهاد شده است. در این تحقیقات از سنگچین، طوقه، شکاف و نیز شمع‌های حفاظتی جهت کاهش آبستنگی استفاده گردید (بروسرز و همکاران^۵، ۱۹۷۷؛ چپو، ۱۹۸۶؛ لاچلان و همکاران^۶، ۲۰۰۱؛ ملویل و هادفیلد^۷، ۱۹۹۹). در گروه پایه‌ها نیز تاثیر شکاف پایه بر آبستنگی موضعی توسط محققانی مورد بررسی قرار گرفت (رادکیوی و ساترلند^۸، ۱۹۸۱؛ پایرام و لارسون^۹، ۲۰۰۰).

تخریب جریان در اطراف سازه بوده و از طرفی دیگر در طراحی ابعاد فونداسیون سازه‌هایی که در مسیر جریان قرار دارند لازم است طراح از میزان و نحوه آبستنگی در این نوع سازه‌ها آگاه باشد.

راهکارهای کاهش آبستنگی در اطراف پایه‌های پل را می‌توان به دو دسته کلی روش‌های پوششی همراه با مقاوم سازی بستر رودخانه و استفاده از وسایل دگرگون کننده جریان دسته بندی نمود. روش‌های پوششی در پایه پلها برای مقابله با تنش‌های برشی که در طی جریان‌های شدید ایجاد می‌شود به کار رفته و به صورت سپری در برابر آنها عمل می‌کنند. در حالی که هدف وسایل دگرگون کننده جریان و به بیان دیگر روش‌های هیدرولیکی حفاظت از پایه‌های پل، گسسته کردن میدان جریان اطراف پایه‌ها و در نتیجه کاهش قدرت فرسایش دهنده جریان رو به پایین و گردابه‌های نعل اسبی اطراف پایه‌های پل است. از روش‌های مقاوم سازی بستر برای پایه‌های میانی و کناری پلها می‌توان به استفاده از پوشش سنگریزه، قطعات بتن پیش ساخته، کیسه‌های پر شده از دوغاب سیمان، لایه محافظتی بتنی و استفاده از توری سنگی اشاره کرد. از وسایل دگرگون کننده جریان در پایه پلها نیز می‌توان به سپری‌های دایروی یا طوقه‌ها که دور پایه‌ها ساخته می‌شوند و شمع‌های فرعی یا اصطلاحاً شمع‌های فداشونده که در بالادست پایه‌های پل قرار می‌گیرند، اشاره نمود.

در سال‌های اخیر نیز استفاده از شکاف در پایه پل به عنوان روشی جدید در این زمینه مطرح گردیده است. هدف اصلی از شکاف، منحرف کردن جریان رو به پایین از بستر و کاهش قدرت برخورد جریان رو به پایین به بستر رودخانه است. عرض، ارتفاع و محل قرارگیری شکاف و طولی از شکاف که درون بستر رودخانه قرار می‌گیرد، عوامل مهم شکاف پایه پلها هستند. چپو^۱ (۱۹۹۲) تاثیر شکاف پایه را در کاهش عمق آبستنگی موضعی اطراف یک پایه پل دایروی در یک کار آزمایشگاهی مورد بررسی قرار داد. وی آزمایش‌های خود را با شکافهایی با مقطع مستطیلی و با عرض و ارتفاع‌های مختلف که در دو موقعیت متفاوت نزدیک سطح آب و نزدیک بستر کانال در پایه‌ها ایجاد گردیده بودند به انجام رسانید. نتایج نشان داد که با افزایش عرض و ارتفاع شکاف ایجاد شده در پایه از میزان عمق آبستنگی حداکثر ۲۰ درصد کاسته خواهد شد. کومار و همکاران^۲ (۱۹۹۹) پایه‌های پلی با دو اندازه بازشدگی شکاف و نیز ارتفاع‌های مختلف شکاف و زوایای مختلف قرارگیری نسبت به مسیر جریان را بررسی نمودند. نتایج تحقیق نشان داد که با امتداد دادن شکاف پایه تا بستر کانال عمق آبستنگی کاهش بیشتری می‌یابد. همچنین در صورتی که شکاف پایه با راستای جریان در کانال زاویه بسازد از میزان کارایی شکاف پایه کاسته خواهد شد. حیدرپور (۲۰۰۲) شکافهایی با دو ارتفاع مختلف در پایه‌های دایروی و نیز پایه‌های نوک گرد را مورد آزمایش قرار داد. نتایج به دست آمده برای شکافهایی که در نزدیکی سطح جریان قرار گرفتند کاهش موثری

3. El-Razck et al.

4. Grimaldi et al.

5. Breusers et al.

6. Lauch Lan and Melville

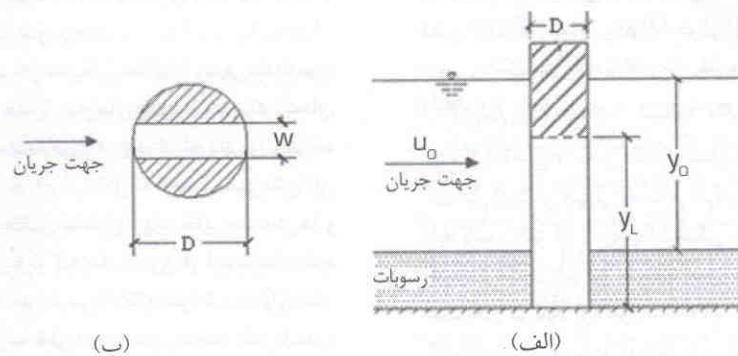
7. Melville and Hadfield

8. Raudkivi and Sutherland

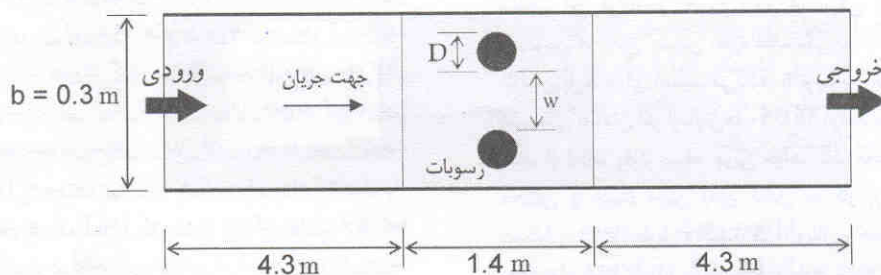
9. Bayram and Larson

1. Chiew

2. Kumar et al.



شکل ۱- نمایش شکاف در پایه استوانه‌ای: (الف) نمایش عرضی پایه استوانه‌ای و (ب) نمایش شکاف در پلان.



