

## بررسی تغییرات زمانی آبشستگی در اطراف پایه‌های مرکب مستطیلی

رضا محمدپور<sup>۱\*</sup>، عاطفه تقی شاهبازی<sup>۲</sup>، تورج سبزواری<sup>۳</sup> و مهدی کریمی مقدم<sup>۴</sup>

۱، ۲ و ۳- به ترتیب: استادیار؛ فارغ التحصیل کارشناسی ارشد؛ و دانشیار گروه مهندسی عمران، دانشگاه آزاد اسلامی واحد استهبان، ایران

۴- استادیار گروه کشاورزی، دانشگاه پیام نور، ایران

تاریخ دریافت: ۹۹/۵/۳۱؛ تاریخ پذیرش: ۹۹/۱۰/۲۲

نوع مقاله: علمی - پژوهشی

### چکیده

عموما پایه پل‌ها به علت ملاحظات اقتصادی و ژئوتکنیک بر روی فونداسیون اجرا می‌گردد. اکثر مطالعات انجام شده پیرامون تغییرات زمانی آبشستگی، مربوط به پایه‌ها یکنواخت بوده و مطالعات کمتری در زمینه پایه‌های مرکب (پایه به همراه فونداسیون) در دست می‌باشد. نوآوری این تحقیق علاوه بر تعیین عمق بهینه قرار گیری فونداسیون، بررسی تغییرات زمانی آبشستگی در اطراف پایه‌های مرکب مستطیلی و همچنین تاثیر ابعاد پایه و فونداسیون بر عمق آبشستگی می‌باشد. کلیه آزمایشها فونداسیون در زیر تراز بستر قرار گرفته و تحت شرایط آب زلال و با رسوبات یکنواخت با قطر متوسط 0.7 میلی‌متر انجام شد. نتایج حاصله نشان می‌دهد که در تمامی حالات عمق آبشستگی در اطراف پایه‌های مرکب کمتر از پایه‌های یکنواخت می‌باشد. از طرفی در پایه‌های مرکب آبشستگی تا تراز فونداسیون گسترش یافته و سپس فونداسیون به عنوان مانعی برای مدت زمان مشخصی (زمان تأخیر) از پیشرفت آبشستگی جلوگیری می‌کند. زمان تأخیر و عمق آبشستگی به عرض پایه (L)، عرض فونداسیون (Lf) و همچنین تراز قرار گیری فونداسیون (Z) بستگی دارد. با افزایش تراز نسبی فونداسیون زیر بستر (Z/L)، میزان آبشستگی کاهش یافته تا به مقدار حداقل خود در تراز بین L تا ۱.۲L برسد. از نتایج این تحقیق می‌توان به تاثیر حضور فونداسیون بر افزایش زمان تعادل آبشستگی و در نتیجه فراهم شدن زمان کافی برای تعمیرات فونداسیون پس از بروز سیل اشاره کرد.

