

بررسی تغییرات زمانی آبستگی در اطراف پایه های پل مستطیلی غیر یکنواخت

رضا محمد پور*^۱، عاطفه تقی شاهبازی^۲، تورج سبزواری^۳، مهدی کریمی مقدم^۴

چکیده:

همه ساله پل های زیادی در سراسر جهان به علت پدیده آبستگی تخریب می شود. عموماً پایه پل ها به علت ملاحظات اقتصادی و ژئوتکنیک بر روی فونداسیون اجرا می گردد در حالیکه اکثر مطالعات انجام شده پیرامون آبستگی مربوط به پایه ها یکنواخت بوده و مطالعات بسیار محدودی در زمینه آبستگی در اطراف پایه های غیر یکنواخت (پایه به همراه فونداسیون) در دست می باشد. در این تحقیق، مقایسه آبستگی در اطراف پایه های یکنواخت و غیر یکنواخت مستطیلی تحت شرایط آب زلال در آزمایشگاه مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج بدست آمده نشان می دهد که عمق آبستگی در اطراف پایه های غیر یکنواخت به عرض پایه (L)، عرض فونداسیون (Lf) و همچنین تراز قرارگیری فونداسیون (Z) بستگی دارد. در پایه های غیر یکنواخت آبستگی تا تراز فونداسیون گسترش یافته و سپس فونداسیون به عنوان مانعی از پیشرفت آبستگی برای مدت زمان مشخصی (زمان تأخیر) جلوگیری می کند. با افزایش تراز قرارگیری فونداسیون زیر بستر (Z/L)، میزان آبستگی کاهش یافته تا به مقدار حداقل خود در تراز بین L تا L^۲ برسد. نتایج نشان می دهد که مدت زمان تأخیر به تراز فونداسیون، و همچنین ابعاد آن بستگی دارد. این تحقیق نشان می دهد که حضور فونداسیون در تراز مناسب موجب افزایش مدت زمان نهایی آبستگی می گردد و این افزایش زمان، موجب فراهم شدن زمان کافی برای تعمیرات فونداسیون پس از بروز سیل خواهد شد.

واژگان کلیدی: آبستگی موضعی، مکانیسم آبستگی، پایه های غیر یکنواخت مستطیلی، ابعاد فونداسیون، تراز فونداسیون

۱. مقدمه:

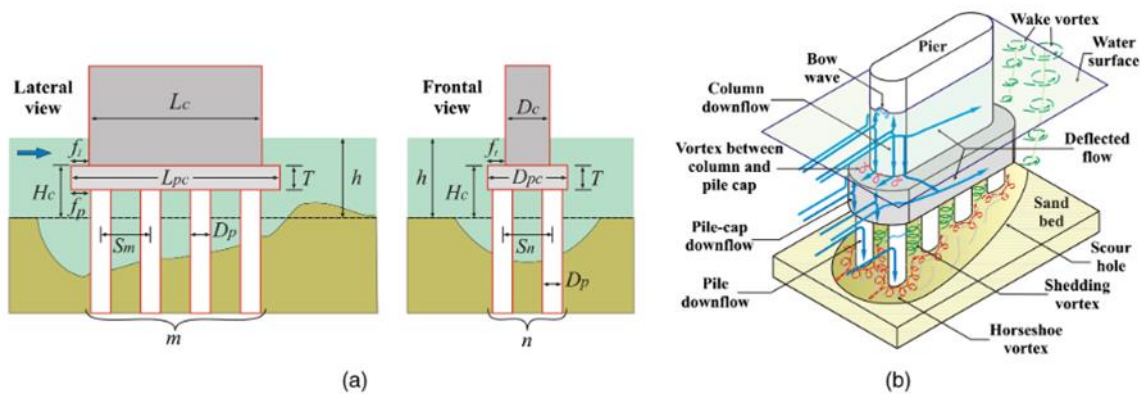
^۱ عضو هیات علمی گروه آب واحد استهبان، دانشگاه آزاد اسلامی واحد استهبان، ایران
^۲ فارغ التحصیل کارشناسی ارشد مهندسی عمران- آب، دانشگاه آزاد اسلامی واحد استهبان
*نویسنده مسؤل مقاله: reza64@gmail.com

^۳ عضو هیات علمی گروه آب واحد استهبان، دانشگاه آزاد اسلامی واحد استهبان، ایران
^۴ فارغ التحصیل کارشناسی ارشد مهندسی عمران- آب، دانشگاه آزاد اسلامی واحد استهبان

آبشستگی نتیجه فعالیت فرسایشی جریان آب می باشد که رسوبات را از بستر و بالا دست پایه های پل جدا کرده و به پایین دست انتقال می دهد. وجود پایه های پل در مسیر جریان باعث ایجاد تغییر الگوی جریان و همچنین باعث جدا شدن خطوط جریان خواهد شد. آبشستگی موضعی ناشی از برخورد آب به پایه های پل ، تشکیل گردابه های نعل اسبی و در نتیجه جدا شدن مصالح و حمل آن به پایین دست می باشد. در اثر برخورد آب به پایه پل ، جریان رو به پایین تشکیل شده که پس از برخورد به بستر گردابه های نعل اسبی ایجاد می گردد. گردابه های نعل اسبی بیشتر در جلو پایه فعالیت دارد. جدایی جریان از پایه پل و افزایش تنش برشی در پشت پایه عامل تشکیل گردابه برخاستگی می باشد.

اکثر مطالعات انجام شده پیرامون آبشستگی مربوط به پایه ها یکنواخت بوده و مطالعات بسیار محدودی در زمینه آبشستگی در اطراف پایه های غیر یکنواخت (پایه به همراه فونداسیون) در دست می باشد. این در حالی است که به علت مسائل ژئوتکنیکی و اقتصادی اغلب پایه ها بر روی فونداسیون ساخته می شود. بنابراین پیش بینی دقیق آبشستگی در اطراف پایه ها منجر به طراحی اقتصادی پایه های می گردد. در صورتی که عمق آبشستگی زیاد تخمین زده شود، موجب قرار گیری فونداسیون در عمق پایین شده که در نهایت طرح غیر اقتصادی خواهد شد. از طرفی تخمین عمق کم برای آبشستگی نیز موجب قرار گیری فونداسیون در نزدیکی سطح بستر شده و این مسئله می تواند گردابه های نعل اسبی دیگری به علت حضور فونداسیون ایجاد کرده و تخریب پایه را تسریع نماید.

عموما پایه های غیر یکنواخت به دو صورت تعریف می شوند. نوع اول پایه (pier) فقط به همراه فونداسیون می باشد و در نوع دوم پایه به همراه فونداسیون یا سر شمع (pile cap) و شمع های زیر آن (piles) تعریف می شوند (شکل ۱).



شکل ۱: (a) هندسه پایه ی مرکب - (b) ساختار جریان در اطراف پایه ی مرکب (مورنو و همکاران ، ۲۰۱۶)

در این نوع پایه ها جریان و اندرکنش آن با بستر بسیار پیچیده تر از پایه های یکنواخت می باشد. تاکنون تحقیقات وسیعی در مورد آبشستگی در اطراف پایه های و تکیه گاه های یکنواخت انجام شده است (جونر و همکاران ۱۹۹۲،

ملویل، ۱۹۹۲، محمدپور و همکاران ۲۰۱۱، لنسی و همکاران ۲۰۱۳، محمدپور و همکاران ۲۰۱۳؛) با توجه به اینکه آبستنگی تابعی از زمان می باشد، بنابراین بخشی از تحقیقات انجام شده پیرامون بررسی تغییرات عمق آبستنگی نسبت به زمان می باشد (یانماز و همکاران ۱۹۹۱، لو و همکاران ۲۰۱۱، محمدپور و همکاران ۲۰۱۵ و ۲۰۱۵). این در حالی است که مطالعات انجام شده در اطراف پایه های و تکیه گاه های غیر یکنواخت به همراه تاثیر فونداسیون بسیار محدودتر می باشد (محمدپور و همکاران ۲۰۱۴؛ غنی و همکاران ۲۰۱۵).