شکل ۲- پلان کانال تحت آزمایش و محل قرارگیری رسوبات و پایه‌ها

مواد و روش‌ها

برای تجزیه و تحلیل نتایج بدست آمده از مدل‌های فیزیکی، مشخص بودن هندسه فوم آزمایشگاهی و انتخاب ابعاد مدل بسیار مهم می‌باشد. در ساخت مدل سعی شده است تأثیر متغیرهایی مانند سرعت و عمق جریان، دانه‌بندی ذرات رسوبی که به طور غیر مستقیم روی میزان آبستگي تأثیر می‌گذارند، حذف شوند. بر اساس تحقیقات انجام گرفته توسط بروزرز و رادکیوی (۱۹۹۱) حداکثر عمق آبستگي در شرایط آب زلال رخ می‌دهد. لذا مدل بر اساس آبستگي آب زلال طراحی شده تا حداکثر عمق آبستگي ممکن مشاهده شود. کلیه مراحل آزمایش‌ها در کانالی واقع در آزمایشگاه هیدرولیک دانشکده کشاورزی دانشگاه فردوسی مشهد و به طول ۱۰ متر و عرض ۰/۳۰ متر و ارتفاع ۰/۵۲ متر صورت پذیرفته است. برای شبیه‌سازی بستر رودخانه و قرارگیری پایه‌ها، از رسوبات یکنواخت غیر چسبنده استفاده شد. بدین منظور در قسمت میانی کانال رسوبات در طول ۱/۳۵ متر و عمق ۰/۱۶ متر انباشته شد و کف کانال در قسمت بالادست و پایین‌دست این بخش نیز به کمک صفحات آلومینیومی زیر شده بالا آورده شد تا هم تراز قسمت رسوبات گردد. شکل (۲) نمایی از کانال تحت آزمایش و محل پایه‌ها و رسوبات را نشان می‌دهد که در آن D

با توجه به نتایج به دست آمده از تحقیقات صورت پذیرفته و تأثیر قابل قبول شکاف پایه در کاهش عمق تعادلی آبستگي موضعی اطراف پایه‌های پل استنباط می‌شود این روش می‌تواند به عنوان روشی مؤثر در حفاظت پل‌ها در برابر آبستگي موضعی مورد توجه مهندسين طراح قرار گیرد اما از طرفی در حال حاضر اطلاعات در مورد چگونگی طراحی شکاف‌های پایه جامع نبوده و تاکنون این روش در پل‌ها به صورت عملی به کار گرفته نشده است. همچنین نتایج اندک آزمایشگاهی موجود در مقالات نیز محدود بوده و اکثراً با شکاف‌هایی مستطیلی شکل و پایه‌های پل دایروی یا لبه گرد صورت پذیرفته‌اند. بنابراین انجام تحقیقات بیشتر برای شناخت هرچه بهتر مزایا و محدودیت‌های این روش برای کاربردی شدن آن در طرح‌های پل سازی ضروری به نظر می‌رسد. تأثیر شکاف بر کاهش آبستگي موضعی بیشتر در تک پایه‌ها مورد توجه بوده و تأثیر آن در گروه پایه‌ها نسبت به تک پایه کمتر مورد توجه قرار گرفته است. هدف از این تحقیق بررسی ایجاد شکاف پایه با ارتفاع و عرض‌های متفاوت و نیز فواصل قرارگیری دو پایه‌های مجاور هم که در جهت عمود بر جریان قرار گرفته‌اند، بر حجم و خطوط تراز حفره فرسایشی و تأثیر آن بر کاهش آبستگي موضعی می‌باشد.

یکنواختی ذرات رسوبی باعث کاهش عمق آبستنگی می‌شود، لذا سعی گردید از رسوبات یکنواخت در آزمایش‌ها استفاده شود. برای بررسی یکنواختی رسوبات از ضریب یکنواختی هندسی- $\sigma_g = (d_{84}/d_{16})^{0.5}$ استفاده گردید. در آزمایش‌ها، $1.2 < \sigma_g = 1.3$ حاصل شد که نشان از یکنواختی مواد رسوبی کف می‌باشد. در صورتی که عمق جریان بیشتر از سه برابر قطر پایه باشد، تأثیر آن را روی آبستنگی در اطراف پایه‌ها می‌توان نادیده گرفت در غیر این صورت، عمق جریان باعث کاهش عمق آبستنگی می‌شود (رادکیوی^۲، ۱۹۹۸). بنابراین با توجه به معیار گفته شده در تمام مراحل آزمایش‌ها از عمق ۱۰ سانتی‌متر استفاده شد.

پدیده آبستنگی در اطراف پایه پل‌ها، فرآیندی است که با گذشت زمان گسترش پیدا کرده و به حالتی تعادلی می‌رسد. شناخت این فرآیند و تخمین عمق آبستنگی در طی زمان و بخصوص در زمان رسیدن حفره آبستنگی به حالت تعادل برای طراحان پل‌ها دارای اهمیت می‌باشد. با توجه به رابطه نامی عمق آبستنگی با زمان اگر آزمایش‌ها ۹۰ تا ۹۵ درصد پیشرفتشان ادامه یابند، از لحاظ وقت صرفه جویی خواهد شد. محققان روش‌های مختلفی را جهت تعیین زمان تعادل به کار برده‌اند (کومار و همکاران، ۱۹۹۹؛ ملویل و چپو، ۱۹۹۹؛ ویتال و همکاران^۳، ۱۹۹۴). معیار زمان تعادل در این آزمایش‌ها، معیاری است که ملویل و چپو (۱۹۹۹) در پژوهش‌های خود در نظر گرفته‌اند و زمانی است که میزان آبستنگی در طی دوره ای ۲۴ ساعته کمتر از پنج درصد قطر پایه باشد. لذا یک آزمایش ۱۲ و ۲۴ ساعته برای مدل مینا جهت رسیدن به ۹۲ درصد عمق تعادل آبستنگی نهایی صورت پذیرفت. نتایج نشان داد که در طی مدت زمان ۲۴ ساعته تغییرات عمق آبستنگی نسبت به زمان ۱۲ ساعته در مدل مینا در حد ۰/۵ میلی‌متر می‌باشد. بدین منظور کلیه آزمایش‌ها در طی مدت زمان ۱۲ ساعته صورت پذیرفت.

