



بررسی آزمایشگاهی اثر هندسه شکاف پایه و پایه های مجاور هم بر کاهش آبشستگی موضعی

امیرحسین آقاخانی افشار، محمود فغفور مغربی، کاظم اسماعیلی

دانشجوی کارشناسی ارشد سازه های هیدرولیکی، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد

دانشیار گروه مهندسی عمران، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد

استادیار گروه مهندسی آب دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد

amirhoseinaghakhanei@yahoo.com
maghrebi@ferdowsi.um.ac.ir
esmaili@ferdowsi.um.ac.ir

خلاصه

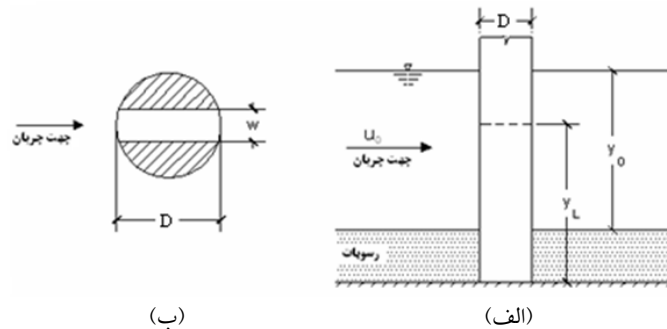
اثرات انسانی بر ویژگی های رودخانه ها منجر به بروز عکس العمل از طرف رودخانه می شود. در این راستا احداث پایه های پل بر روی رودخانه تغییر در شرایط طبیعی آن قلمداد می شوند. این تغییر در شرایط طبیعی رودخانه بصورت آبشستگی موضعی ظاهر می شود. از اینرو تحقیقات وسیعی برای دستیابی به روش هایی که بتوان آبشستگی موضعی را کنترل و مقدار آن را کاهش داد، انجام می پذیرد. در این تحقیق با هدف کاهش اثرات آبشستگی موضعی ایجاد شکاف در پایه پل و نیز شبیه سازی آن با قرارگیری دو پایه در مجاورت یکدیگر مورد بررسی قرار گرفته است. بدین منظور حالات مختلفی از شکاف با عرض های مختلف در تک پایه استوانه ای و در ترازهای مختلف و نیز فواصل قرارگیری بین دو پایه استوانه ای معادل با مساحت تک پایه های شکاف دار که در جهت جریان قرار گرفته اند، مورد بررسی آزمایشگاهی قرار گرفت. در این راستا با ساخت مدلی از پایه های پل و قرار دادن آنها در بستری با رسوبات با دانه بندی مشخص مطالعات آبشستگی موضعی تحت جریان آب زلال در حالات مختلف مورد مطالعه قرار گرفت. نتایج حاصل از آزمایشات نشان داد که در تک پایه استوانه ای زمانیکه در پایه شکافی به عرض $0/3$ قطر پایه که تا سطح بستر فرسایش ناپذیر امتداد یافته است ایجاد گردد، عمق آبشستگی به میزان $74/4$ درصد کاهش می یابد. در گروه پایه ها نیز در حالت $w/D=1$ (که w فاصله بین دو پایه و D قطر پایه است) و زمانیکه قطر پایه برابر $18/5$ میلی متر باشد، عمق آبشستگی به میزان $29/4$ درصد و زمانیکه قطر پایه برابر $20/4$ میلی متر باشد این عمق به میزان $32/8$ درصد نسبت به عمق آبشستگی در تک پایه کاهش می یابد.

کلمات کلیدی: پایه پل، آبشستگی موضعی، شکاف پایه، دو پایه مجاور هم، آب زلال

۱. مقدمه

همه ساله پل های زیادی در سراسر جهان به دلیل در نظر نگرفتن نقش عوامل هیدرولیکی در طراحی آن ها تخریب می شوند [۱]. بهترین شاهد این گفتار سیلاب ویرانگر در سال ۱۹۸۷ می باشد که تعداد زیادی پل بر روی رودخانه سچوهاری واقع در نیویورک در اثر پدیده آبشستگی تخریب گردید و در سال ۱۹۹۵ در ایالت کالیفرنیا که تعداد ۵ پل در اثر همین پدیده ویران گردید [۲]. در کشور خودمان نیز در سال ۱۳۶۵ تعداد زیادی از پل های ساخته شده در اثر سیلاب رخ داده در استان فارس از بین رفت [۳]. عواملی نظیر تنگ شدگی مسیر جریان و ایجاد جریان های ثانویه و گردابی در اطراف پایه ها موجب آبشستگی موضعی ذرات در اطراف پایه می شود که شکل غالب جریان در نزدیک یک پایه سیستم گردابی است که در اطراف پایه توسعه یافته و مکانیزم اصلی آبشستگی را تشکیل می دهد که اجزاء اصلی این سیستم جریان رو به پایین، گرداب نعل اسبی و گرداب های جاری می باشند. وقوع آبشستگی موضعی یکی از دلایل عمده عدم پایداری پل ها و در نهایت شکست آنها می باشد. به این ترتیب روش های مناسب جهت کاهش و کنترل عمق آبشستگی از جمله مسائلی است که بسیار مورد توجه بوده است. این روش ها در دو فاز متفاوت، مقابله با فرسایش و از بین بردن عامل فرسایش انجام