اولین تحقیقات صورت گرفته در مورد پایه های غیر یکنواخت، توسط چابرت و انگلینگر (۱۹۵۶) می باشد. آنها طی بیست آزمایش، بر روی پایه غیر یکنواخت با پی های استوانه ای به این نتیجه رسیدند که کاهش آبستنگی هنگامی صورت می گیرد که پی در زیر تراز بستر قرار گیرد و در صورتیکه پی در تراز بالای بستر واقع شود موجب افزایش آبستنگی خواهد شد. عطایی آشتیانی و همکاران (۲۰۱۰) جریان در اطراف پایه به همراه فونداسیون و شمع های زیر آن را بررسی کردند. در مطالعات آنها فونداسیون و شمعها در بالای بستر رسوبی قرار گرفته بود به گونه ای که این اعضاء در معرض جریان قرار داشتند. آنها به این نتیجه رسیدند که جریان در بالادست سر شمع (pile cap) به دو دسته که در جهت قائم و در خلاف جهت یکدیگر حرکت می کنند تقسیم بندی می شود. دسته اول جریانهایی که به سمت بالا و به طرف پایه حرکت می کنند و دسته دوم جریانهایی که به سمت پایین و به سمت شمعها حرکت خواهند کرد (شکل ۱). محققان نیز به بررسی ساختار جریان در اطراف پایه های مرکب هنگامی که سر شمع بالاتر از بستر می باشد پرداخته اند (گارف و ایستارتو ۲۰۰۲؛ عطایی آشتیانی و اصلانی ۲۰۱۳). بر اساس این مطالعات آبستنگی در اطراف گروه شمع های ناشی از دو مکانیزم می باشد که عبارتند از ۱) آبستنگی ناشی از عملکرد شمع به تنهایی که منجر به تولید جریانهای پایین رونده، گردابه های نعل اسبی و گردابه های برخاستگی می گردد ۲) آبستنگی ناشی از تاثیر شمع ها بر یکدیگر که می توان به فرایندهایی مانند تشدید آبستنگی؛ اثر متقابل گردابه های برخاستگی و فشردگی گردابه های نعل اسبی اشاره نمود. در شکل ۱ الگوی جریان در اطراف پایه های مرکب و تاثیر شمع ها بر یکدیگر نشان داده شده است (مورنو و همکاران، ۲۰۱۶). ملویل و رادکیوی (۱۹۹۶) مطالعات آزمایشگاهی خود را بر روی پایه و پی استوانه ایی شکل انجام دادند. مطالعات آنها منجر به ارائه یک رابطه برای پایه های غیر یکنواخت گردید. محمدپور و همکاران (۲۰۱۵) آبستنگی در اطراف تکیه گاه های غیر یکنواخت را به صورت ریاضی مورد بررسی قرار دادند. آنها رابطه ای را جهت محاسبه تغییرات زمانی عمق آبستنگی در اطراف تکیه گاههای غیر یکنواخت ارائه کرده اند.

آبستنگی محلی می تواند منجر به تخریب های جزئی در اطراف پایه و یا تخریب کامل پایه و پل گردد. برآورد دقیق عمق نهایی آبستنگی در اطراف پایه های مرکب منجر به طراحی دقیق و اقتصادی فونداسیون این نوع سازه ها می گردد. اما این مسئله واضح است که بر خلاف تحقیقات انجام شده در دهه های قبل متاسفانه روابطی که برای تخمین حداکثر عمق آبستنگی (d_{se}) ارائه شده است نمی توانند مقدار دقیق آبستنگی را پیش بینی کنند (فرارو و همکاران ۲۰۱۳) دلیل این امر تاثیر پارامترهای مختلف بر آبستنگی می باشد. بطور کلی تاکنون سه

رابطه اساسی برای تخمین عمق آبستگي در اطراف پایه های مرکب پیشنهاد شده است که عبارتند از: رابطه ارائه شده توسط دانشگاه آکلند (کالمن ۲۰۰۵)، روش پیشنهاد شده توسط بخش حمل و نقل فلوریدا (FDOT) که توسط آقایان شپارد و رینا (۲۰۱۰) ارائه شده است و روش HEC-۱۸ که توسط ریچاردسون و داویس (۲۰۰۱) ارائه شده و توسط آرنسون و همکاران (۲۰۱۲) مورد ارزیابی قرار گرفت. در روش ارائه شده در HEC-۱۸، عمق نهایی آبستگي یک پایه مرکب را می توان توسط اصل سوپرپوزیشن ناشی از آبستگي در اطراف هر جزء پایه ی مرکب (پایه، سرپوش، گروه شمع) دانست و با جمع عمق های آبستگي هر جزء، می توان آبستگي کل را بدست می آورد. مطابق نظر اتما (۲۰۱۱) آبستگي در اطراف پایه های مرکب بسیار پیچیده بوده و می بایست با استفاده از هر دو مدل عددی و آزمایشگاهی مورد ارزیابی قرار گیرد.

مروری بر تحقیقات پیشین پیرامون پایه های غیر یکنواخت نشان می دهد که این نوع پایه ها نیاز به مطالعه و بررسی بیشتری دارد. در این تحقیق هدف بررسی آبستگي در اطراف نوع اول پایه های غیر یکنواخت یعنی پایه به همراه فونداسیون (بدون شمع) می باشد. آزمایشهای انجام شده در شرایط آب زلال بوده و در تمامی آزمایشها فونداسیون در زیر تراز اولیه رسوبات در نظر گرفته شده است. در این تحقیق تاثیر تراز قرارگیری فونداسیون، ابعاد فونداسیون و همچنین ابعاد پایه بر روی آبستگي بطور مجزا مورد بررسی و بحث قرار گرفته است.

۲. مواد و روشها:

در این تحقیق آزمایشها در یک کانال به طول ۱۲ متر، عرض ۴۰ سانتی متر و ارتفاع ۶۰ سانتی متر انجام شده است (شکل ۲). جنس جداره و کف کانال از پلاکسی گلاس شفاف بوده و در کلیه آزمایش ها از رسوبات یکنواخت با قطر متوسط $d_s = 0.7$ میلیمتر و انحراف معیار هندسی $\sigma_D = 1.23$ استفاده شده است. کلیه آزمایشها در شرایط آب زلال انجام شد و برای حصول ماکزیمم عمق آبستگي سرعت جریان نزدیک به سرعت بحرانی تنظیم شد به گونه ای که U/U_c بین ۰.۹۴ تا ۰.۹۹ قرار گرفت. ارتفاع آب برابر با ۲۱ سانتی متر در نظر گرفته شده و توپوگرافی حفره آبستگي بعد از هر آزمایش با استفاده از عمق سنج به میزان دقت ± 1 میلیمتر اندازه گیری شد.