مراحل انجام آزمایش‌ها

با مروری بر مطالعات انجام پذیرفته توسط محققین می‌توان دریافت که با استفاده از شکاف می‌توان قدرت جریان‌های رو به پائین را که عمده‌ترین عامل ایجاد حفره آبستنگی می‌باشند تضعیف نمود. پس از مشخص شدن ابعاد مدل، مشخصات رسوبات و نیز مشخصات کانال آزمایشگاهی، باید نسبت به انتخاب آرایش پایه‌ها اقدام شود. آرایش پایه‌ها بایستی به گونه‌ای طراحی گردد که اثر دیواره‌های کانال قابل چشم پوشی باشد. لذا به منظور مقایسه مکانیزم آبستنگی در گروه پایه‌ها با تک پایه، ابتدا آزمایش‌هایی در تک پایه استوانه‌ای در سرعت مورد نظر و در دو حالت شکاف‌دار و بدون شکاف صورت گرفت. در گروه پایه‌ها نیز

برای زوج پایه نشان داده شده با اقطار مساوی یکبار برابر ۱۸/۵ و بار دیگر برابر ۲۰/۴ میلی‌متر می‌باشد. ملویل (۱۹۷۵) در یک کار تحقیقاتی مطالعات وسیعی را در مورد ناحیه جریان، آشفستگی‌ها، تنش‌های برشی بستر و گردابه‌های برخاستی در شرایط آزمایشگاهی با استفاده از پایه دایروی و شرایط بستر هموار و صلب و جریان آب زلال به انجام رسانید. نتایج این مطالعه مورد استناد محققین متعددی جهت مقایسه آزمایش‌ها و مدل سازی‌های عددی قرار گرفته است. وی در آزمایش‌های خود از کانالی به طول ۱۹ متر، عرض ۰/۴۵۶ متر، شیب طولی بستر ۰/۰۱ درصد، پایه پلی به قطر ۰/۰۵۱ متر، رسوبات بستر با اندازه متوسط دانه‌ها برابر ۰/۳۸۵ میلی‌متر، سرعت متوسط جریان ۰/۲۵ متر بر ثانیه و عمق جریان ۰/۱۵ متر استفاده نمود. به منظور ایجاد امکان مقایسه نتایج این تحقیق با نتایج آزمایشگاهی ملویل، انتخاب پارامترها در مدل سازی حاضر با توجه به موضوعات زیر و نیز آنالیز ابعادی بین این پارامترها با پارامترهای در نظر گرفته شده در آن آزمایشات صورت گرفت. انتقال آب از مخزن به کانال توسط یک پمپ با دبی ثابت ۷/۶ لیتر بر ثانیه صورت گرفت. دبی در نظر گرفته شده در تمامی مراحل آزمایش‌ها با تعیین سرعت بحرانی (u_c) که سرعت در آستانه حرکت ذرات بوده انجام گردید. سپس سرعت جریان (u_0) که جهت نزدیک شدن به شرایط تشکیل حداکثر عمق آبستنگی موضعی در شرایط آب زلال به کار رفته، با در نظر گرفتن عمق جریان (۷۰٪) برابر ۱۰ سانتی متر و با استفاده از رابطه ارائه شده توسط ملویل و چپو^۱ (۱۹۹۹) با نسبت $u_0/u_c = 0.185$ حاصل شده است. اولین گام در مراحل انجام آزمایش‌ها تعیین ابعاد مدل و نیز تعیین مقادیر پارامترهای مجاز که بر عمق آبستنگی موثرند، می‌باشد. لذا در طرح ابعاد مدل به اثر جانبی دیواره‌های کانال بر عمق آبستنگی بایستی توجه شود. بنا بر پیشنهاد رادکیوی و اتما^۲ (۱۹۸۳) برای از بین رفتن تأثیر دیواره‌های کانال بر آبستنگی اطراف پایه بایستی نسبت فاصله محور پایه تا دیواره کانال به قطر پایه بزرگتر از ۶/۲۵ باشد. از این رو با توجه به ابعاد کانال و نحوه قرارگیری انتخاب شده برای پایه‌ها، قطر پایه‌ها به ترتیب مقادیر ۳۳/۵، ۲۰/۴ و ۱۸/۵ میلی‌متر انتخاب شدند. آنها همچنین اظهار داشتند در صورتی که نسبت D/d_{50} (اندازه متوسط ذرات رسوبی می باشد) بیشتر از ۲۵-۲۰ باشد عمق آبستنگی نهایی تحت تأثیر اندازه ذرات رسوبی قرار نمی‌گیرد. لذا با توجه به قطر انتخاب شده برای پایه‌ها و نیز جهت جلوگیری از تشکیل شکل‌های شکنج در بستر، d_{50} ذرات رسوبی بایستی از ۰/۷ میلی‌متر بزرگتر باشد. بنابراین d_{50} ذرات رسوبی برابر ۰/۸ میلی‌متر انتخاب گردید تا حداکثر مقدار آبستنگی به دست آید و هم از ایجاد پشته‌های کوچک جلوگیری شود (بروبرز و رادکیوی، ۱۹۹۱). با توجه به این که

می‌شد و برای نقاط گره در شبکه مقادیر موقعیت طولی، عرضی و ارتفاعی آن ثبت گردید. در مجموع تعداد ۴۹۳۲۴ نقطه برداشت و نمودارهای عمق نهایی آبستگي، حجم رسوبات جابجا شده و منحنی‌های تراز مدل‌های آزمایشی ترسیم شد. برای سهولت ارائه نتایج برای مدل‌ها نمادهایی انتخاب شدند که در جدول‌های (۱) و (۲) نشان داده شده‌اند.

در جدول (۱)، y_L نماد ارتفاع شکاف می‌باشد که در تک پایه‌ها دارای دو مقدار ۱۵ سانتی‌متر که تا سطح بستر رسوبات امتداد یافته و ۲۵ سانتی‌متر که به اندازه ۱۰ سانتی‌متر در داخل بستر امتداد یافته می‌باشد و در زوج پایه‌ها نیز برابر ۲۵ سانتی‌متر می‌باشد که به اندازه ۱۰ سانتی‌متر در داخل بستر امتداد یافته است. در نمودارهای مربوط به عمق نهایی آبستگي در تمامی مدل‌ها، محور افقی برابر نسبت بی بعد زمان (t) به زمان رسیدن به حالت تعادل ($t_e = 12 \text{ hr}$) می‌باشد، در حالی که محور قائم در مدل‌های تک پایه d_s/D و در مدل‌های زوج پایه $d_s/2D$ می‌باشد. نتایج مربوط به تک پایه بدون شکاف و تک پایه‌های شکاف‌دار در ارتفاع و عرض‌های مختلف در شکل ۳ (الف) نشان داده شده است. مقایسه عمق آبستگي در تک پایه بدون شکاف و پایه‌های شکاف‌دار در شکل ۳ (ب-الف) نشان می‌دهد که تأثیر شکاف در کاهش عمق آبستگي در ساعات اولیه بیشتر بوده است. بطوری که در تک پایه بدون شکاف ۸۰ درصد عمق