می‌شود. در بخش اول با بکارگیری مواد و مصالح متفاوت مانند انواع سنگ چین‌های حفاظتی یا سنگریزهای حفاظتی در اطراف پایه پل سعی در جلوگیری از حرکت ذرات بستر می‌نمایند و در روش دیگر تلاش در جهت حذف عوامل فرسایش دهنده مانند جریان‌های ثانویه و گرداب‌های نعل اسبی شده است. استفاده از شکاف در پایه پل‌ها از جمله شیوه‌های نوین کنترل و کاهش آبهستگی موضعی می‌باشد. چپو در سال ۱۹۹۲ تاثیر شکاف را در دو موقعیت نزدیک بستر و سطح آب، بر میزان آبهستگی بررسی نمود. تحقیقات وی نشان داد که عملکرد شکاف در کاهش عمق آبهستگی با افزایش طول و عرض شکاف افزایش می‌یابد [۴]. همچنین کومار و همکاران در سال ۱۹۹۹ از شکاف به عنوان تمهیدی جهت کاهش آبهستگی در تک پایه‌های استوانه‌ای شکل استفاده کردند و نتایج نشان داد که شکاف امتداد یافته تا سطح بستر در کاهش آبهستگی موضعی موثر است [۵]. در زمینه کنترل و کاهش آبهستگی در تک پایه‌ها، روش‌های مختلفی توسط محققان پیشنهاد شده است که از آن جمله می‌توان به تحقیقات چپو (۱۹۸۶)، بروزرز و همکاران (۱۹۷۷)، ورمن (۱۹۸۹)، چپو (۱۹۹۲)، سینگ و همکاران (۱۹۹۵)، لوجلان و ملویل (۲۰۰۱)، کومار (۱۹۹۶)، و ملویل و هادفیلد (۱۹۹۹) اشاره نمود که آنها در تحقیقاتشان از سنگچین، طوقه و شمع‌های حفاظتی جهت کاهش آبهستگی استفاده کردند [۶، ۷، ۸، ۹، ۱۰، ۱۱، ۱۲]. در گروه پایه‌ها نیز تاثیر شکاف پایه بر آبهستگی موضعی توسط محققانی از جمله بایرام و لارسن (۲۰۰۰) و رودکیوی و ساترلند (۱۹۸۱) بررسی شده است [۱۳، ۱۴]. شکاف با منحرف نمودن جریان رو به پایین و همچنین کاهش قطر موثر پایه موجب کاهش آبهستگی موضعی در اطراف پایه می‌شود. 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 طول شکاف و w در تک پایه برابر عرض شکاف و در زوج پایه برابر فاصله بین دو پایه می‌باشد.



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

تاثیر شکاف بر کاهش آبهستگی موضعی بیشتر در تک پایه‌ها مورد توجه بوده و تاثیر آن در گروه پایه‌ها نسبت به تک پایه کمتر مورد توجه قرار گرفته است. لذا هدف از این تحقیق بررسی نحوه آرایش هندسه شکاف در تک پایه استوانه‌ای با طول و عرض‌های مختلف و نیز در دو گروه از زوج پایه استوانه‌ای با قطرهای متفاوت نسبت به گروه دیگر و با فواصل قرارگیری معین از یکدیگر که در جهت جریان قرار گرفته‌اند، می‌باشد.

۲. مواد و روشها و طرح ابعاد مدل

به دلیل آنکه نتایج حاصل از این تحقیق مبتنی بر اطلاعات به دست آمده از آزمایش بر روی مدل فیزیکی است، هندسه فلوم آزمایشگاهی و انتخاب ابعاد مدل بسیار مهم می‌باشد. در ساخت مدل سعی شده است تاثیر متغیرهایی که به طور غیر مستقیم روی میزان آبهستگی تاثیر می‌گذارند، حذف شوند. بر اساس تحقیقات انجام گرفته حداکثر عمق آبهستگی در شرایط آب زلال رخ می‌دهد لذا مدل بر اساس آبهستگی آب زلال طراحی شده تا حداکثر عمق آبهستگی ممکن مشاهده شود [۱۵]. کلیه مراحل آزمایشات در کانالی به طول ۱۰ متر و عرض ۰/۳۰ متر و ارتفاع ۰/۵۲ متر صورت پذیرفته است. دیواره کانال از جنس شیشه بوده و در وسط کانال و در محدوده‌ای به طول ۱/۳۵ متر و به ارتفاع ۰/۱۶ متر از رسوبات با دانه بندی یکنواخت و غیر چسبنده که مدل‌ها در داخل آن نصب گردید پر می‌شود و کف کانال در طرفین محدوده رسوبات توسط صفحاتی از جنس آلومینیوم تا ارتفاع ۰/۱۶ متر بالا آورده شد. 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 آزمایشات با تعیین سرعت بحرانی (u_c) که سرعت در آستانه حرکت ذرات بوده و سپس تعیین سرعت جریان (u_0) که جهت نزدیک شدن به شرایط