شکل ۲- نمایی از کانال آزمایشگاهی

در این تحقیق، پایه های غیر یکنواخت مستطیل شکل، با ابعاد نشان داده شده در جدول ۱ مورد استفاده قرار گرفته است. در این جدول پایه یکنواخت با پارامتر P و پایه های غیر یکنواخت با FP نشان داده شده است. عرض پایه

های انتخابی (L) برابر با ۶,۰, ۵,۶, ۴,۶ سانتیمتر بوده است. ابعاد انتخابی فونداسیون متغیر بوده که در جدول ۱ مشخص شده است. در تمامی آزمایشها فونداسیون زیر تراز بستر بوده و تراز قرارگیری فونداسیون (Z) نسبت به سطح اولیه رسوبات اندازه گیری شده است که این مقادیر عبارتند از مقدار ۰,۰, ۱,۰؛ ۲,۰ و ۳,۰ سانتیمتر. جهت ثابت ماندن بستر رسوبات، ابتدا کانال با استفاده از شلنگ به آرامی از آب پر شده است و هنگامی که آب به تراز مورد نظر رسید پمپ ها روشن و آزمایش آغاز شده است.

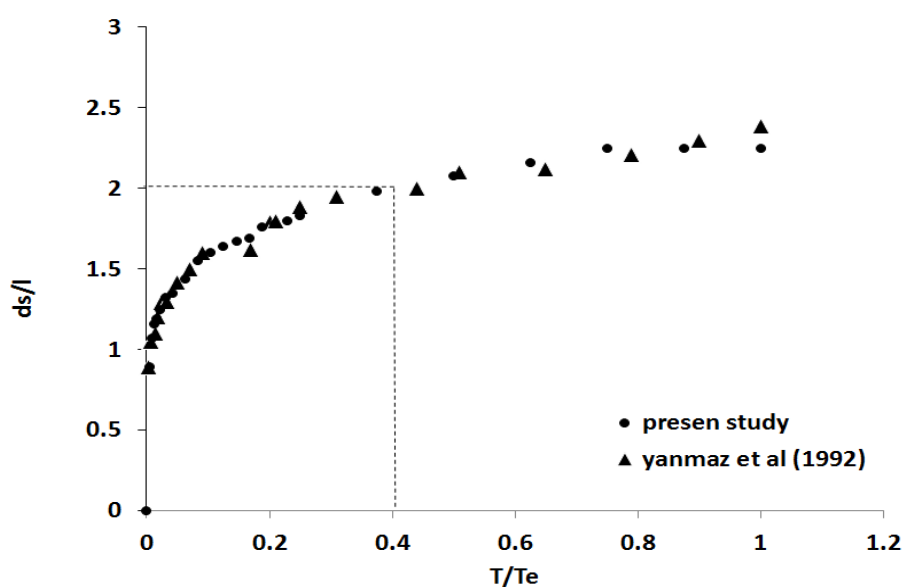
جدول ۱- پایه‌های مورد استفاده در تحقیق حاضر

Case	پایه	آزمایش	ارتفاع		عرض		طول		B/Bf	
			فونداسیون	Z (cm)	پایه	L(cm)	پایه	B(cm)		فونداسیون
۱	یکنواخت	P-۱	-	-	۴,۶	۸,۶	-	-	-	-
۲	یکنواخت	P-۲	-	-	۵,۶	۱۰,۶	-	-	-	-
۳	یکنواخت	P-۳	-	-	۶	۱۲	-	-	-	-
۴	غیر یکنواخت	FP۲۱	۰	۰	۵,۶	۱۰,۶	۱۲,۶	۲۴,۶	۰,۴۳	۰,۴۴
۵	غیر یکنواخت	FP۲۲	۱	۱	۵,۶	۱۰,۶	۱۲,۶	۲۴,۶	۰,۴۳	۰,۴۴
۶	غیر یکنواخت	FP۲۳	۲	۲	۵,۶	۱۰,۶	۱۲,۶	۲۴,۶	۰,۴۳	۰,۴۴
۷	غیر یکنواخت	FP۲۴	۳	۳	۵,۶	۱۰,۶	۱۲,۶	۲۴,۶	۰,۴۳	۰,۴۴
۸	غیر یکنواخت	FP۳۱	۰	۰	۶	۱۲	۱۲,۶	۲۴,۶	۰,۴۹	۰,۴۸
۹	غیر یکنواخت	FP۳۲	۱	۱	۶	۱۲	۱۲,۶	۲۴,۶	۰,۴۹	۰,۴۸
۱۰	غیر یکنواخت	FP۳۳	۲	۲	۶	۱۲	۱۲,۶	۲۴,۶	۰,۴۹	۰,۴۸
۱۱	غیر یکنواخت	FP۳۴	۳	۳	۶	۱۲	۱۲,۶	۲۴,۶	۰,۴۹	۰,۴۸
۱۲	غیر یکنواخت	FP۴۱	۰	۰	۴,۶	۸,۶	۹,۶	۱۸,۶	۰,۴۶	۰,۴۸
۱۳	غیر یکنواخت	FP۴۲	۱	۱	۴,۶	۸,۶	۹,۶	۱۸,۶	۰,۴۶	۰,۴۸
۱۴	غیر یکنواخت	FP۴۳	۲	۲	۴,۶	۸,۶	۹,۶	۱۸,۶	۰,۴۶	۰,۴۸
۱۵	غیر یکنواخت	FP۴۴	۳	۳	۴,۶	۸,۶	۹,۶	۱۸,۶	۰,۴۶	۰,۴۸
۱۶	غیر یکنواخت	FP۵۱	۰	۰	۵,۶	۱۰,۶	۹,۶	۱۸,۶	۰,۵۷	۰,۵۸
۱۷	غیر یکنواخت	FP۵۲	۱	۱	۵,۶	۱۰,۶	۹,۶	۱۸,۶	۰,۵۷	۰,۵۸
۱۸	غیر یکنواخت	FP۵۳	۲	۲	۵,۶	۱۰,۶	۹,۶	۱۸,۶	۰,۵۷	۰,۵۸
۱۹	غیر یکنواخت	FP۵۴	۳	۳	۵,۶	۱۰,۶	۹,۶	۱۸,۶	۰,۵۷	۰,۵۸
۲۰	غیر یکنواخت	FP۶۱	۰	۰	۶	۱۲	۹,۶	۱۸,۶	۰,۶۵	۰,۶۳
۲۱	غیر یکنواخت	FP۶۲	۱	۱	۶	۱۲	۹,۶	۱۸,۶	۰,۶۵	۰,۶۳
۲۲	غیر یکنواخت	FP۶۳	۲	۲	۶	۱۲	۹,۶	۱۸,۶	۰,۶۵	۰,۶۳
۲۳	غیر یکنواخت	FP۶۴	۳	۳	۶	۱۲	۹,۶	۱۸,۶	۰,۶۵	۰,۶۳

۰,۳۵	۰,۳۷	۲۴,۶	۱۲,۶	۸,۶	۴,۶	۰	FP۷۱	غیر یکنواخت	۲۴
۰,۳۵	۰,۳۷	۲۴,۶	۱۲,۶	۸,۶	۴,۶	۱	FP۷۲	غیر یکنواخت	۲۵
۰,۳۵	۰,۳۷	۲۴,۶	۱۲,۶	۸,۶	۴,۶	۲	FP۷۳	غیر یکنواخت	۲۶
۰,۳۵	۰,۳۷	۲۴,۶	۱۲,۶	۸,۶	۴,۶	۳	FP۷۴	غیر یکنواخت	۲۷