پایه‌های ساده استوانه‌ای توپر به صورت دوتایی در یک امتداد و به ترتیب با فواصل قرارگیری ۰، ۰/۲۵D، ۰/۵D، ۰/۷۵D و ۱D بین دو پایه استوانه‌ای معادل با مساحت سطح مقطع تک پایه‌های شکاف‌دار که در جهت عمود بر جریان قرار گرفته‌اند، در کانال نصب گردید. در مدل تک پایه شکاف‌دار نیز شکاف‌هایی به عرض ۰/۲D و ۰/۳D و در ترازهای مختلف یکی به ارتفاع ۱۵ سانتی‌متر که تا سطح بستر امتداد یافته و دیگری به ارتفاع ۲۵ سانتی‌متر که به میزان ۱۰ سانتی‌متر در داخل رسوبات گسترش می‌یابد، در پایه ایجاد گردید. عمق آبستگي بالادست و پایین‌دست در ساعات اول که سرعت فرسایش بسیار بالا است، هر پنج دقیقه یکبار ثبت شد. در ساعت دوم تا پنجم هر ۱۰، ۱۵، ۲۰، ۳۰ دقیقه یکبار و از ساعت ششم به بعد هر ۶۰ دقیقه یکبار برداشت انجام شد. در زوج پایه استوانه‌ای انتخاب قطرهای ذکر شده بر اساس مساحت باقی مانده از شکاف به عرض‌های مختلف در تک پایه استوانه‌ای انجام شد. هدف از انتخاب زوج پایه با قطرهای ذکر شده بررسی و مقایسه روند تغییرات عمق آبستگي آنها با تک پایه استوانه‌ای با ارتفاع و عرض‌های متفاوت و در نهایت انتخاب مدل‌های مناسب جهت کاهش عمق آبستگي می‌باشد.

نتایج و بحث

پس از انجام هر آزمایش یک شبکه مربعی به ابعاد 0.5×0.5 سانتی‌متر بر روی سطح بستر متحرک در نظر گرفته

جدول ۱- مدل‌های تک پایه معرفی شده جهت انجام آزمایش‌ها.

| مدل | تعداد پایه | اندازه عرضی شکاف (w/D) | اندازه طولی شکاف (y_L/D) |
|----------------|------------|----------------------------|------------------------------|
| M ₁ | ۱ | ۰/۰۰ | ۰/۰۰ |
| M ₂ | ۱ | ۰/۲۰ | ۴/۵۰ |
| M ₃ | ۱ | ۰/۳۰ | ۷/۴۰ |
| M ₄ | ۱ | ۰/۲۰ | ۷/۴۰ |
| M ₅ | ۱ | ۰/۳۰ | ۴/۵۰ |

جدول ۲- مدل‌های زوج پایه معرفی شده جهت انجام آزمایش‌ها.

| مدل | تعداد پایه | فاصله قرارگیری پایه‌ها (w/D) | مدل | تعداد پایه | فاصله قرارگیری پایه‌ها (w/D) |
|-----------------|------------|----------------------------------|-----------------|------------|----------------------------------|
| M ₆ | ۲ | ۰/۰۰ | M ₁₁ | ۲ | ۰/۰۰ |
| M ₇ | ۲ | ۰/۲۵ | M ₁₂ | ۲ | ۰/۲۵ |
| M ₈ | ۲ | ۰/۵۰ | M ₁₃ | ۲ | ۰/۵۰ |
| M ₉ | ۲ | ۰/۷۵ | M ₁₄ | ۲ | ۰/۷۵ |
| M ₁₀ | ۲ | ۱/۰۰ | M ₁₅ | ۲ | ۱/۰۰ |

مختلف، متفاوت می‌باشد. به طور مثال در M_{11} ، ۵۵ درصد عمق نهایی آبخستگی بعد از یک ساعت رخ داده است در حالی که در M_{12} ، ۶۴ درصد عمق نهایی آبخستگی، در M_{13} ، ۷۷ درصد عمق نهایی آبخستگی و در M_{14} و M_{15} ، ۶۸ درصد عمق نهایی آبخستگی بعد از مدت زمان یک ساعت از شروع آزمایش‌ها رخ می‌دهد (شکل ۴-الف).

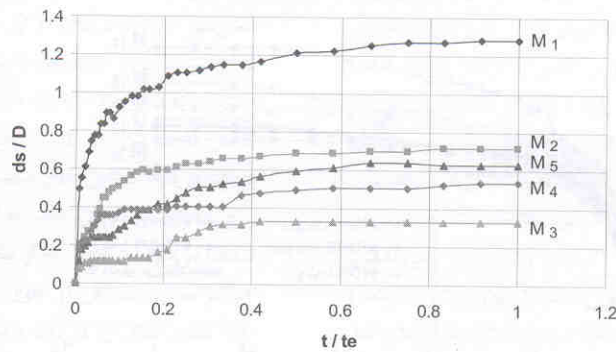
از طرف دیگر در زوج پایه استوانه‌ای به قطر مشخص با افزایش فاصله بین دو پایه عمق آبخستگی کاهش می‌یابد. به طوریکه در مدل‌های زوج پایه استوانه‌ای M_9 ، M_{10} ، M_8 و M_7 ، عمق نهایی آبخستگی به ترتیب به میزان $۱۷/۴$ ، $۲۳/۸$ و $۲۹/۴$ درصد نسبت به M_6 کاهش می‌یابد (شکل ۴-ب). مطابق شکل (۴-ب)، در مقایسه نتایج مدل‌های زوج پایه استوانه‌ای M_9 و M_{10} با مدل M_1 مشاهده می‌شود که عمق آبخستگی به ترتیب به میزان $۱۰/۵$ و $۳/۵$ درصد کاهش یافته است. علت این امر را می‌توان این‌گونه بیان کرد که در زوج پایه استوانه‌ای با افزایش فاصله بین دو پایه، از شدت گردابه‌های نعل اسبی شکل گرفته در مقابل دو پایه نزدیک وجه بالادست کاسته شده و تنش‌های برشی ایجاد شده در کف بستر و نیز گستردگی آنها کاسته می‌شود و این امر سبب کاهش پتانسیل آبخسویی مصالح و به خصوص کاهش سرعت جریان در داخل بازوهای بین دو پایه نسبت به سرعت جریان اطراف تک پایه ساده بدون شکاف شده و در نتیجه سبب کاهش عمق آبخستگی به میزان کمتری نسبت به مدل تک پایه استوانه‌ای بدون شکاف می‌شود. در شکل‌های (۴-الف) و (۴-ب) می‌توان گفت در مدل‌های M_{11} تا M_{15} در $t/t_e \geq 0/6$ تمامی مدل‌ها روندی تعادلی را به خود گرفته و ۹۴ درصد آبخستگی خود را به انجام رسانده‌اند و در مدل‌های M_6 تا M_{10} در $t/t_e \geq 0/8$ تمامی مدل‌ها روند تعادلی را در پیش گرفته و ۹۶ درصد آبخستگی خود را تجربه کرده‌اند. لذا با مقایسه بین گروه پایه‌های دوتایی که در جهت عمود بر راستای جریان قرار گرفته‌اند می‌توان به این نتیجه رسید که با افزایش قطر پایه (D) که در بخش مواد و روش‌ها در توضیحات شکل (۲) معرفی گردید، مدل‌ها در مدت زمان کوتاه‌تری به حالت تعادلی خود نزدیک می‌شوند که علت این امر را می‌توان به دلیل افزایش سرعت جریان در زوج پایه با قطر بزرگتر نسبت به زوج پایه با قطر کوچکتر دانست.