تشکیل حداکثر عمق آبشستگی موضعی در شرایط آب زلال بکار رفته، با در نظر گرفتن عمق جریان (Y_0) برابر ۱۰ سانتی متر و با استفاده از رابطه ارائه شده توسط ملویل با نسبت $u_0/u_c = 0.86$ حاصل شده است [۱۹]. اولین گام در مراحل انجام آزمایشات تعیین ابعاد مدل و نیز تعیین مقادیر پارامترهای معیار که بر عمق آبشستگی موثرند، می‌باشد. لذا در طرح ابعاد مدل به اثر جانبی دیواره‌های کانال بر عمق آبشستگی بایستی توجه شود. طبق معیار رودکیوی و اتما (۱۹۸۳) برای از بین رفتن تاثیر دیواره‌های کانال بر آبشستگی اطراف پایه بایستی نسبت فاصله محور پایه تا دیواره کانال به قطر پایه بزرگتر از $6/25$ باشد [۱۶]. با توجه به این موضوع و نیز توجه به ابعاد کانال و با توجه به آرایش انتخاب شده برای پایه‌ها، قطر پایه‌ها به ترتیب مقادیر $33/5$ ، $20/4$ و $18/5$ میلی متر انتخاب می‌شوند. طبق تحقیقات صورت گرفته در صورتیکه نسبت D/d_{50} (اندازه متوسط ذرات رسوبی و D قطر پایه می‌باشد) بیشتر از $25-20$ باشد عمق آبشستگی متعادل تحت تاثیر اندازه ذرات رسوبی قرار نمی‌گیرد [۱۶]. 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 0.7 میلی متر بزرگتر باشد بنابراین این d_{50} ذرات رسوبی برابر 0.8 میلی متر انتخاب گردید تا حداکثر مقدار آبشستگی بدست آید و هم از ایجاد پشته‌های کوچک جلوگیری شود [۱۵]. با توجه به این که غیر یکنواختی ذرات رسوبی باعث کاهش عمق آبشستگی می‌شود، لذا سعی گردید از رسوبات یکنواخت در آزمایشات استفاده شود. برای بررسی یکنواختی رسوبات از رابطه $\sigma_g = (d_{84}/d_{16})^{1/2}$ استفاده کرده که در آن σ_g انحراف معیار هندسی ذرات می‌باشد. بنابراین این مصالح تهیه شده از بین چهار الک متوالی به شماره‌های ۸، ۱۶، ۳۰ و ۵۰ عبور داده شده تا ذراتی با انحراف استاندارد هندسی $1/3$ حاصل شوند، در این صورت اثر غیر یکنواختی ذرات قابل صرف نظر کردن می‌باشد [۱۶]. در صورتیکه عمق جریان بیشتر از سه برابر قطر پایه باشد، تاثیر آن را روی آبشستگی در اطراف پایه‌ها می‌توان نادیده گرفت در غیر این صورت، عمق جریان باعث کاهش عمق آبشستگی می‌شود، بنابراین با توجه به معیار گفته شده در تمام مراحل آزمایشات از عمق ۱۰ سانتی متر استفاده می‌شود [۱۷].

پدیده آبشستگی در اطراف پایه پل‌ها، فرآیندی است تابع زمان و با گذشت زمان گسترش پیدا کرده و به حالتی تعادلی می‌رسد. شناخت این فرآیند و توانایی تخمین عمق آبشستگی در طی زمان و بخصوص در زمان رسیدن حفره آبشستگی به حالتی تعادلی برای طراحی پل‌ها دارای اهمیت می‌باشد. محققان روش‌های مختلفی را برای بدست آوردن زمان تعادل بکار برده‌اند که از آن جمله می‌توان به کارهای چپو (۱۹۹۲)، کومار و همکاران (۱۹۹۹)، وایتال و همکاران (۱۹۹۴) و ملویل و چپو (۱۹۹۹) اشاره نمود [۱۹، ۱۸، ۵، ۴]. معیار زمان تعادل در این آزمایشات، معیاری است که ملویل و چپو (۱۹۹۹) در تحقیقات خود در نظر گرفته‌اند و آن مدت زمانی است که میزان آبشستگی در طی دوره ای ۲۴ ساعته کمتر از پنج درصد باشد [۱۹]. لذا بدین منظور یک آزمایش ۱۲ و ۲۴ ساعته برای مدل مینا صورت پذیرفت و نتایج نشان داد که در طی مدت زمان ۲۴ ساعته تغییرات عمق آبشستگی نسبت به زمان ۱۲ ساعته در مدل مینا در حد 0.5 میلی متر می‌باشد، بدین منظور کلیه آزمایشات در طی مدت زمان ۱۲ ساعته صورت پذیرفت.