۳-آبستگی در اطراف پایه های یکنواخت

در این آزمایش ها، آبستگی از جلوی پایه پل شروع شده و به طرفین کشیده می شود، پس از مدت کوتاهی آبستگی به پشت پایه پل می رسد. در ابتدای آزمایش ، سرعت آبستگی بیشتر بوده ولی به تدریج و با گذشت زمان کمتر می شود. در شکل ۳ نتایج این تحقیق برای پایه های یکنواخت به طول ۵,۶ سانتیمتر با نتایج حاصل از تحقیقات یانماز (۱۹۹۱) مقایسه شده است. تحقیقات یانماز برای پایه های یکنواخت مستطیلی به قطر ۵,۷ سانتیمتر اندازه رسوب برابر با ۰,۸۴ میلیمتر و دبی ۳۰ lit/s انجام شده است. همان گونه که مشاهده می شود نتایج این تحقیق به نتایج تانماز نزدیک بوده که نشان دهنده معتبر بودن آزمایشها می باشد. محمداپور و همکاران (۲۰۱۳) نشان دادند که تغییرات عمق آبستگی در لحظات اولیه بیشتر بوده و مقدار ۸۰ الی ۹۰ درصد آبستگی در زمانهای ۲۰ الی ۴۰ درصد آبستگی نهایی رخ می دهد. همانگونه که در این شکل نشان داده شده است پس از گذشت مدت زمان ۴۰٪ از کل آزمایش ($T/Te=0,4$) عمق آبستگی نسبی برابر با $ds/L=2,0$ می باشد. با توجه به اینکه مقدار آبستگی نهایی در اطراف این پایه برابر با $ds/L=2,25$ می باشد بنابراین حدود ۸۹٪ آبستگی نهایی در این مدت رخ داده است.



شکل ۳- مقایسه عمق آبستگي در پايه يکنواخت در ابعاد و شرايط مختلف

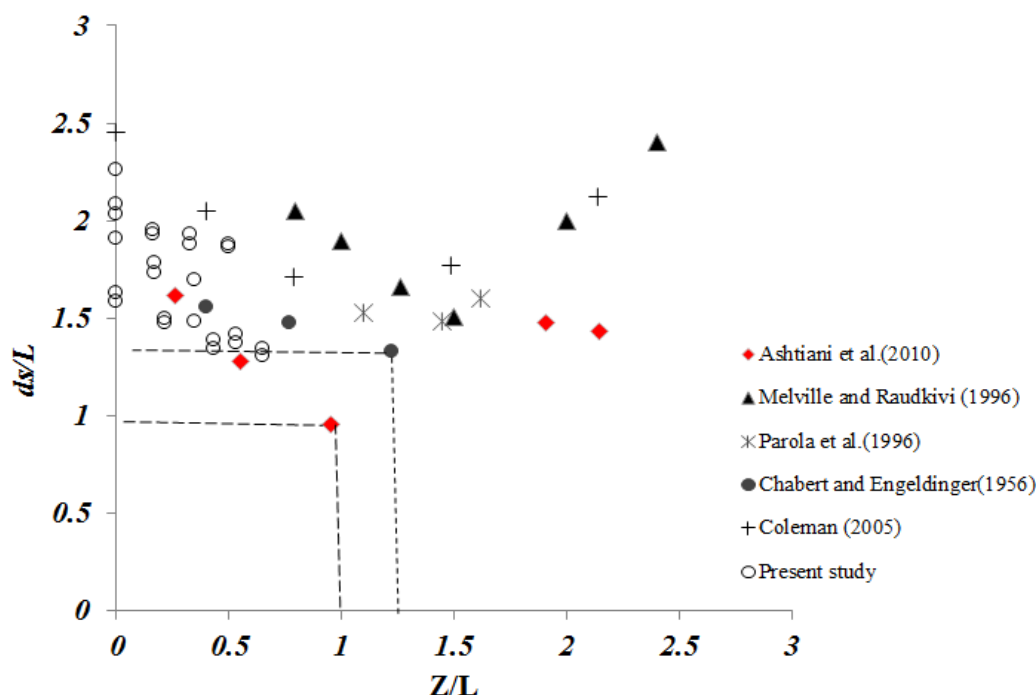
۴- آبستگي در اطراف پايه هاي غير يکنواخت

نتايج آزمايشگاهي آبستگي در اطراف اطراف پايه هاي يکنواخت و غير يکنواخت در جدول ۲ نشان داده شده است. با توجه به اينکه يکي از اهداف اين تحقيق بررسي تراز قرارگيري عمق فونداسيون برروي آبستگي مي باشد لذا در دو ستون آخر اين جدول مقادير تراز قرار گيري فونداسيون (Z) و عمق آبستگي (ds) با استفاده از بعد پايه (L) بي بعد شده و نتايج در شکل ۴ منعکس شده است. در اين شکل محور افقي نسبت تراز قرارگيري فونداسيون (Z/L) و محور عمودي نسبت عمق آبستگي (ds/L) مي باشد. نتايج حاصل از اين تحقيق و با نتايج محققين پيشين از جمله آشتياني (۲۰۱۰)، کالمن (۲۰۰۵)، ملويل و رادکيوبي (۱۹۹۶)، پارولا (۱۹۹۶)، چاپرت وانگلدینگر (۱۹۵۶) مقايسه شده است. در کليه آزمايشها تراز قرار گيري فونداسيون نسبت به سطح اوليه رسوب بستر اندازه گيري شده و در تمامی حالات فونداسيون در زير بستر قرار دارد.

جدول ۲- نتايج آبستگي در اطراف پايه هاي غير يکنواخت و پايه يکنواخت

case	expre	Z(cm)	L(cm)	B(cm)	Lf(cm)	Bf(cm)	L/Lf	B/Bf	Y(cm)	Z/L	ds/L
۱	P-۱	-	۴,۶	۸,۶	-	-	-	-	۲۱	-	۲,۵۴
۲	P-۲	-	۵,۶	۱۰,۶	-	-	-	-	۲۱	-	۲,۲۵
۳	P-۳	-	۶	۱۲	-	-	-	-	۲۱	-	۲,۳۵
۴	FP۲۱	۰	۵,۶	۱۰,۶	۱۲,۶	۲۴,۶	۰,۴۴	۰,۴۳	۲۱	۰	۲,۰۳۵
۵	FP۲۲	۱	۵,۶	۱۰,۶	۱۲,۶	۲۴,۶	۰,۴۴	۰,۴۳	۲۱	۰,۱۷	۱,۷۸
۶	FP۲۳	۲	۵,۶	۱۰,۶	۱۲,۶	۲۴,۶	۰,۴۴	۰,۴۳	۲۱	۰,۳۵	۱,۶۹
۷	FP۲۴	۳	۵,۶	۱۰,۶	۱۲,۶	۲۴,۶	۰,۴۴	۰,۴۳	۲۱	۰,۵۳	۱,۴۱۶
۸	FP۳۱	۰	۶	۱۲	۱۲,۶	۲۴,۶	۰,۴۸	۰,۴۹	۲۱	۰	۲,۲۶
۹	FP۳۲	۱	۶	۱۲	۱۲,۶	۲۴,۶	۰,۴۸	۰,۴۹	۲۱	۰,۱۶	۱,۹۵
۱۰	FP۳۳	۲	۶	۱۲	۱۲,۶	۲۴,۶	۰,۴۸	۰,۴۹	۲۱	۰,۳۳	۱,۹۲
۱۱	FP۳۴	۳	۶	۱۲	۱۲,۶	۲۴,۶	۰,۴۸	۰,۴۹	۲۱	۰,۵	۱,۸۸
۱۲	FP۴۱	۰	۴,۶	۸,۶	۹,۶	۱۸,۶	۰,۴۸	۰,۴۶	۲۱	۰	۱,۵۸
۱۳	FP۴۲	۱	۴,۶	۸,۶	۹,۶	۱۸,۶	۰,۴۸	۰,۴۶	۲۱	۰,۲۱	۱,۵
۱۴	FP۴۳	۲	۴,۶	۸,۶	۹,۶	۱۸,۶	۰,۴۸	۰,۴۶	۲۱	۰,۴۳	۱,۳۴
۱۵	FP۴۴	۳	۴,۶	۸,۶	۹,۶	۱۸,۶	۰,۴۸	۰,۴۶	۲۱	۰,۶۵	۱,۳
۱۶	FP۵۱	۰	۵,۶	۱۰,۶	۹,۶	۱۸,۶	۰,۵۸	۰,۵۷	۲۱	۰	۱,۹۱
۱۷	FP۵۲	۱	۵,۶	۱۰,۶	۹,۶	۱۸,۶	۰,۵۸	۰,۵۷	۲۱	۰,۱۷	۱,۷۳
۱۸	FP۵۳	۲	۵,۶	۱۰,۶	۹,۶	۱۸,۶	۰,۵۸	۰,۵۷	۲۱	۰,۳۵	۱,۴۸
۱۹	FP۵۴	۳	۵,۶	۱۰,۶	۹,۶	۱۸,۶	۰,۵۸	۰,۵۷	۲۱	۰,۵۳	۱,۳۷۵
۲۰	FP۶۱	۰	۶	۱۲	۹,۶	۱۸,۶	۰,۶۳	۰,۶۵	۲۱	۰	۲,۰۸۳