نتایج مربوط به حجم رسوب‌برداری در تک پایه و نیز زوج پایه استوانه‌ای در جدول (۳) ارائه شده است. با مشاهده نتایج حاصل از تک پایه‌های استوانه‌ای شکاف‌دار و بدون شکاف می‌توان گفت در عدد فرودی برابر $۲/۵$ ، با ایجاد شکاف در پایه پل، حجم انتقال رسوب از حفره آبخستگی کاهش می‌یابد و در نتیجه عمق آبخستگی نیز کاهش می‌یابد و ضمن آنکه با افزایش عرض شکاف در ارتفاع ثابت نیز از حجم انتقال رسوب بیشتر کاسته شده و به دنبال آن عمق آبخستگی نیز کاهش می‌یابد. به

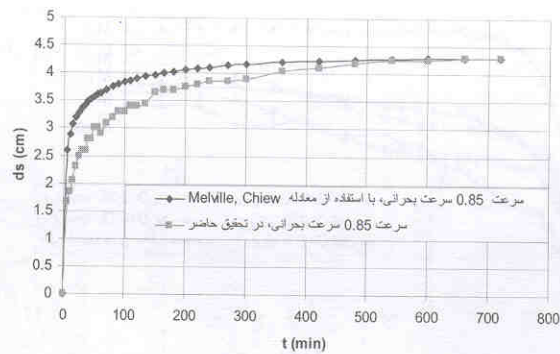
نهایی آبخستگی بعد از مدت دو ساعت و ۹۴ درصد آن بعد از هفت ساعت اتفاق افتاده است. در تک پایه‌های شکاف‌دار نیز با توجه به نوع مدل شکاف‌دار به طور متوسط ۷۵ درصد عمق نهایی آبخستگی بین زمان دو الی سه ساعت از زمان شروع آزمایش‌ها و ۹۵ درصد آن بعد از چهار الی نه ساعت اتفاق می‌افتد. با توجه به شکل (۳-الف)، می‌توان گفت در نسبت زمانی $t/t_e = 0/3$ ، مدل‌ها به سرعت به حالت تعادلی خود نزدیک می‌شوند که نشان دهنده آن است که در ساعات اولیه شروع آزمایش (فاز ابتدایی) به علت برخورد جریان رو به پایین در وجه بالادست پایه به بستر، آبخستگی با سرعت زیادی رخ می‌دهد و سپس در مرحله بعد (فاز فرسایش)، گردابه‌های نعل اسبی که سبب شروع فرآیند آبخستگی می‌شوند، تشکیل یافته که فرسایش اصلی در ناحیه جلو پایه رخ می‌دهد. در این مرحله حفره آبخستگی گسترش یافته و عمیق‌تر می‌شود. همچنین بر قدرت و اندازه گردابه‌های نعل اسبی نیز افزوده می‌گردد. در مرحله نهایی (فاز تعادل) و در نسبت زمانی $t/t_e = 0/3$ به بعد نیز آبخستگی به عمق تعادلی خود رسیده و از این رو آبخستگی بیشتری رخ نخواهد داد و گردابه‌های نعل اسبی نیز اثر فرساینده خود را از دست داده‌اند. در شکل (۳-ب) تغییرات زمانی عمق آبخستگی در تک پایه بدون شکاف در تحقیق حاضر با نتایج به دست آمده توسط مدل پیش‌بینی‌کننده تغییرات زمانی عمق آبخستگی توسط ملویل و چیو (۱۹۹۹) مورد بررسی قرار گرفته است. مدل تک پایه ساده بدون شکاف در تحقیق حاضر روند مشابهی را با مدل مذکور و در سرعت U_e $0/85$ به خصوص در ساعات نهایی نشان می‌دهد که نشان دهنده درستی آزمایش‌ها انجام گرفته در این تحقیق با نتایج ارائه شده توسط ملویل و چیو (۱۹۹۹) می‌باشد. اختلاف ناچیز بین دو منحنی ممکن است ناشی از تفاوت شرایط آزمایشگاهی این تحقیق نظیر عمق و سرعت جریان، دانه بندی ذرات رسوبی، قطر پایه‌ها، عدد فرود با مطالعات ملویل و چیو (۱۹۹۹) باشد.

مقایسه نتایج مدل‌های تک پایه بدون شکاف و شکاف‌دار در شکل (۳-الف) نشان می‌دهد مدل M_3 سبب کاهش عمق آبخستگی به میزان $۷۲/۵$ درصد نسبت به مدل تک پایه بدون شکاف می‌شود که نشان دهنده تأثیر افزایش عرض شکاف در افزایش جریان نزدیک شونده به پایه و نیز تضعیف و انحراف جریان رو به پایین و کاهش توان فرسایش و در نهایت شکسته شدن گردابه‌های نعل اسبی شکل گرفته در اطراف پایه خواهد شد که این امر سبب کاهش عمق آبخستگی موضعی در اطراف تک پایه می‌شود. همچنین می‌توان گفت با افزایش نسبت w/D میزان تأثیر شکاف در حفاظت از پایه پل در برابر حفره آبخستگی موضعی افزایش می‌یابد.