### واژه‌های کلیدی

آبشستگی موضعی، مکانیسم آبشستگی، پایه‌های مرکب، ابعاد فونداسیون، تراز فونداسیون

### مقدمه

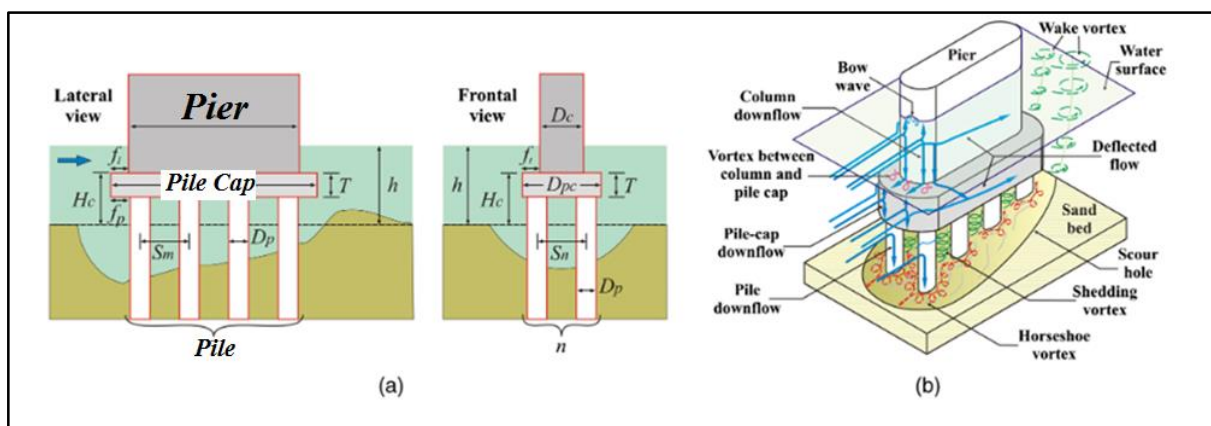
می‌گردد. گردابه‌های نعل اسبی بیشتر در جلو پایه فعالیت دارد. جدایی جریان از پایه پل و افزایش تنش برشی در پشت پایه عامل تشکیل گردابه بر خاستگی می‌باشد (Dey & Raikar 2007) اکثر مطالعات انجام شده پیرامون تغییرات زمانی آبشستگی مربوط به پایه‌های یکنواخت بوده و مطالعات کمتری در زمینه آبشستگی در اطراف پایه‌های مرکب (پایه به همراه فونداسیون) در دست می‌باشد (Mohammadpour et al., 2014).

وجود پایه‌های 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 پایه‌های پل، تشکیل گردابه‌های نعل اسبی و در نتیجه جدا شدن مصالح و حمل آن به پایین دست می‌باشد. در اثر برخورد آب به پایه پل، جریان رو به پایین تشکیل شده که پس از برخورد به بستر گردابه‌های نعل اسبی ایجاد

این در حالی است که به علت مسائل ژئوتکنیکی و اقتصادی اغلب پایه‌ها بر روی فونداسیون ساخته می‌شود. لازم به توضیح است که پیش‌بینی آبشستگی در اطراف پایه‌ها منجر به طراحی اقتصادی پل‌ها می‌گردد. در صورتی که عمق آبشستگی زیاد تخمین زده شود، منجر به قرار گیری فونداسیون در عمق پایین شده که در نهایت طرح غیر اقتصادی خواهد شد (Mohammadpour *et al.*, 2014). از طرفی تخمین عمق کم برای آبشستگی نیز موجب قرار گیری فونداسیون در نزدیکی سطح بستر شده و این مسئله می‌تواند گردابه‌های نعل اسبی دیگری به علت حضور فونداسیون ایجاد کرده و تخریب پایه را تسریع نماید.

عموما پایه‌های مرکب به دو صورت تعریف می‌شوند. نوع اول پایه (pier) فقط به همراه فونداسیون می‌باشد و در نوع دوم پایه به همراه فونداسیون یا سر شمع و شمع‌های زیر آن تعریف می‌شوند (شکل ۱).

این در حالی است که به علت مسائل ژئوتکنیکی و اقتصادی اغلب پایه‌ها بر روی فونداسیون ساخته می‌شود. لازم به توضیح است که پیش‌بینی آبشستگی در اطراف پایه‌ها منجر به طراحی اقتصادی پل‌ها می‌گردد. در صورتی که عمق آبشستگی زیاد تخمین زده شود، منجر به قرار گیری فونداسیون در عمق پایین شده که در نهایت طرح غیر اقتصادی خواهد شد (Mohammadpour *et al.*, 2014). از طرفی تخمین عمق کم برای آبشستگی



شکل ۱- (a) هندسه پایه مرکب - (b) ساختار جریان در اطراف پایه ی مرکب (Moreno et al. 2016)  
 Fig. 1- a) Configuration of complex pier; b) Flow pattern around pier (Moreno et al. 2016)