۳. معرفی مراحل انجام آزمایشات

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 آبشستگی می‌باشد تضعیف نمود. همچنین بر طبق تحقیقات چپو (۱۹۹۲) زمانی که شکاف در نزدیکی بستر ایجاد شود جریان نزدیک شونده در لایه مرزی پائینی از میان شکاف مانند یک جت افقی تندتر می‌شود. از آنجا که جریان رو به پائین در پایه پل عمود بر جت می‌باشد، جت افقی آنرا به سمت دورتر از بستر منحرف می‌کند و در نتیجه پتانسیل آبروئی آنرا کاهش می‌دهد [۴]. پس از مشخص شدن ابعاد مدل، مشخصات رسوبات و نیز مشخصات کانال آزمایشگاهی، لازم بود که نسبت به انتخاب آرایش پایه‌ها اقدام شود. آرایش پایه‌ها بایستی به گونه‌ای طراحی می‌شد که اثر جانبی دیواره‌های کانال از بین می‌رفت. لذا به منظور مقایسه مکانیزم آبشستگی در گروه پایه‌ها با تک پایه، ابتدا آزمایش‌هایی در تک پایه استوانه‌ای در سرعت مورد نظر و در دو حالت شکاف دار و بدون شکاف صورت گرفت. در گروه پایه‌ها نیز پایه‌های ساده استوانه‌ای توپر به صورت دوتایی در یک امتداد و بترتیب با فواصل قرارگیری 0 ، $0.25D$ ، $0.5D$ و $0.75D$ و $1D$ (قطر پایه بوده که در زوج پایه‌های اول برابر $18/5$ میلی متر و در زوج پایه‌های دوم برابر $20/4$ میلی متر می‌باشد) بین دو پایه استوانه‌ای معادل با مساحت تک پایه‌های شکاف دار که در جهت عمود بر جریان قرار گرفته‌اند، در کانال نصب گردید و در مدل تک پایه شکاف دار نیز شکاف‌هایی به عرض $0.2D$ و $0.3D$ (قطر تک پایه بوده که برابر $33/5$ میلی متر می‌باشد) و در ترازهای مختلف یکی به طول 15 سانتی متر که تا سطح بستر امتداد یافته و دیگری به طول 25 سانتی متر که به میزان 10 سانتی متر در داخل رسوبات گسترش می‌یابد، در پایه ایجاد گردید. لازم به ذکر است که در زوج پایه استوانه‌ای انتخاب قطرهای ذکر شده بر اساس مساحت باقی مانده از شکاف به عرض‌های مختلف در تک پایه استوانه‌ای حاصل شده است بگونه‌ای که قطر $18/5$ میلی متر در زوج پایه بر اساس شکاف ایجاد شده به عرض 0.3 قطر تک پایه و قطر $20/4$ میلی متر نیز بر اساس شکافی به عرض 0.2 قطر تک پایه محاسبه شده است. هدف از انتخاب زوج پایه با قطرهای ذکر شده

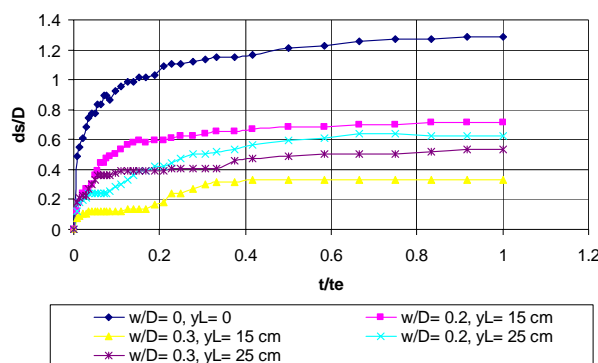


بررسی و مقایسه روند تغییرات عمق آبستگي آنها با تک پایه استوانه ای با طول و عرض های متفاوت و در نهایت انتخاب مدل های مناسب جهت کاهش عمق آبستگي می باشد.

۴. نتایج و بحث

در تحقیق حاضر ۱۵ مدل از شکاف در پایه های استوانه ای مورد آزمایش قرار گرفته اند که مدل های ۱ تا ۵ مربوط به تک پایه استوانه ای، مدل های ۶ تا ۱۰ مربوط به زوج پایه استوانه ای هر یک به قطر ۱۸/۵ میلی متر و مدل های ۱۱ تا ۱۵ نیز مربوط به زوج پایه استوانه ای هر یک به قطر ۲۰/۴ میلی متر می باشند که در ادامه مقاله به معرفی جزئیات این مدل ها می پردازیم. در تمامی مراحل آزمایشات مشاهده گردید که وجود شکاف باعث می شود در شدت جریان ۷/۶ لیتر بر ثانیه حداکثر آبستگي در ساعات اولیه و در طرفین پایه رخ دهد. علت تشکیل گودال ها در طرفین پایه را می توان وجود شکاف و عدم تشکیل گردابه های نعل اسبی به شکل یکپارچه در جلوی پایه و تقسیم آنها به دو بخش کوچکتر در دو طرف پایه دانست. تشکیل گردابه های نعل اسبی در دو طرف پایه، قدرت فرسایش کمتری نسبت به گردابه های یکپارچه تشکیل شده در اطراف پایه بدون شکاف دارند. لذا عمق آبستگي در حالتی که پایه شکاف دار باشد کمتر از حالتی است که پایه بدون شکاف باشد.