نتایج مربوط به تغییرات عمق آبخستگی در مدل‌های زوج پایه و در فواصل قرارگیری مختلف در شکل‌های (۴-الف) و (۴-ب) و در سرعت U_e $0/85$ نشان داده شده است. در زوج پایه‌های استوانه‌ای، تغییرات عمق آبخستگی در فواصل قرارگیری



(الف)

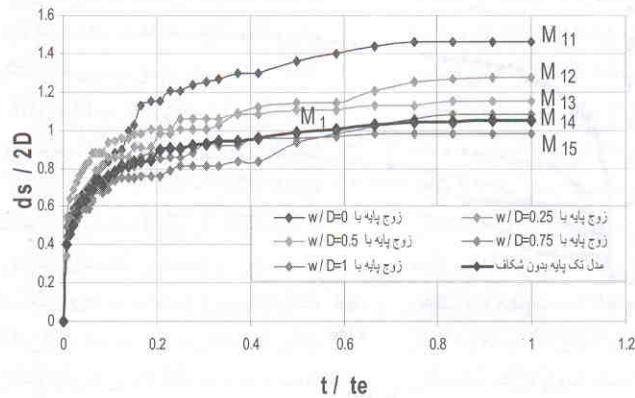


(ب)

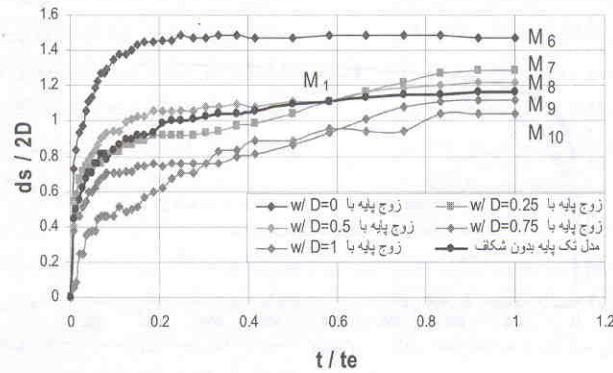
شکل ۳- تغییرات زمانی عمق آبستگي در تک پایه استوانه‌ای، (الف) بدون شکاف و شکاف‌دار در سرعت ۰/۸۵ سرعت بحرانی، (ب) بدون شکاف با استفاده از معادله ملویل و چيو (۱۹۹۹).

جدول ۳- حجم انتقال رسوب در مدل‌های تک پایه و زوج پایه‌های استوانه‌ای

| حجم رسوب برداری (سانتی‌متر مکعب) | مدل | حجم رسوب برداری (سانتی‌متر مکعب) | مدل | حجم رسوب برداری (سانتی‌متر مکعب) | مدل |
|-------------------------------------|-----------------|-------------------------------------|-----------------|-------------------------------------|----------------|
| ۱۵۰۰ | M ₁₁ | ۱۱۰۰ | M ₆ | ۶۸۰ | M ₁ |
| ۸۹۰ | M ₁₂ | ۸۸۰ | M ₇ | ۴۱۰ | M ₂ |
| ۸۵۰ | M ₁₃ | ۷۵۰ | M ₈ | ۱۱۰ | M ₃ |
| ۷۱۰ | M ₁₄ | ۶۶۰ | M ₉ | ۱۷۰ | M ₄ |
| ۶۱۰ | M ₁₅ | ۵۹۰ | M ₁₀ | ۱۶۰ | M ₅ |



(الف)



(ب)

شکل ۴- مقایسه اعماق آبستگي نسبي در زوج پایه‌ها با فواصل قرارگيري متفاوت، (الف) به قطر ۲۰/۴ میلی‌متر، (ب) به قطر ۱۸/۵ میلی‌متر

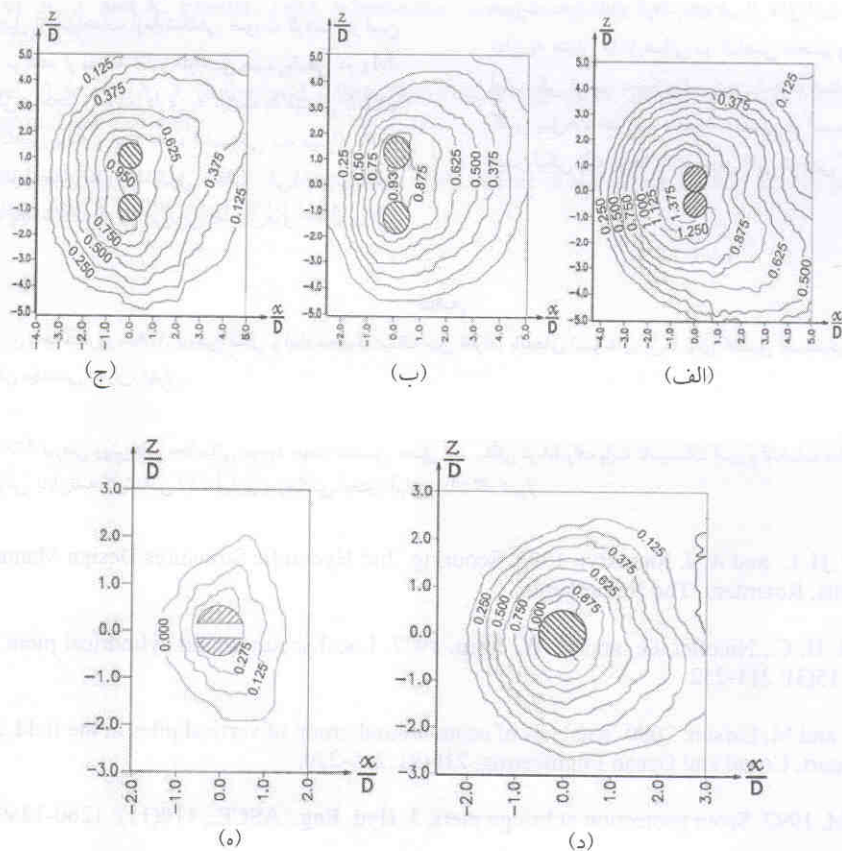
با مقایسه نتایج به دست آمده از زوج پایه‌های استوانه‌ای مشاهده می‌شود که با افزایش فاصله بین دو پایه به علت کاهش فشردگی بازوهای داخلی گردابه‌های بهم فشرده در بین دو پایه و کاهش قدرت آبشویی رسوبات، میزان حجم رسوب‌برداری کاهش می‌یابد و در نهایت عمق آبستگي نیز کاهش می‌یابد. بیشترین حجم رسوب‌برداری در مدل‌های M_6 و M_{11} و کمترین حجم رسوب‌برداری مربوط به مدل‌های M_{10} و M_{15} می‌باشد. با مشاهده احجام ارائه شده در جدول (۳) مشخص است که عمق آبستگي با حجم رسوبات جابجا شده رابطه مستقیمی داشته و هرچه حجم رسوب‌برداری بیشتر باشد، عمق آبستگي پایه پل نیز بیشتر خواهد بود. بررسی خطوط تراز در حفره آبستگي جنبه دیگری از مقایسه روند آبستگي در مدل‌های مختلف انتخابی است. در این مقاله به تجزیه و تحلیل تعدادی از نتایج به دست آمده اشاره می‌شود. همان‌طور که از اشکال‌های (۵-الف) تا (۵-ه) مشاهده می‌شود، گسترش حفره آبستگي به قطر تک پایه، عرض و موقعیت قرارگيري شکاف در تک پایه، قطر و فواصل