بسیار محدودتر می‌باشد (Ghani & Mohammadpour, 2015; Mohammadpour *et al.*, 2014; 2017; 2019) اولین تحقیقات صورت گرفته در مورد پایه‌های مرکب، توسط چابرت و انگلیندگر (Chabert, & Engeldinger, 1956) می‌باشد. آنها با انجام بیست آزمایش بر روی پایه مرکب با فونداسیون استوانه‌ای به این نتیجه رسیدند که کاهش آبشستگی هنگامی صورت می‌گیرد که فونداسیون در زیر تراز بستر قرار گیرد و در صورتیکه فونداسیون در تراز بالای بستر واقع شود موجب افزایش آبشستگی خواهد شد. جونز و همکاران (Jones *et al.*, 1992) با مطالعه بر روی

در این نوع پایه‌ها جریان و اندرکنش آن با بستر بسیار پیچیده‌تر از پایه‌های یکنواخت می‌باشد. تاکنون تحقیقات وسیعی در مورد آبشستگی در اطراف پایه‌های یکنواخت انجام شده است (Jones *et al.*, 1992; Melville *et al.*, 1992; Mohammadpour *et al.*, 2011 & 2013; Lança *et al.*, 2013). با توجه به اینکه آبشستگی تابعی از زمان می‌باشد، بنابراین بخشی از تحقیقات انجام شده پیرامون بررسی تغییرات عمق آبشستگی نسبت به زمان می‌باشد (Yanmaz & Altinbilek, 1991; Lu *et al.*, 2011; Mohammadpour *et al.*, 2015a & 2015b). این در حالی است که مطالعات انجام شده در اطراف پایه‌ها و تکیه‌گاه‌های مرکب

معرض جریان قرار داشتند. آنها به این نتیجه رسیدند که جریان پس از برخورد با سر شمع (pile cap) به دو قسمت تقسیم می‌شود که در جهت قائم و در خلاف یکدیگر حرکت می‌کنند. دسته اول جریانهایی که به سمت بالا و به طرف پایه حرکت می‌کنند، دسته دوم جریانهایی که به سمت پایین و به سمت شمع‌ها حرکت خواهند کرد. آنها با استفاده از نتایج آزمایشگاهی روابط ارائه شده توسط کلمن (Coleman, 2005) و همیچنین HEC-18 را تصحیح کردند. محققان دیگری نیز به بررسی ساختار جریان در اطراف پایه‌های مرکب هنگامی که سر شمع بالاتر از بستر باشد پرداخته‌اند (Ataie-Ashtiani, & Aslani-Kordkandi, 2013; Graf, & Istiarto, 2002). بر اساس این مطالعات آبشستگی در اطراف گروه شمع‌های ناشی از دو مکانیزم می‌باشد که عبارتند از آبشستگی ناشی از عملکرد شمع به تنهایی که منجر به تولید جریانهای پایین رونده، گردابه‌های نعل اسبی و گردابه‌های برخاستگی می‌گردد و آبشستگی ناشی از تاثیر شمع‌ها بر یکدیگر که می‌توان به فرایندهایی مانند تشدید آبشستگی، اثر متقابل گردابه‌های برخاستگی و فشردگی گردابه‌های نعل اسبی اشاره نمود (Moreno *et al.*, 2016). در شکل ۱ الگوی جریان در اطراف پایه‌های مرکب و تاثیر شمع‌ها بر یکدیگر نشان داده شده است.

آبشستگی محلی می‌تواند منجر به تخریب‌های جزئی در اطراف پایه و یا تخریب کامل پایه و پل گردد. برآورد دقیق عمق نهایی آبشستگی در اطراف پایه‌های مرکب منجر به طراحی دقیق و اقتصادی فونداسیون این نوع سازه‌ها می‌گردد. اما این مسئله واضح است که بر خلاف تحقیقات انجام شده در دهه‌های قبل متاسفانه روابطی که برای تخمین