شکل ۲ نشان دهنده تغییرات نسبی عمق آبستگي (ds) به قطر پایه (D) در طول های مختلفی از شکاف (y_L) بصورت تابعی از زمان که با تقسیم بر زمان رسیدن به حالت تعادل (t_e) بدون بعد شده، می باشد. مدل ۱ مربوط به تک پایه بدون شکاف، مدل ۲ و ۳ مربوط به تک پایه با شکافی به طول ۱۵ سانتی متر و عرض ۰/۲ D و ۰/۳ D که تا سطح بستر امتداد یافته و مدل ۴ و ۵ مربوط به تک پایه با شکافی به طول ۲۵ سانتی متر و عرض ۰/۲ D و ۰/۳ D که به اندازه ۱۰ سانتی متر در داخل بستر امتداد یافته است، می باشند. با مقایسه نتایج شکل ۲ می توان به این نتیجه رسید که مدل ۳ کمترین میزان آبستگي را نسبت به سایر مدل ها در تک پایه ایجاد می کند و عمق آبستگي را به میزان ۷۴/۴ درصد کاهش می دهد. علت این امر را می توان اینگونه بیان کرد که با ایجاد شکاف از قدرت جریان رو به پائین کاسته می شود و در عین حال با ایجاد شکافی با عرض زیادتر و گسترش آن تا سطح بستر سبب تندتر شدن جریان نزدیک شونده به شکاف می گردد و جریان رو به پائین را که اصلی ترین عامل آبستگي و عمود بر جریان نزدیک شونده می باشد را به سمت دورتر منتقل کرده و عمق آبستگي را به میزان قابل توجهی کاهش می دهد. در مدل ۲ نیز کاهش عرض شکاف سبب کندتر شدن شدت جریان نزدیک شونده می شود و جریان رو به پائین را کمتر به سمت دور تر منتقل کرده و در نتیجه عمق آبستگي افزایش می یابد به گونه ای که مدل ۲ عمق آبستگي را به میزان ۴۴/۲ درصد کاهش می دهد.

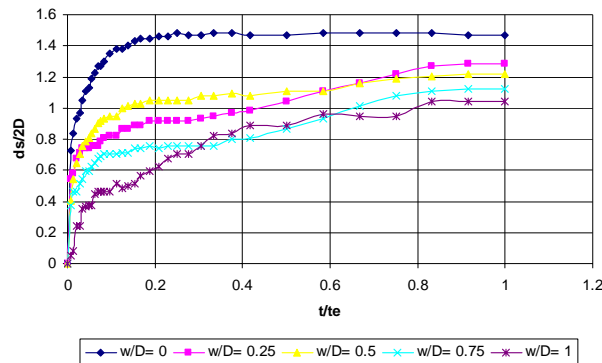


شکل ۲- مقایسه اعماق آبستگي در تک پایه بدون شکاف و شکاف دار با عرض و طول های متفاوت

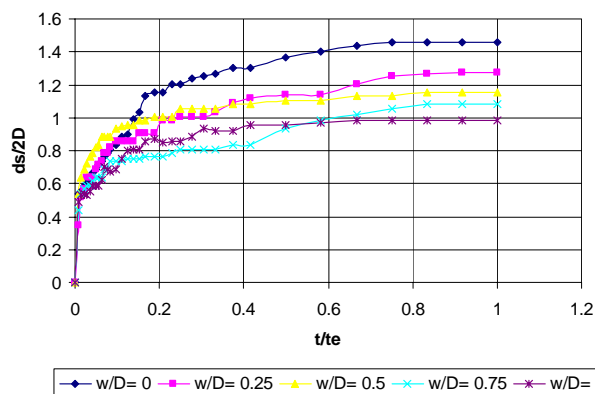
شکل ۳ و ۴ نشان دهنده تغییرات نسبی عمق آبستگي (ds) به قطر دو پایه کنار هم ($2D$) در فواصل مختلف قرارگیری دو پایه از هم (w) بصورت تابعی از زمان که با تقسیم بر زمان رسیدن به حالت تعادل (t_e) بدون بعد شده، می باشد. مدل های ۶، ۷، ۸، ۹ و ۱۰ مربوط به زوج پایه استوانه ای به قطر ۱۸/۵ میلی متر و مدل های ۱۱، ۱۲، ۱۳، ۱۴ و ۱۵ نیز مربوط به زوج پایه استوانه ای به قطر ۲۰/۴ میلی متر و بترتیب با فواصل قرارگیری ۰، ۰/۲۵D، ۰/۵D، ۰/۷۵D و ۱D می باشند. در گروه پایه های دو تایی با قطر یکسان نیز می توان به این نتیجه رسید که با افزایش فاصله بین



دو پایه از میزان آبستگي کاسته می شود بگونه ای که وقتی فاصله بین دو پایه برابر D باشد کمترین کاهش را در عمق آبستگي خواهیم داشت (اشکال ۳ و ۴).