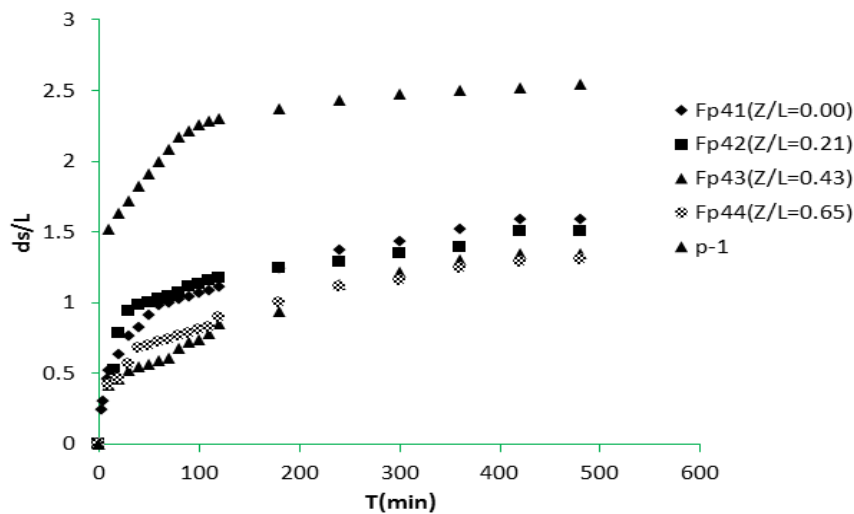
۲۱	FP۶۲	۱	۶	۱۲	۹,۶	۱۸,۶	۰,۶۳	۰,۶۵	۲۱	۰,۱۶	۱,۹۳
۲۲	FP۶۳	۲	۶	۱۲	۹,۶	۱۸,۶	۰,۶۳	۰,۶۵	۲۱	۰,۳۳	۱,۸۸
۲۳	FP۶۴	۳	۶	۱۲	۹,۶	۱۸,۶	۰,۶۳	۰,۶۵	۲۱	۰,۵	۱,۸۶
۲۴	FP۷۱	۰	۴,۶	۸,۶	۱۲,۶	۲۴,۶	۰,۳۷	۰,۳۵	۲۱	۰	۱,۶۳
۲۵	FP۷۲	۱	۴,۶	۸,۶	۱۲,۶	۲۴,۶	۰,۳۷	۰,۳۵	۲۱	۰,۲۱	۱,۴۷
۲۶	FP۷۳	۲	۴,۶	۸,۶	۱۲,۶	۲۴,۶	۰,۳۷	۰,۳۵	۲۱	۰,۴۳	۱,۳۹
۲۷	FP۷۴	۳	۴,۶	۸,۶	۱۲,۶	۲۴,۶	۰,۳۷	۰,۳۵	۲۱	۰,۶۵	۱,۳۴



شکل ۴ - تغییرات حداکثر عمق آبشستگی بر حسب تراز فونداسیون (Z/L)

همانگونه که در شکل ۴ نشان داده شده است روند تغییرات حداکثر عمق آبشستگی در مجموعه داده های ارائه شده شبیه به یکدیگر هستند. به این ترتیب که به افزایش تراز فونداسیون (افزایش Z/L) میزان آبشستگی (ds/L) کاهش یافته تا به مقدار حداقل خود در محدوده بین ۱ و ۲ رسیده و پس از آن با افزایش تراز فونداسیون میزان آبشستگی افزایش یافته است. دلیل این مسئله را می توان به این صورت توضیح داد که با قرار گیری فونداسیون در تراز های بین ۱ و ۲، حضور فونداسیون موجب کاهش قدرت گردابه های نعل اسبی در جلو پایه می شود و آبشستگی کاهش می یابد. با افزایش تراز فونداسیون ($Z/L > ۱,۲$) عمق آبشستگی تا روی تراز فونداسیون پایین خواهد آمد و پس از آن در همین تراز باقی می ماند. طبیعتاً با افزایش بیشتر تراز فونداسیون و هنگامی که فونداسیون در زیر تراز آبشستگی حداکثر قرار گیرد، مقدار آبشستگی در اطراف پایه های غیر یکنواخت شبیه به پایه های یکنواخت خواهد بود.

جهت بررسی تاثیر قرار گیری تراز فونداسیون، در شکل ۵ مقایسه ای بین آبهستگی در اطراف پایه یکنواخت P-۱ با بعد $L=۴,۶$ cm و پایه های غیر یکنواخت $FP۴۱, FP۴۲, FP۴۳$ و $FP۴۴$ انجام شده است. همانگونه که در جدول ۱ نشان داده شده است، ابعاد پایه و فونداسیون برای تمامی پایه های غیر یکنواخت ثابت و به ترتیب برابر با $L=۴,۶$ cm و $L_f=۹,۶$ cm می باشد. تراز قرارگیری فونداسیون برای $FP۴۱, FP۴۲, FP۴۳$ و $FP۴۴$ متغیر و به ترتیب برابر با $۰,۰$, $۱,۰$, $۲,۰$ و $۳,۰$ سانتیمتر می باشد. همانگونه که در این شکل نشان داده شده است تغییرات عمق آبهستگی در پایه های غیر یکنواخت نیز همانند پایه های یکنواخت بصورت لگاریتمی می باشد. در پایه های غیر یکنواخت، عمق آبهستگی با زمان افزایش می یابد و با رسیدن به تراز فونداسیون ، عمق آبهستگی برای مدت زمان خاصی تقریباً ثابت باقی می ماند که این زمان ممکن است تا چندین ساعت نیز به طول انجامد (بسته به تراز قرارگیری فونداسیون). دلیل این مسئله این است که ، گردابه های نعل اسبی تشکیل شده در جلو پایه پس از برخورد به فونداسیون قدرت خود را از دست می دهند بنابراین این گردابه ها توانایی فرسایش و حمل رسوبها را از دست می دهند و رسوبات جلو فونداسیون بطور نامحسوسی و بسیار کم جابجا می شوند. با گذشت زمان ، مقداری از رسوبات جلو فونداسیون به پایین دست حمل می شود و از این مرحله به بعد فونداسیون نیز در معرض جریان قرار گرفته که خود باعث تولید یکسری گردابه های نعل اسبی دیگر می شوند. این گردابه های نعل اسبی جدید باعث فرسایش رسوبات در جلو فونداسیون و افزایش عمق آبهستگی می شوند. همانگونه که در شکل ۵ نشان داده شده است عمق آبهستگی برای پایه غیر یکنواخت $Fp۴۴$ با $Z=۳$ cm ($Z/L=۰,۶۵$)، به سرعت به تراز فونداسیون می رسد و سپس برای حدود ۴۰ دقیقه در همان تراز باقی می ماند و سپس به علت تشکیل گردابه های نعل اسبی دیگری در جلو پایه ، شروع به افزایش می کند. این در حالی است که برای پایه یکنواخت P-۱ با ابعاد مشابه، عمق آبهستگی بدون هیچ توقفی افزایش می یابد و عمق آبهستگی پس از ۴۰ دقیقه چندین برابر پایه غیر یکنواخت $Fp۴۴$ می باشد.