پایه‌های غیر یکنواخت که بر روی فونداسیون مستطیلی قرار گرفته بود، مشاهده کردند که وقتی فونداسیون در زیر تراز معینی از بستر قرار گیرد، کاهش قابل ملاحظه‌ای در آبشستگی رخ می‌دهد. ملویل و رادکیوی (Melville & Raudkivi, 1996) مطالعات آزمایشگاهی خود را بر روی پایه و فونداسیون استوانه‌ای انجام دادند و با تغییر نسبت قطر پایه به قطر فونداسیون، مقدار بهینه‌ای را برای این نسبت پیدا کردند و همچنین اثر تراز قرارگیری فونداسیون را نیز مورد ارزیابی قرار دادند. آنها موقعیت قرار گرفتن پایه غیر یکنواخت در گودال آبشستگی را به ۳ ناحیه متفاوت تقسیم بندی کردند. ناحیه ۱) وضعیتی است که فونداسیون زیر حداکثر عمق آبشستگی قرار دارد که در شرایط پایه مرکب مانند یک پایه یکنواخت در نظر گرفته می‌شود. ناحیه ۲) فونداسیون داخل گودال آبشستگی می‌باشد و ناحیه ۳ فونداسیون بالای تراز بستر قرار دارد. پارولا و همکاران (Parola *et al.*, 1996) تحقیقاتی پیرامون آبشستگی بر روی پایه و فونداسیون مستطیلی انجام داده و به این نتیجه رسیدند که وقتی فونداسیون زیر بستر قرار می‌گیرد تاثیر حفاظتی آن افزایش می‌یابد. محمدپور و همکاران (Mohammadpour *et al.*, 2015b) آبشستگی در اطراف تکیه گاه‌های مرکب را به صورت ریاضی مورد بررسی قرار دادند. آنها رابطه‌ای را جهت محاسبه تغییرات زمانی عمق آبشستگی در اطراف تکیه گاه‌های مرکب ارائه کرده‌اند.

عطایی آشتیانی و همکاران (Ataie-Ashtiani *et al.*, 2010) جریان در اطراف پایه به همراه فونداسیون و شمع‌ها را مورد ارزیابی قرار داد. در مطالعات آنها فونداسیون و شمع‌ها در بالای بستر رسوبی قرار گرفته بود به گونه‌ای که این اجزاء در

زاویه قرارگیری فونداسیون؛ و  $Kt =$  ضریب مرتبط با مدت زمان آبشستگی.

در روش HEC-18 میزان آبشستگی نهایی در اطراف پایه مرکب (dse) بر اساس اصل سوپر پوزیشن بدست می‌آید. به عبارت دیگر بر اساس رابطه ۲ میزان آبشستگی نهایی برابر است با مجموع آبشستگی نهایی پایه (dsec)، سر شمع (dsepc) و شمع‌ها (dsepg):

$$d_{se} = d_{sec} + d_{sepc} + d_{sepg} \quad (۲)$$

در روش FDOT میزان آبشستگی در اطراف پایه مرکب را برابر با آبشستگی در اطراف یک پایه استوانه‌ای با قطر معادل (De) فرض می‌کند. از طرفی این قطر معادل برابر است با مجموع هر کدام از مولفه‌های پایه مرکب با این تفاوت که میزان آبشستگی هر کدام از مولفه نیز بر اساس پایه استوانه‌ای معادلی بدست می‌آید که بتواند همان میزان آبشستگی را تحت همان شرایط ایجاد کند. در رابطه ۳ این رابطه ارائه شده است:

$$D_e = D_{ec} + D_{epc} + D_{epg} \quad (۳)$$

که در آن، Depc، Dec و Depg = به ترتیب برابر با قطر معادل پایه، سرشمع و شمع‌های پایه مرکب.

با توجه به مواردی که در قسمت‌های پیشین به آن‌ها اشاره گردید، اکثر تحقیقات مربوط به پایه‌ها به همراه سرپوش و گروه شمع‌های زیر آن می‌باشند و مطالعات مربوط به پایه‌ها به همراه فونداسیون تنها (بدون شمع) کمتر مورد توجه قرار گرفته است. نوآوری این تحقیق علاوه بر تعیین عمق بهینه قرار