طور مثال در M_2 ، حجم رسوب‌برداری برابر ۴۱۰ (سانتی‌متر مکعب) و در حالی که در M_5 ، حجم رسوب‌برداری برابر ۱۶۰ (سانتی‌متر مکعب) می‌باشد و نیز در عدد فرود ۲/۵ و با افزایش ارتفاع شکاف در عرض ثابت عمق آبستگي کاهش می‌یابد. به عنوان مثال با مقایسه مدل‌های M_3 و M_5 در جدول (۳) مشاهده می‌شود که حجم رسوب‌برداری به ترتیب برابر ۱۶۰ و ۱۱۰ سانتی‌متر مکعب بوده که حاکی از کاهش عمق آبستگي با افزایش ارتفاع شکاف می‌باشد. با مقایسه و بررسی نتایج می‌توان گفت بیشترین حجم انتقال رسوب از حفره آبستگي مربوط به مدل تک پایه استوانه‌ای بدون شکاف M_1 و کمترین حجم انتقال رسوب از حفره آبستگي مربوط به M_3 می‌شود. لذا استنباط می‌شود ایجاد شکاف در بدنه پایه باعث کاهش قدرت گردابه‌های نعل اسبی شده و از شدت جریان رو به پایین می‌کاهد و حجم انتقال رسوب از حفره آبستگي کاهش یافته که این امر سبب کاهش عمق آبستگي در تک پایه‌های شکاف‌دار نسبت به تک پایه بدون شکاف می‌شود.

نیز تقارن در حفره آبستگی در اطراف پایه‌ها را مشاهده نمود. همان‌طور که از شکل‌های مذکور مشاهده می‌شود با توجه به شعاع آبستگی در اطراف پایه‌ها به نظر می‌رسد حفره آبستگی در زوج پایه نسبت به تک پایه دارای شعاع بزرگتری می‌باشد که با کاهش فاصله بین زوج پایه استوانه‌ای ابعاد حفره آبستگی نیز بزرگتر می‌شود که این عامل سبب افزایش عمق آبستگی در زوج پایه‌های استوانه‌ای نسبت به تک پایه‌های شکاف‌دار و بدون شکاف می‌شود. همان‌طور که از شکل مشاهده می‌شود در تک پایه حداکثر عمق آبستگی در جلوی پایه رخ داده و در زوج پایه نیز دقیقاً همین اتفاق رخ می‌دهد. با مقایسه بین مدل‌های نشان داده شده در شکل (۵) می‌توان نتیجه گرفت که علاوه بر ایجاد شکافی با ارتفاع و عرض مشخص در تک پایه استوانه‌ای، ایجاد زوج پایه استوانه‌ای با قطر و فاصله قرارگیری مشخص نیز می‌تواند در کاهش آبستگی موضعی موثر باشد. اعداد نمایش داده شده در شکل (۵) بیانگر نسبت عمق آبستگی در هر مدل (d_s) به عمق آبستگی حداکثر در مدل M_1 ، ($d_{s \max} M_1$) می‌باشد.

قرارگیری زوج پایه استوانه‌ای نسبت بهم، اندازه ذرات رسوبی و نیز سرعت جریان بستگی دارد. به طوری که در تک پایه با افزایش عرض شکاف در ارتفاع ثابت و بر عکس با افزایش ارتفاع شکاف در عرض ثابت و نیز در زوج پایه با افزایش فاصله بین دو پایه گسترش حفره آبستگی نیز کمتر خواهد بود و عمق آبستگی نیز کاهش می‌یابد. لذا به ترتیب با توجه به شکل‌های ارائه شده، عمق نهایی آبستگی (d_s) در موقعیت $x/D = -0.5$ به ترتیب برابر 0.054 ، 0.040 ، 0.038 ، 0.043 و 0.011 متر می‌باشد. با توجه به مطالب ذکر شده می‌توان گفت که اولاً در زوج پایه‌ها و در عدد فرود $2/5$ ، در موقعیت قرارگیری یکسان، با افزایش قطر پایه‌ها، عمق آبستگی افزایش می‌یابد و ثانیاً در تک پایه‌های استوانه‌ای با ارتفاع شکاف ثابت، با افزایش عرض شکاف، عمق آبستگی کاهش می‌یابد. به طور مثال در M_{10} عمق آبستگی (d_s) برابر 0.038 متر و در M_{15} عمق آبستگی برابر 0.040 متر می‌باشد.

در موقعیت عرضی نسبی نیز چه در مدل‌های تک پایه و چه در مدل‌های زوج پایه استوانه‌ای می‌توان تقارن در الگوی بستر و



شکل ۵- منحنی‌های تراز حفره آبستگی بدون بعد برای $d_s/d_{s \max} M_1$: (الف) مدل M_{11} ، (ب) مدل M_{15} ، (ج) مدل M_3 ، (د) مدل M_{10} و (ه) مدل M_1

M_2 اشاره کرد که سبب کاهش عمق آبستنگی به میزان $58/1$ ، $51/2$ و $44/2$ درصد نسبت به مدل تک پایه بدون شکاف می-شوند. در کلیه حالات آرایش قرارگیری زوج پایه‌ها با افزایش فاصله بین آنها از عمق آبستنگی کاسته می‌شود به طوریکه در فواصل قرارگیری w/D برابر $0/25$ ، $0/5$ ، $0/75$ و 1 عمق آبستنگی به ترتیب به میزان $12/6$ ، $21/0$ ، $26/1$ و $32/8$ درصد نسبت به زمانی که پایه‌ها کاملاً بهم چسبیده باشند ($w/D = 0$) کاهش می‌یابد. لذا در زوج پایه‌ها در فاصله قرارگیری $w/D = 1$ انتقال رسوب کمتر از سایر مدل‌های زوج پایه بوده که این امر سبب کاهش عمق و حجم حفزه آبستنگی به ترتیب به میزان $31/1$ و $11/8$ درصد می‌شود. در صورتی که رفتار جریان در بین دو پایه با فاصله کم از یکدیگر را با جریان در یک پایه شکافدار مقایسه شود، نتایج نشان می‌دهد که در زوج پایه‌ها با فاصله قرارگیری $w/D = 1$ (M_{15} و M_{10}) سبب کاهش عمق آبستنگی نسبی به ترتیب به میزان $13/2$ و $7/5$ درصد نسبت به مدل تک پایه بدون شکاف می‌شوند و با افزایش فاصله بین دو پایه به فاصله‌ای بزرگتر از قطر پایه انتظار می‌رود رفتار پایه‌ها به صورت مجزا ظاهر گردد. بنابر این از مدل‌های بیان شده فوق می-توان به عنوان مدل‌هایی در کاهش حجم و نیز عمق نهایی آبستنگی نسبت به تک پایه بدون شکاف استفاده کرد که پایداری کلی پل‌ها حفظ و خطرات ناشی از آسیب‌های سازه‌ای و هیدرولیکی پایه پل‌ها را به میزان قابل توجهی کاهش داد.