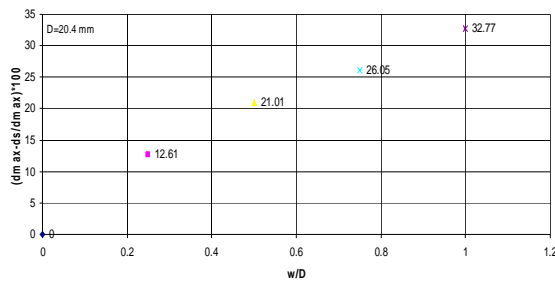


شکل ۳- مقایسه اعماق آبستگي در زوج پایه ساده به قطر ۱۸/۵ میلی متر با فواصل قرارگیری متفاوت

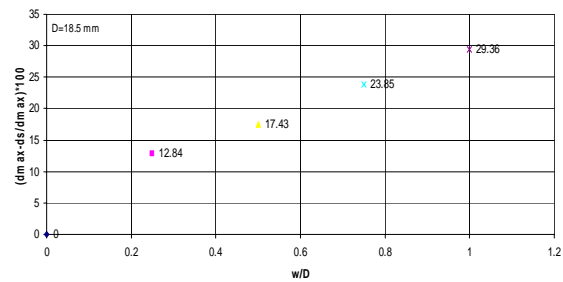


شکل ۴- مقایسه اعماق آبستگي در زوج پایه ساده به قطر ۲۰/۴ میلی متر با فواصل قرارگیری متفاوت

با مقایسه بین اشکال ۳ و ۴ می توان اینگونه بیان کرد که روند تغییرات عمق آبستگي در شکل ۳ حاکی از آن است که مدل ها از زمان $t/te=0/8$ به بعد به حالت تعادلی خود نزدیک می شوند در حالیکه در شکل ۴ مدل ها از زمان $t/te=0/6$ به بعد حالت تعادلی را از خود نشان داده که بیانگر آن است که با کاهش قطر پایه و در شدت جریان ثابت روند تغییرات رسیدن به عمق تعادل آبستگي طولانی تر از زمانی است که قطر دو پایه افزایش یابد. نتایج حاصل از آزمایشات نشان می دهد که در گروه پایه های دوتایی بیشترین عمق آبستگي در حالتی که $w/D=0$ و قطر هر پایه برابر $20/4$ میلی متر می باشد، برابر نسبت $ds/D=3$ بوده و کمترین عمق آبستگي نیز در زوج پایه با نسبت $w/D=1$ و با قطر هر پایه برابر $18/5$ میلی متر رخ داده که این مقدار برابر نسبت $ds/D=2$ می باشد. نتایج فوق نشان می دهد در زوج پایه ها با افزایش قطر پایه و در فواصل قرارگیری یکسان، عمق آبستگي افزایش و با کاهش قطر زوج پایه این عمق نیز کاهش می یابد.



(ب)



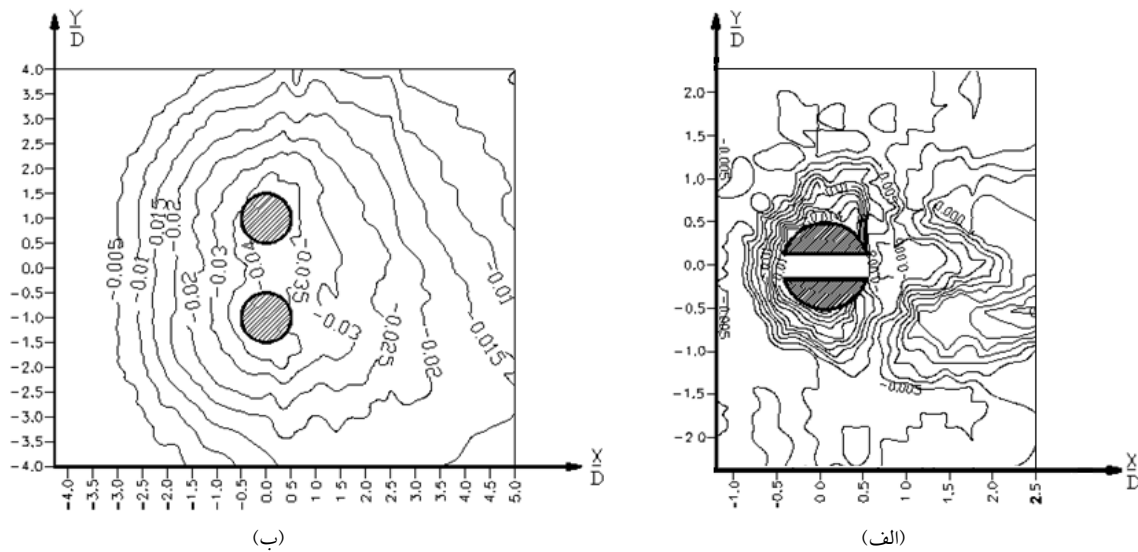
(الف)

شکل ۵- عملکرد ایجاد فاصله در زوج پایه استوانه‌ای: (الف) زوج پایه به قطر ۱۸/۵ میلی متر و (ب) زوج پایه به قطر ۲۰/۴ میلی متر