حداکثر عمق آبشستگی (dse) ارائه شده است نمی‌توانند مقدار دقیق آبشستگی را پیش‌بینی کنند (Ferraro *et al.*, 2013) دلیل این امر تاثیر پارامترهای مختلف بر آبشستگی می‌باشد. مطابق نظر اتما (Ettema *et al.*, 2011) آبشستگی در اطراف پایه‌های مرکب بسیار پیچیده بوده و می‌بایست با استفاده از هر دو مدل عددی و آزمایشگاهی مورد ارزیابی قرار گیرد. بطور کلی تاکنون سه رابطه اساسی برای تخمین عمق آبشستگی در اطراف پایه‌های مرکب پیشنهاد شده است که عبارتند از: رابطه ارائه شده توسط دانشگاه آکلند (Coleman, 2005)، روش پیشنهاد شده توسط بخش حمل و نقل فلوریدا (FDOT) که توسط شپارد و رنا (Sheppard. & Renna, 2005) ارائه شده است و روش HEC-18 که توسط ریچاردسون و داویس (Richardson & Davis, 2001) ارائه شده و توسط آرنسون و زنبرجن (Arneson, & Zevenbergen, 2012) مورد ارزیابی قرار گرفت. در ادامه هر کدام از این روش‌ها توضیح داده شده است.

روش پیشنهادی کالمن (Coleman, 2005) همان روش ارائه شده توسط ملویل و کالمن (Melville & Coleman, 2000) می‌باشد اما با این تفاوت که در این رابطه قطر پایه معادل بر اساس تراز قرارگیری فونداسیون پایه مرکب محاسبه می‌گردد. این رابطه این روش در رابطه ۱ ارائه شده است.

$$d_s = K_{yb} K_I K_D K_s K_\theta K_t \quad (۱)$$

که در آن،  $K_{yb}$  = ضریب مرتبط به قطر پایه و عمق جریان؛  $K_I$  = ضریب شدت جریان؛  $K_D$  = ضریب اندازه رسوبات؛  $K_s$  = ضریب شکل فونداسیون؛  $K_\theta$  = ضریب

پوشی کرد (Cardoso & Fael, 2010). با استفاده از رابطه فوق می‌توان رابطه ۵ را بر اساس تئوری باکینگهام برای عمق آبشستگی بدست آورد.

$$\frac{d_s}{L} = f\left(\frac{U^2}{gd_{50}}, \frac{y}{L}, \frac{d_{50}}{L}, K_\theta, K_s, K_G\right) \quad (5)$$

با توجه به اینکه در این تحقیق از پایه‌های مستطیل شکل و بدون زاویه (عمود بر کناره کانال) در کانال مستطیلی استفاده شده بنابراین  $K_s=1$  و  $K_\theta=1$  می‌باشد. در کانال‌های عریض با سطح مقطع مستطیل شکل و در شرایط جریان یکنواخت تأثیری  $K_G$  بر آبشستگی نخواهد داشت، در نتیجه رابطه ۵ را می‌توان به صورت رابطه ۶ بازنویسی کرد:

$$\frac{d_s}{L} = f\left(\frac{U^2}{gd_{50}}, \frac{y}{L}, \frac{d_{50}}{L}\right) \quad (6)$$

در صورتیکه  $d_{50} > 50/L$  می‌توان از تأثیر رسوبات بستر ( $d_{50}/L$ ) چشم پوشی کرد (Melville & Coleman, 2000). با توجه به اینکه در این تحقیق هدف بررسی آبشستگی در اطراف پایه‌های مرکب می‌باشد بنابراین مطابق با شکل ۲ ابعاد فونداسیون و همچنین تراز قرارگیری آن بر روی آبشستگی تأثیر مستقیم خواهد داشت، بنابراین می‌توان رابطه ۶ را بصورت رابطه ۷ ارائه کرد:

$$\frac{d_s}{L} = f\left(\frac{U^2}{gd_{50}}, \frac{y}{L}, \frac{Z}{L}, \frac{L}{L_f}\right) \quad (7)$$

گیری فونداسیون، بررسی تغییرات زمانی آبشستگی در اطراف پایه‌های مرکب مستطیلی و همچنین ارزیابی تأثیر ابعاد پایه و فونداسیون نیز می‌باشد. در این تحقیق تأثیر تراز قرارگیری فونداسیون، ابعاد فونداسیون و همچنین ابعاد پایه بر روی آبشستگی بطور مجزا مورد بررسی و بحث قرار گرفته است.