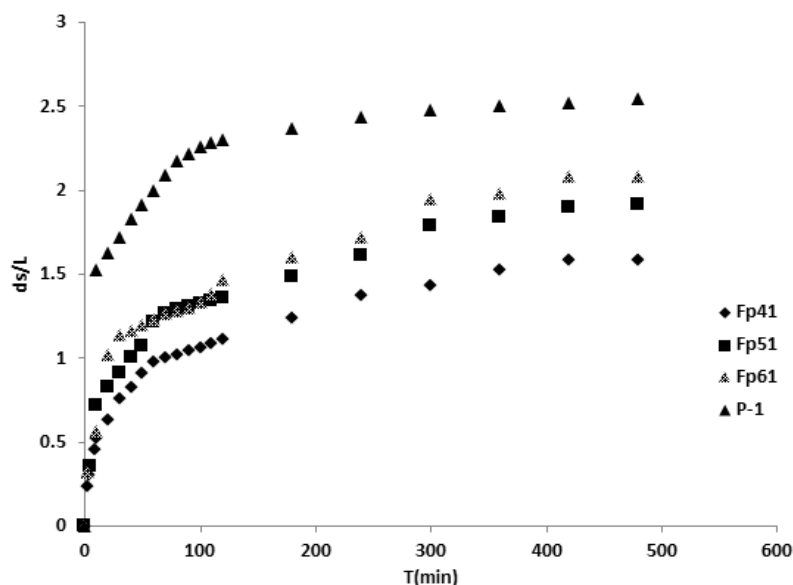
شکل ۵- تغییرات عمق آبهستگی در پایه غیر یکنواخت برای تراز های مختلف Z

نتایج حاصله نشان می دهد که در تمامی حالات عمق آبستگي در اطراف پایه های غیر یکنواخت کمتر از پایه های یکنواخت می باشد. از طرفی با افزایش تراز فونداسیون از $Z/L=0,0$ به $Z/L=0,65$ عمق آبستگي کاهش می یابد. بطور مثال مقدار ds/L برای پایه Fp^{41} برابر با ۱,۵۸ و این مقدار برای Fp^{44} برابر با ۱,۳۰ می باشد. مقایسه نتایج بین زمان های ۰,۰ تا ۱۰۰ دقیقه نشان می دهد که آبستگي به سرعت تا تراز قرارگیری فونداسیون پیشرفت کرده و پس از رسیدن به فونداسیون برای مدت زمانی در این موقعیت دچار تاخیر می شود که در نتیجه مدت زمانی نهایی آبستگي افزایش می یابد. در صورت قرارگیری فونداسیون زیر تراز بستر در رودخانه ها ، این افزایش زمان فرصتی را فراهم می آورد که بتوان فونداسیون پلها را بعد از بروز سیل تعمیر و بازسازی کرد و به این ترتیب می توان با طراحی مناسب تراز فونداسیون از تخریب پل ها جلوگیری کرد.

۵- بررسی تأثیر ابعاد پایه های غیر یکنواخت بر عمق آبستگي

جهت بررسی تأثیر ابعاد پایه های غیر یکنواخت بر عمق آبستگي در شکل ۶ مقایسه ای بین آبستگي در اطراف پایه های غیر یکنواخت با عرض های مختلف انجام شده است. در این شکل از پایه های غیر یکنواخت ، Fp^{51} و Fp^{61} استفاده شده که به ترتیب دارای عرضی (L) برابر با ۴,۶ ، ۵,۶ و ۶,۰ سانتیمتر می باشد. جهت بی تأثیر نمودن ابعاد فونداسیون در تمامی پایه های از فونداسیون های مشابه که عرض آن (L_f) برابر با ۹,۶ سانتیمتر می باشد استفاده و تراز قرار گیری آنها را $Z=0$ cm در نظر گرفته شده است. همچنین جهت بررسی و مقایسه بهتر این پایه ها نتایج حاصله با پایه یکنواخت (P^{-1}) نیز مقایسه شده است.

در شروع آبستگي با توجه به اینکه فونداسیون در تراز بستر ($Z=0$) قرار دارد، گردابه های نعل اسبی در تراز بستر به فونداسیون برخورد می کند و قدرت خود را از دست داده و مقدار عمق آبستگي در زمان های ابتدایی نسبت به پایه یکنواخت (P^{-1}) کمتر می باشد. نتایج نشان می دهد که در زمان ۱۰۰ دقیقه پس از شروع آزمایش میزان عمق آبستگي (ds/L) برای پایه های Fp^{41} ، Fp^{51} و Fp^{61} به ترتیب برابر با ۱,۰۰ ، ۱,۳۰ و ۱,۳۰ بوده در حالیکه در این زمان میزان آبستگي در اطراف پایه یکنواخت برابر با ۲,۳ می باشد. نتایج نشان می دهد که در پایه های غیر یکنواخت با افزایش عرض پایه عمق آبستگي نهایی نیز افزایش می یابد به طوری که مقدار ds/L برای پایه های Fp^{41} ، Fp^{51} و Fp^{61} به ترتیب برابر با ۱,۵۸ ، ۱,۹۱ و ۲,۰۸ می باشد که دلیل آن افزایش قدرت گردابه های نعل اسبی در اثر افزایش عرض پایه می باشد.



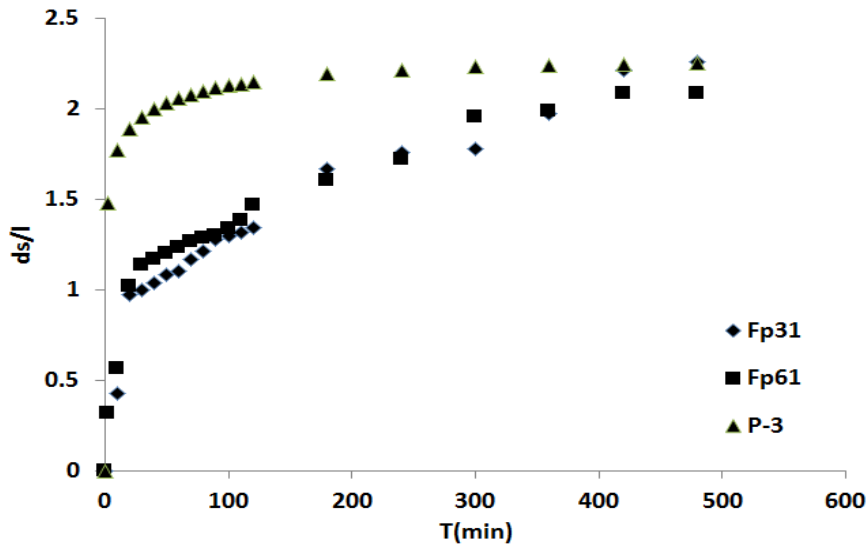
شکل ۶- مقایسه تاثیر ابعاد پایه ها بر عمق آبستگی در پایه های غیر یکنواخت

۶- بررسی تأثیر ابعاد فونداسیون بر عمق آبستگی

شکل ۷ تاثیر ابعاد فونداسیون بر روی آبستگی را در پایه هایی با عرض ثابت نشان می دهد. در این شکل مقایسه ای بین آبستگی در اطراف پایه های غیر یکنواخت Fp_{61} , Fp_{31} و همچنین پایه یکنواخت P-۳ ارائه شده است. جهت چشم پوشی از تاثیر عرض پایه ها؛ در تمامی پایه های عرض پایه (L) برابر با ۶ سانتیمتر در نظر گرفته شده و همچنین تراز فونداسیون در تمامی پایه های غیر یکنواخت در تراز سطح بستر ($Z=0$) در نظر گرفته شده است. عرض فونداسیون ها (L_f) در پایه های غیر یکنواخت Fp_{31} و Fp_{61} به ترتیب برابر با ۹,۶ و ۱۲,۶ سانتی متر می باشد.