در شکل ۵ محور قائم نشان دهنده درصد نسبت اختلاف بین حداکثر عمق آبستنگی در مدل مینا و مدل مورد نظر به حداکثر عمق آبستنگی در مدل مینا می‌باشد $(100 \times (d_{max} - ds) / d_{max})$. در تک پایه استوانه‌ای حداکثر عمق آبستنگی در تک پایه بدون شکاف و در زوج پایه ها نیز حداکثر عمق آبستنگی زمانیکه دو پایه بهم چسبیده باشند، رخ می‌دهد. با مقایسه نمودارهای شکل ۵ می‌توان دریافت با افزایش فاصله بین دو پایه بر عمق آبستنگی افزوده خواهد شد به طوری که در مدل ۱۰ عمق آبستنگی به میزان ۲۹/۴ درصد و در مدل ۱۵ این عمق به میزان ۳۲/۸ درصد کاهش می‌یابد. علت این امر را می‌توان اینگونه بیان کرد که با افزایش فاصله بین دو پایه از شدت جریان نزدیک شونده به پایه کاسته شده و نمی‌تواند جریان رو به پائین را به سمت دورتر منحرف کند و لذا پتانسیل آبشویی مصالح کاهش یافته و به تبع آن عمق آبستنگی نیز کاهش می‌یابد. از طرف دیگر در شدت جریان ثابت و در فواصل قرارگیری یکسان بین دو پایه با کاهش قطر پایه‌ها از درصد کاهش قطر آبستنگی کاسته می‌شود. علت این امر ناشی از کاهش سطح تماس جریان با اطراف پایه می‌باشد که سبب کاهش فشردگی خطوط جریان در فاصله بین دو پایه و در نتیجه آشفتنی جریان و پتانسیل آبشویی مصالح در اطراف پایه کاهش یافته و در نتیجه از عمق آبستنگی کاسته می‌شود. در ادامه مقایسه نتایج بین آزمایشات مدل‌های تک پایه با مدل‌های زوج پایه می‌توان به این نتایج رسید که در تک پایه استوانه‌ای بیشترین عمق آبستنگی در تک پایه ساده بدون شکاف رخ داده که این مقدار برابر نسبت $ds/D = 1/3$ بوده و در زوج پایه نیز بعد از سایر مدل‌های تک پایه که سبب ایجاد آبستنگی های کمتری شده، بترتیب مدل‌های ۹، ۱۵ و ۱۰ سبب کاهش عمق آبستنگی با نسبت ۲ و $ds/D = 2/2$ می‌شوند.

۵. مقایسه منحنی‌های تراز حفره آبستنگی موضعی

در شکل ۶ به بررسی منحنی تراز حفره آبستنگی موضعی در تک پایه و زوج پایه استوانه‌ای خواهیم پرداخت. همانطور که از شکل مشاهده می‌شود، می‌توان گفت گسترش حفره آبستنگی به قطر پایه‌ها، عرض شکاف در تک پایه و نیز فاصله قرارگیری زوج پایه نسبت بهم بستگی دارد، بطوری که در تک پایه با افزایش عرض شکاف و در زوج پایه با افزایش فاصله بین دو پایه گسترش حفره آبستنگی نیز کمتر خواهد بود (شکل ۶- الف و ب). همانطور که از شکل مشاهده می‌شود در تک پایه حداکثر عمق آبستنگی در جلوی پایه رخ داده و در زوج پایه نیز دقیقاً همین اتفاق رخ می‌دهد بطوریکه در تک پایه در موقعیت $x/D = 0/5$ عمق آبستنگی برابر $0/08$ متر و در موقعیت $x/D = -0/5$ برابر $0/01$ متر می‌باشد در حالیکه در زوج پایه استوانه‌ای در موقعیت $x/D = 0/5$ عمق آبستنگی برابر $0/04$ و در موقعیت $x/D = -0/5$ برابر $0/035$ متر می‌باشد. در موقعیت عرضی نیز چه در مدل تک پایه و چه در مدل زوج پایه می‌توان تقارن در الگوی بستر در اطراف پایه‌ها را مشاهده نمود. همانطور که از شکل ۶ مشاهده می‌شود با توجه به شعاع آبستنگی در اطراف پایه‌ها می‌توان گفت که حفره آبستنگی در زوج پایه نسبت به تک پایه دارای شعاع بزرگتری می‌باشد. با مقایسه بین دو مدل نشان داده شده در شکل ۶ می‌توان نتیجه گرفت که علاوه بر ایجاد شکافی با طول و عرض مشخص در تک پایه استوانه‌ای، ایجاد زوج پایه استوانه‌ای با قطر و فاصله قرار گیری مشخص نیز می‌تواند در کاهش آبستنگی موضعی موثر باشد.



شکل ۶- منحنی تراز حفرة آبستگى: (الف) در تک پایه استوانه ای با شکافی به طول ۱۵ سانتی متر و $w/D=0/3$ و (ب) زوج پایه استوانه ای با $w/D=1$ و قطر $18/5$ میلی متر