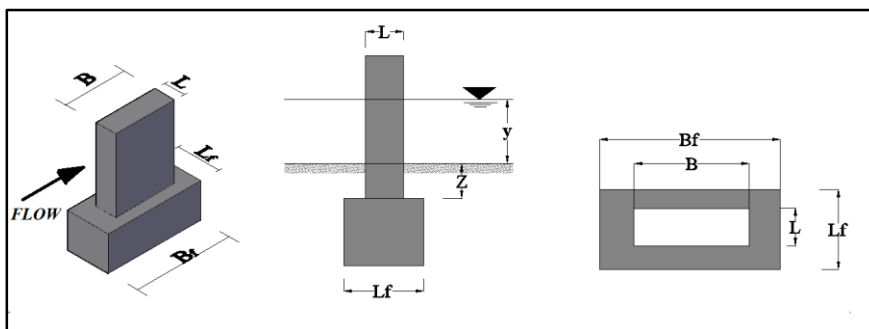
### آنالیز ابعادی

عمق آبشستگی ( $d_s$ ) در اطراف پایه پلها به عوامل مختلفی از جمله زمان، شرایط جریان، ویژگی‌های سیال، جنس رسوبات و همچنین شکل و ابعاد پایه بستگی دارد. در رابطه ۴ مجموعه‌ای از این پارامترها قید شده است (Melville, 1992):

$$d_s = f\left(L, U, y, U_c, d_{50}, g, \rho, \nu, \sigma, \rho_s, K_G, K_\theta, K_s\right) \quad (4)$$

که در آن،

$L$  = عرض پایه؛  $U$  = سرعت جریان؛  $y$  = عمق جریان؛  $U_c$  = سرعت آستانه حرکت رسوبات؛  $d_{50}$  = قطر متوسط رسوبات؛  $g$  شتاب ثقل زمین؛  $\rho$  و  $\nu$  = به ترتیب چگالی و لزجت دینامیکی سیال؛  $\sigma$  = انحراف معیار استاندارد رسوبات؛  $\rho_s$  = چگالی رسوبات؛  $K_G$  = ضریب شکل کانال؛  $K_s$  = ضریب شکل؛  $K_\theta$  = ضریب زاویه قرارگیری گوشواره یا تکیه گاه (Abutment). در شرایطی که  $\rho_s$  تقریباً ثابت باشد و همچنین  $d_{50} > 0.6$  و  $d_{50} < 1.3$  باشد، رسوبات بستر یکنواخت بوده و می‌توان از تأثیر انحراف معیار استاندارد و چگالی رسوبات چشم



شکل ۲- پایه‌های مرکب مورد استفاده در این تحقیق

Fig 2. Complex piers in present study

در این تحقیق مقدار انحراف معیار رسوبات برابر با  $\delta = 1.23$  بدست آمده است، بنابراین رسوبات یکنواخت خواهند بود.

$$\sigma = \sqrt{\frac{d_{84}}{d_{16}}} = 1.23 < 1.30 \quad (9)$$

در محدوده‌ای به طول ۱ متر و در فاصله ۶ متری از ابتدای کانال کف کانال به اندازه ۰/۴ متر بالا آورده شده و این محدوده به عنوان محدوده انجام آزمایشات در نظر گرفته شد. در بالادست و پایین دست این منطقه سکوهایی از جنس تفلون نصب گردید که به منظور یکنواخت نمودن ضریب زبری سکوهایی تفلونی با ضریب زبری خاک منطقه آزمایش، رسوباتی از جنس رسوبات انتخاب شده توسط چسب بر روی سکوها چسبانده شد. کلیه آزمایشها در شرایط آب زلال انجام شد و برای حصول ماکزیمم عمق آبشستگی سرعت جریان نزدیک به سرعت بحرانی تنظیم شد به گونه‌ای که  $U/U_c$  برابر با ۰/۹۲ قرار گرفت. در این شرایط میزان سرعت در کانال برابر با 32 cm/s و میزان عدد فرود برابر با  $Fr=0.22$  بدست آمده است.