مقایسه نتایج نشان می دهد که این حالت نیز مانند وضعیت قبل در زمان های ابتدایی میزان آبستگی در اطراف پایه های غیر یکنواخت کمتر از پایه های یکنواخت می باشد. بطور مثال پس از گذشت ۱۰۰ دقیقه از شروع آزمایش، مقدار ds/L برای پایه یکنواخت P-۳ در حدود ۲,۰ بوده در حالیکه این مقدار برای هر دو پایه های غیر یکنواخت کمتر از ۱,۵ می باشد. بعد از زمان ۱۰۰ دقیقه عمق آبستگی برای پایه های غیر یکنواخت به سرعت شروع به افزایش کرده بطوری که پس از گذشت ۵۰۰ دقیقه مقدار ds/L برای Fp_{61} با فونداسیون کوچک برابر با ۲,۰۸ و برای پایه Fp_{31} با فونداسیون بزرگتر برابر با ۲,۳۶ می باشد. بنابراین می توان نتیجه گرفت که ابعاد فونداسیون یکی از پارامترهای مهم و تاثیر گذار بر روی عمق آبستگی می باشد بطوریکه با افزایش ابعاد فونداسیون عمق آبستگی نهایی نیز افزایش می یابد. روند رشد نمودارها نشان می دهند که آبستگی در اطراف پایه های غیر یکنواخت در زمان های بالاتر از ۵۰۰ دقیقه در حال افزایش بوده و مقدار آبستگی افزایش می یابد.

این در حالی است که آبشستگی برای پایه یکنواخت عمق آبشستگی تقریباً به حال تعادل رسیده است و با گذشت زمان تغییر زیادی نخواهد کرد. نتایج فوق نشان می‌دهد که تراز قرار گیری فونداسیون و همچنین ابعاد آن از جمله پارامترهای مهم در روند آبشستگی اطراف پایه‌ها می‌باشد و طراحی صحیح فونداسیون می‌تواند موجب کاهش آبشستگی گردد.

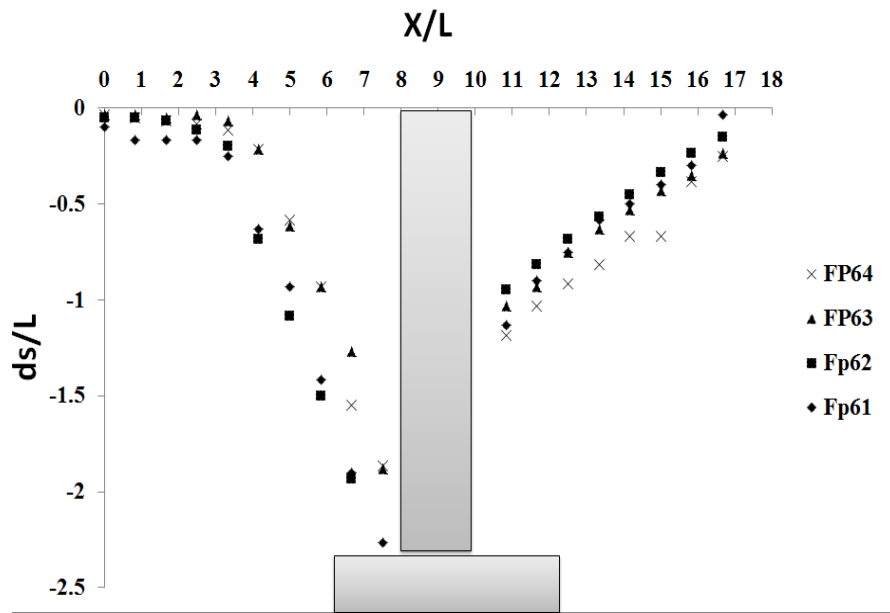


شکل ۷- مقایسه تاثیر ابعاد فونداسیون بر عمق آبشستگی در پایه‌های غیر یکنواخت

۷- بررسی توپوگرافی بستر در پایه‌های غیر یکنواخت

شکل ۸ پروفیل طولی بستر کانال از محور گذرنده در مرکز تقارن پایه‌های غیر یکنواخت را نشان می‌دهد. در این شکل از پایه‌هایی به عرض $L=6,0$ cm و عرض فونداسیون برابر با $L_f=9,6$ cm استفاده شده است. تراز قرارگیری فونداسیون برای پایه‌های FP_{61} ، FP_{62} ، FP_{63} و FP_{64} به ترتیب برابر با $Z=1$ cm، $Z=2$ cm، $Z=3$ cm و $Z=0,0$ cm می‌باشد. در این شکل محورهای افقی (فاصله) و قائم (عمق آبشستگی) توسط عرض پایه (L) بی‌بعد شده‌اند.

بطور کلی می‌توان گفت که شیب حفره آبشستگی در پشت پایه برای تمامی پایه‌های تقریباً مشابه بوده و برابر با زوایه قرارگیری رسوبات می‌باشد. در این شکل نسبت عمق آبشستگی (ds/L) برای پایه غیر یکنواخت FP_{61} که در تراز $Z=0,0$ برابر با $2,08$ بوده در حالیکه با افزایش تراز قرارگیری فونداسیون به $Z=3,0$ cm (FP_{64}) عمق آبشستگی به $1,86$ کاهش می‌یابد. این مقدار کاهش بستگی به تراز قرارگیری فونداسیون خواهد داشت. همچنین می‌توان نتیجه گرفت که حجم رسوبات منتقل شده با افزایش ابعاد حفره آبشستگی کاهش می‌یابد و تقریباً در عمق آبشستگی نهایی متوقف خواهد شد.