۶. نتیجه گیری

با مقایسه و تحلیل نتایج آزمایشات می توان نتیجه گرفت که در تک پایه استوانه ای به قطر مشخص با افزایش عرض شکاف از قدرت گردابه های نعل اسبی و جریان رو به پائین کاسته شده و در نتیجه عمق آبستگى نیز کاهش می یابد ولی این افزایش در عرض شکاف دارای محدودیت های سازه ای بوده و افزایش بیش از حد عرض شکاف عملاً سازه پل را با مشکل مواجه می نماید. در زوج پایه ها نیز با افزایش فاصله بین دو پایه بر عملکرد شکاف افزوده شده بگونه ای که در فاصله ای برابر قطر پایه عمق آبستگى کاهش می یابد. بنابر این با رعایت این نکات می توان گفت ایجاد شکاف در تک پایه استوانه ای به قطر $33/5$ میلی متر و با عرض $0/3$ قطر پایه که تا سطح بستر گسترش یافته است بیشترین کاهش را در عمق آبستگى ایجاد می نماید و می توان از این مدل به عنوان مدلی مناسب جهت کاهش قابل توجه در عمق آبستگى در اطراف پایه های پل استفاده نمود بگونه ای که پایداری پل ها را بطور قابل توجهی حفظ نماید. در نتیجه گیری نهائی آزمایشات بترتیب می توان گفت در تک پایه مدلهای $w/D=0/3$ که تا سطح بستر امتداد یافته، $w/D=0/3$ که در داخل بستر امتداد یافته، $w/D=0/2$ که تا سطح بستر امتداد یافته، $w/D=0/2$ که در داخل بستر امتداد یافته و در زوج پایه نیز مدلهای $w/D=1$ که برابر $18/5$ میلی متر، $w/D=1$ که D برابر $20/4$ میلی متر و $w/D=0/75$ که D برابر $18/5$ میلی متر است، سبب کاهش عمق آبستگى به میزان کمتری نسبت به مدل تک پایه ساده بدون شکاف می شود که از این مدل ها می توان جهت کنترل و کاهش عمق آبستگى موضعی در اطراف پایه پل ها و نیز در طراحی آنها پیشنهاد نمود.

۷. مراجع

۱. زراتی، الف، (۱۳۷۹)، " نقش عوامل هیدرولیکی در طراحی پلها"، انتشارات دانشگاه هرمزگان، چاپ اول.
۲. کوهی بوشهری، ر. و اشرف زاده، الف، " روشهای تعیین عمق آبستگى در آبراه های طبیعی، پایه پل ها"، پروژه کارشناسی، بخش آبیاری، دانشگاه شیراز.
۳. قربانی، ب، (۱۳۶۷)، " بررسی روشهای محاسباتی موجود جهت تخمین عمق آبستگى در اطراف پایه تاسیسات آبی و انتخاب مناسبترین روش در رودخانه های فارس"، پایان نامه کارشناسی ارشد آبیاری و زهکشی، بخش آبیاری، دانشگاه شیراز.



4. Chiew, Y. M., (1992), "Scour protection at bridge piers.", J. Hyd. Eng., ASCE, 118(11): 1260-1269.
5. Kumar, V., Ranga Raju, K. G. and Vittal, N., (1999), "Reduction of local scour around bridge piers using slots and collars.", J. Hyd. Eng., ASCE, 125(12): 1302-1305.
6. Breusers, N.H.C., Nicollet, G., and Shen, H.W. (1977), "Local scour around cylindrical piers.", IAHR, J. Hyd. Res. 15(3): 211-252.
7. Worman, A., (1989), "Riprap protection without filter layers.", J. Hyd. Eng., ASCE, 115(12): 1615-1630.
8. Chiew, Y. M., (1986), "Mechanism of riprap failure at bridge piers.", J. Hyd. Eng., ASCE, 121(9): 633-643.
9. Sing, K. K., Verma, V.S. and Tiwar, N.I., (1995), "Scour protection at circular bridge pier.", Sixth International symposium on river sedimentation, New delhi, India.
10. Kumar, V., (1996), "Reduction of scour around bridge piers using protection devices.", Ph.D. Thesis, University of Roorkee, Roorkee, Indian.
11. Lauchlan, G.S., and Melville, B.W., (2001), "Riprap protection at bridge piers.", J. Hyd. Eng., ASCE, 127(5): 412-418.
12. Melville, B.W. and Hadfield, A.C., (1999), "Use of sacrificial piles as pier scour countermeasures.", J. Hyd. Eng., ASCE, 125(11): 1221-1224.
13. Bayram, A. and Larson, M., (2000), "Analysis of scour around group of vertical piles in the field.", Journal of Waterway, port, Coastal and Ocean Engineering., Vol. 216, No. 4, pp. 215-220.
14. Raudkivi, A.J. and Sutherland, A.J., (1981), "Scour at bridge piers.", Road Research Unit, Bulltin 54, Wellington, New Zealand.
15. Breusers, N.H.C. and Raudkivi, A.J., (1991), "Scouring.", 2nd Hydraulic Structures Design Manual, IAHR, A.A. Balkema, Rotterdam, The Netherlands.
16. Raudkivi, A.J. and Ettema, R., (1983), "Clear-Water scour at cylindrical piers.", J. Hyd. Eng., ASCE, 109(3):338-350.
17. Raudkivi, A.J., (1998), "Loose boundary hydraulics.", A.A. balkema, Rotterdam, The Netherland.
18. Vittal, N., Kothiyari, U.C. and Haghghat, M., (1994), "Clear-Water scour around bridge pier group.", J. Hyd. Eng., ASCE, 120(11): 1309-1318.
19. Melville, B.W. and Chiew, Y.M., (1999), "Time scale for local scour at bridge piers.", J. Hyd. Eng., ASCE, 125(1): 59-65.