لازم به توضیح است که مقدار  $U_c$  با استفاده از رابطه پیشنهادی توسط (Melville & Coleman, 2000) (روابط ۱۰ و ۱۱) به شرح زیر بدست آمده است.

ملویل و سوترلند (Melville & Sutherland, 1988) نشان دادند که برای  $\frac{y}{L} \geq 3.4$  عمق جریان تاثیر معناداری بر عمق آبشستگی ندارد در این مقاله عمق جریان به گونه‌ای انتخاب شده که شرایط فوق حاکم باشد. از طرفی با ثابت نگه داشتن سرعت در کلیه آزمایشها می‌توان از تاثیر عدد فرود ( $U^2/gd_{50}$ ) نیز چشم پوشی کرد. بنابراین متغیرهای این تحقیق مطابق رابطه ۸ ابعاد پایه، ابعاد فونداسیون و همچنین تراز قرارگیری آن خواهد بود.

$$\frac{d_s}{L} = f\left(\frac{Z}{L}, \frac{L}{L_f}\right) \quad (8)$$

### مواد و روشها

کلیه آزمایشهای این تحقیق، در آزمایشگاه هیدرولیک دانشگاه آزاد اسلامی-واحد استهبان انجام شده است. آزمایشها در یک کانال به طول 12 متر، عرض 0.4 متر و ارتفاع 0.6 متر انجام شده است (شکل ۳). جنس جداره و کف کانال از پلاکسی گلاس شفاف بوده و در کلیه آزمایشها از رسوبات با قطر متوسط  $d_{50} = 0.7$  میلی‌متر استفاده شده است. جهت بررسی یکنواختی رسوبات از انحراف معیار رسوبات ( $\delta$ ) استفاده شده است. این مقدار از رابطه ۹ محاسبه می‌شود، در صورتیکه انحراف معیار رسوبات از 1.30 کوچکتر باشد، رسوبات یکنواخت محسوب می‌شوند (Melville & Coleman, 2000).

جریان تاثیری بر عمق آبشستگی نخواهد داشت. لازم به توضیح است که عمق جریان و عمق آبشستگی در زمان‌های مختلف و همچنین توپوگرافی حفره آبشستگی در انتهای آزمایش با استفاده از عمق سنجی (point gage) با دقت  $\pm 1$  میلی‌متر اندازه‌گیری شد. با توجه به اینکه مطابق با نظر (Oliveto & Hager, 2002) آبشستگی هیچگاه متوقف نمی‌شود بنابراین (Coleman et al., 2003) نشان داد که زمان تعادل آبشستگی هنگامی خواهد بود که در یک بازه زمانی ۲۴ ساعته تغییرات عمق آبشستگی کمتر از ۵٪ قطر پایه باشد. از طرفی (Mohammadpour et al., 2013) نشان دادند که ۸۰ الی ۹۰ درصد عمق آبشستگی نهایی، در مدت زمان ۲۰ الی ۴۰ درصد ابتدای زمان آزمایش رخ می‌دهد. برای حصول این مقدار آبشستگی، مدت زمان آزمایشات در این تحقیق حدود ۸ ساعت در نظر گرفته شد.

$$U_c^* = 0.0115 + 0.0125 d_{50}^{1.4} \quad (10)$$

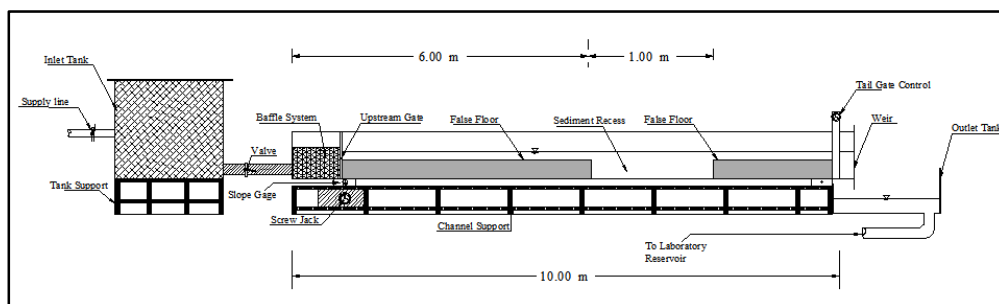
$$0.1 \text{ mm} < d_{50} < 1 \text{ mm}$$

$$\frac{U_c}{U_c^*} = 5.75 \log \left( 5.53 \frac{y}{d_{50}} \right) \quad (11)$$

که در آنها،

$Y =$  عمق جریان؛  $U_c =$  سرعت بحرانی؛ و  $U_c^* =$  سرعت برشی بحرانی.