با توجه به منحنی‌های تراز حفزه فرسایشی در شکل (۵) مشاهده می‌شود که در زوج پایه‌ها در مدل M_{11} نسبت $(d_s/d_{s,max} M_1)$ برابر $1/375$ و در حالی که در M_{15} برابر $0/93$ می‌باشد که این امر نشان دهنده تأثیر افزایش فاصله زوج پایه‌ها در کاهش عمق آبستنگی موضعی می‌باشد. از طرفی دیگر در مدل M_1 این نسبت برابر $1/00$ می‌باشد که در مقایسه مدل M_{11} با مدل M_1 مشاهده می‌شود که عمق آبستنگی نه تنها کاهش نداشته، بلکه قرارگیری زوج پایه‌ها کنار هم سبب افزایش این عمق نسبت به تک پایه بدون شکاف می‌شود. تنها در مدل-های M_{15} و M_{10} عمق آبستنگی کمتر از M_1 می‌باشد که نشان دهنده عملکرد مناسب زوج پایه‌های فاصله‌دار از یکدیگر در کاهش عمق آبستنگی می‌باشد. در مدل M_3 نیز نسبت $(d_s/d_{s,max} M_1)$ برابر $0/275$ می‌باشد که در مقایسه با M_1 مشاهده می‌شود ایجاد شکاف سبب کاهش قابل ملاحظه‌ای در عمق آبستنگی به میزان $72/5$ درصد می‌شود.

نتیجه‌گیری

نتایج حاصل از مشاهدات آزمایشگاهی صورت گرفته در این تحقیق نشان می‌دهد از نقطه نظر طراحی هیدرولیکی در M_3 ، عمق آبستنگی و حجم رسوب‌برداری به ترتیب به میزان $22/5$ و $83/8$ درصد کاهش یافته و ابعاد حفزه آبستنگی به میزان $70/9$ درصد کوچک‌تر از مدل تک پایه بدون شکاف می‌شود. در سایر مدل‌های تک پایه شکافدار نیز می‌توان به مدل‌های M_4 ، M_5 و

منابع

۱. پیر محمدی، ر. و م. حیدرپور. ۱۳۸۵. بررسی شکل و ابعاد محدوده سنگ چین اطراف پایه‌های استوانه‌ای پل‌ها برای کنترل آبستنگی موضعی. هفتمین کنگره بین‌المللی مهندسی عمران، تهران.
۲. قربانی، ب. ۱۳۶۷. بررسی روش‌های محاسباتی موجود جهت تخمین عمق آبستنگی در اطراف پایه تاسیسات آبی و انتخاب مناسب‌ترین روش در رودخانه‌های فارس. پایان‌نامه کارشناسی ارشد آبیاری و زهکشی، بخش آبیاری، دانشگاه شیراز.
3. Breusers, N. H. C. and A. J. Raudkivi. 1991. Scouring. 2nd Hydraulic Structures Design Manual, IAHR, A.A. Balkema, Rotterdam, The Netherlands.
4. Breusers, N. H. C., Nicollet, G., and H. W. Shen. 1977. Local scour around cylindrical piers. IAHR, J. Hyd. Res., 15(3): 211-252.
5. Bayram, A. and M. Larson. 2000. Analysis of scour around group of vertical piles in the field. Journal of Waterway, port, Coastal and Ocean Engineering, 216(9): 215-220.
6. Chiew, Y. M. 1992. Scour protection at bridge piers. J. Hyd. Eng., ASCE., 118(11): 1260-1269.
7. Chiew, Y. M. 1986. Mechanism of riprap failure at bridge piers. J. Hyd. Eng., ASCE., 121(9): 633-643.
8. El-Razck, M. A., El-Motaleb, M. A. and M. Bayoumy. 2003. Scour reduction around bridge piers using internal openings through the pier. J. Alexandria Engineering, 42(2): 241-248.

9. Grimaldi, C., Gaudio, R., Calomino, F. and A. H. Cardoso. 2009. Countermeasures against local scouring at bridge piers: slot and combined system of slot bed sill. *J. Hyd. Eng., ASCE.*, 135(5): 425-431.
10. Heidarpour, M. 2002. Control and reduction of local scour at bridge piers by using slot. *River flow 2002*, D. Bousmar and Y. Zech, eds., Balkema, Rotterdam, The Netherlands., 2: 1069-1072.
11. Kumar, V., Ranga Raju, K. G. and N., Vittal. 1999. Reduction of local scour around bridge piers using slots and collars. *J. Hyd. Eng., ASCE.*, 125(12): 1302-1305.
12. Lauchlan, G. S., and B. W. Melville. 2001. Riprap protection at bridge piers. *J. Hyd. Eng., ASCE.*, 127(5): 412-418.
13. Melville, B. W. 1975. Local scour at bridge sites. Rep. No. 117, Dept. of Civil Engineering, School of Engr., Univ. of Auckland, Auckland, New Zealand.
14. Melville, B.W. and Y. M. Chiew. 1999. Time scale for local scour at bridge piers. *J. Hyd. Eng., ASCE.*, 125(1): 59-65.
15. Melville, B.W. and A. C. Hadfield. 1999. Use of sacrificial piles as pier scour countermeasures. *J. Hyd. Eng., ASCE.*, 125(11): 1221-1224.
16. Raudkivi, A. J. 1998. *Loose boundary hydraulics*. A.A. balkema, Rotterdam, The Netherland.
17. Raudkivi, A. J. and R. Ettema. 1983. Clear-water scour at cylindrical piers. *J. Hyd. Eng., ASCE.*, 109(3):338-350.
18. Raudkivi, A.J. and A. J. Sutherland. 1981. Scour at bridge piers. Road Research Unit, Bulltin 54, Wellington, New Zealand.
19. Vittal, N., Kothyari, U. C. and M. Haghightat. 1994. Clear-Water scour around bridge pier group. *J. Hyd. Eng., ASCE.*, 120(11): 1309-1318.