شکل ۸- آبخستگی گودال در اطراف پایه های غیر یکنواخت

نتیجه گیری :

در این تحقیق، آبخستگی موضعی در اطراف پایه های یکنواخت و غیر یکنواخت به صورت آزمایشگاهی و تحت شرایط آب زلال مورد بررسی قرار گرفته است. در تمامی آزمایش های فونداسیون در زیر تراز اولیه رسوبات در نظر گرفته شده است. در پایه های غیر یکنواخت، عمق آبخستگی تا بالای فونداسیون به سرعت افزایش می یابد و پس از رسیدن به فونداسیون، ابعاد فونداسیون مانع از رشد آبخستگی به مدت زمان معینی (زمان تاخیر) می شوند. مدت زمان تأخیر به ابعاد پایه ها، اندازه فونداسیون و تراز قرارگیری فونداسیون بستگی دارد. مقایسه نتایج حاصل از این تحقیق و محققان پیشین نشان داد که حداقل عمق آبخستگی زمانی حاصل می گردد که تراز قرارگیری فونداسیون (Z) در محدوده بین L تا $1.2L$ باشد. لازم به توضیح است که افزایش ابعاد پایه و فونداسیون موجب افزایش عمق آبخستگی می گردد. این مطالعه نشان می دهد که طراحی دقیق ابعاد و تراز فونداسیون باعث کاهش عمق آبخستگی و افزایش مدت زمان آبخستگی می شود. در صورت قرارگیری فونداسیون در زیر تراز مناسبی از بستر در رودخانه ها، این افزایش زمان فرصتی را فراهم می آورد که بتوان آبخستگی در اطراف فونداسیون پلها را بعد از بروز سیل تعمیر و بازسازی کرد و به این ترتیب می توان با طراحی مناسب تراز فونداسیون از تخریب پل ها جلوگیری کرد.

منابع :

١. Arneson, L. A., Zevenbergen, L. W., Lagasse, P. F., and Clopper, P. E. (٢٠١٢). "Evaluating scour at bridges (HEC-١٨)." Technical Rep. No. HIF-١٢-٠٠٣, Federal Highway Administration, Washington, DC.
٢. Ataie-Ashtiani, B. and Aslani-Kordkandi, A. ٢٠١٣. Flow field around single and tandem piers. Flow, Turbulence and Combustion, ٩٠(٣), ٤٧١-٤٨٠.
٣. Ataie-Ashtiani, B., Baratian-Ghorghi, Z. and Beheshti, A. A. ٢٠١٠. Experimental Investigation of Clear-Water Local Scour of Compound Piers. Journal of Hydraulic Engineering-Asce, ١٣٦(٦), ٣٤٣-٣٥١.
٤. Chabert, J. and Engeldinger, P. ١٩٥٦. Etude des affouillements autour des piles de ponts. Serie A, Laboratoire National d'Hydraulique. Chatou, France (in French).
٥. Coleman, S. E. ٢٠٠٥. Clearwater local scour at complex piers. Journal of Hydraulic Engineering- Asce, ١٣١(٤), ٣٣٠-٣٣٤.
٦. Ettema, R., Constantinescu, G. and Melville, B. W. ٢٠١١. Evaluation of Bridge Scour Research: Pier Scour Processes and Predictions. NCHRP ٢٤-٢٧(٠١), Transportation Research Board, Washington, DC.
٧. Ferraro, D., Tafarjnoruz, A., Gaudio, R., and Cardoso, A. H. (٢٠١٣). "Effects of pile cap thickness on the maximum scour depth at a complex pier. J. Hydraul. Eng)/(١٠,١٠٦١), .ASCE)HY. ١٩٤٣-٧٩٠٠, ٠٠٠,٧٠٤, ٤٨٢ - ٤٩١.
٨. Ghani, A. A. and Mohammadpour, R. ٢٠١٥. Temporal variation of clear-water scour at compound Abutments. Ain Shams Engineering Journal, <http://dx.doi.org/١٠,١٠٦١/j.asej.٢٠١٥,٠٧,٠٠٥>
٩. Graf, W. H. and Istiarto, I. ٢٠٠٢. Flow pattern in the scour hole around a cylinder. Journal of Hydraulic Research, ٤٠(١), ١٣-٢٠.
١٠. Jones, J. S., Kilgore, R. T. and Mistichelli, P. ١٩٩٢. Effects of Footing Location on Bridge Pier Scour. Journal of Hydraulic Engineering, ١١٨(٢), ٢٨٠-٢٨٩.
١١. Lança, R., Fael, C., Maia, R., Pêgo, J., and Cardoso, A. (٢٠١٣a). "Clear-water scour at comparatively large cylindrical piers." J. Hydraul. Eng., ١٠,١٠٦١/(ASCE)HY. ١٩٤٣-٧٩٠٠, ٠٠٠,٧٨٨, ١١١٧-١١٢٥.
١٢. Lu, J.-Y., Shi, Z.-Z., Hong, J.-H., ee, -.J., and Raikar, V. K. (٢٠١١). "Temporal variation of scour depth at nonuniform cylindrical piers." J. Hydraul. Eng., ١٠,١٠٦١/(ASCE)HY. ١٩٤٣-٧٩٠٠, ٠٠٠,٢٧٢, ٤٥-٥٦.

۱۳. Melville, B. W. ۱۹۹۲. Local Scour at Bridge Abutments. Journal of Hydraulic Engineering-Asce, ۱۱۸(۴), ۶۱۵-۶۳۱.
۱۴. Melville, B. W. and Raudkivi, A. J. ۱۹۹۶. Effects of foundation geometry on bridge pier scour. Journal of Hydraulic Engineering-Asce, ۱۲۲(۴), ۲۰۳-۲۰۹.
۱۵. Mohammadpour, R., Ghani, A. A. and Azamathulla, H. M. ۲۰۱۳. Estimation of dimension and time variation of local scour at short abutment. International Journal of River Basin Management, ۱۱(۱), ۱۲۱-۱۳۵.
۱۶. Mohammadpour, R., Ghani, A. A. and Azamathullah, H. M. ۲۰۱۱. Estimating time to equilibrium scour at long abutment by using genetic programming. ۳rd International Conference on Managing Rivers in the ۲۱st Century, Rivers ۲۰۱۱. Penang, Malaysia.
۱۷. Mohammadpour, R., Ghani, A. A., Zakaria, N. A. and Ali, T. a. M. ۲۰۱۵b. Predicting scour at river bridge abutments over time. Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Water Management, ۱۱۸(۱), ۱-۱۶.
۱۸. Mohammadpour, R., Ghani, A. and Zakaria, N. ۲۰۱۴. Time variation of scour depth around complex abutment. Scour and Erosion: Proceedings of the ۷th International Conference on Scour and Erosion, Perth, Australia, ۲-۴ December ۲۰۱۴, ۲۰۱۴. CRC Press, ۴۵۵-۴۶۰.
۱۹. Mohammadpour, R., Ghani, A., Vakili, M. and Sabzevari, T. ۲۰۱۵a. Prediction of temporal scour hazard at bridge abutment. Natural Hazards, ۱۰, ۱۰۰۷/س۱۱۰۶۹-۰۱۵-۲۰۴۴-۸, ۱-۲۱.
۲۰. Moreno, M., Maia, R. and Couto, L. ۲۰۱۶. Prediction of Equilibrium Local Scour Depth at Complex Bridge Piers. Journal of Hydraulic Engineering, ۱۴۲(۱۱).
۲۱. Parola, A. C., Mahavadi, S. K., Brown, B. M. and Elkhoury, A. ۱۹۹۶. Effects of rectangular foundation geometry on local pier scour. Journal of Hydraulic Engineering-Asce, ۱۲۲(۱), ۳۵-۴۰.
۲۲. Richardson, E. V., Davis, S. R. ۲۰۰۱. Evaluating scour at bridges. Hydraulic Engineering Circular No. ۱۸ (HEC-۱۸), ۴th Ed., Rep. No. FHWA NHI ۰۱-۰۰۱, : Federal Highway Administration, Washington, D.C.
۲۳. Sheppard, D. M. and Renna, R. ۲۰۰۵. Florida bridge scour manual. Florida DOT, Tallahassee, Fla.
۲۴. Yanmaz, A. M. and Altinbilek, H. D. ۱۹۹۱. Study of Time-Dependent Local Scour around Bridge Piers. Journal of Hydraulic Engineering-Asce, ۱۱۷(۱۰), ۱۲۴۷-۱۲۶۸.