در این تحقیق تمام آزمایشات با دبی ثابت به میزان ۲۷ لیتر بر ثانیه انجام شده و جهت تنظیم و سنجش دبی از شیر مدرج در ابتدای کانال استفاده شده و همچنین از سرریز انتهای کانال استفاده شده است. عمق جریان در آزمایشات ۲۱ سانتی‌متر در نظر گرفته شد که با توجه به حداکثر عرض پایه  $L = 6 \text{ cm}$  مورد استفاده در این تحقیق (جدول ۱) مقدار  $y/L = 3.4 > 3.5$  خواهد بود که با توجه به نتایج مطالعه (Melville & Sutherland (1988) عمق



شکل ۳- نمایی از کانال آزمایشگاهی

Fig. 3- Experimental flume

شکل ۲ پایه‌های مرکب مورد استفاده در این تحقیق را نشان می‌دهد. در این شکل و جدول ۱ پارامتر  $L =$  عرض پایه،  $L_f =$  عرض فونداسیون،  $B =$  طول پایه،  $B_f =$  طول فونداسیون و  $Z =$  فاصله تراز بالای فونداسیون تا سطح بستر رسوبات می‌باشد. برای از بین بردن تاثیر دیواره‌ای کانال بر روی آبشستگی موضعی حداقل نسبت، عرض کانال به قطر پایه ( $b/L$ ) باید بزرگتر از ۶٫۲۵ باشد (Melville, 1992). در این تحقیق از پایه‌هایی به عرض ۵٫۶، ۴٫۶ و  $L = 6$  سانتی‌متر استفاده شده است که با توجه به

عرض کانال ( $b = 40 \text{ cm}$ )، نسبت ذکر شده در تمامی آنها رعایت شده و می‌توان از تاثیر دیواره‌ها چشم پوشی کرد. در کلیه آزمایشها از دو نوع فونداسیون با ابعاد  $L_f = 9.6$  و  $L_f = 12.6$  سانتی‌متر استفاده شده که در جدول ۱ جزئیات آنها قید شده است. لازم به توضیح است که با توجه به قرارگیری فونداسیون در زیر تراز بستر، می‌توان از تاثیر دیواره‌های کانال بر آنها چشم پوشی کرد. تراز قرارگیری فونداسیون ( $Z$ ) نسبت به سطح اولیه رسوبات اندازه‌گیری شده است. با توجه به قرارگیری فونداسیون در زیر تراز بستر،

مقادیر متفاوتی برای تراز نسبی فونداسیون (Z/L) آزمایش جهت ثابت ماندن بستر رسوبات، انتخاب شده که در جدول ۱ مقدار آنها ارائه شده ابتدا کانال با استفاده از شیلنگ به آرامی است. آزمایشها برای پایه‌های یکنواخت (uniform) و از آب پر شده و هنگامی که آب به تراز مورد نظر رسید پمپ‌ها روشن و آزمایش آغاز مرکب (complex) انجام شده است که در جدول ۱ به ترتیب از حروف P و FP استفاده شده است. در هر می‌گردید.

جدول ۱- پایه‌های مرکب در تحقیق حاضر

Table 1- Complex piers in the present study

Case	نوع پایه Type of Piers	Name	عمق	عرض	طول	عرض	Z/L	L/Lf	B/Bf	
			فونداسیون	پایه	فونداسیون	فونداسیون				
			(سانتی‌متر) Fou. level	(سانتی‌متر) Pier width	(سانتی‌متر) Pier length	(سانتی‌متر) Fou. length				
		Z (cm)	L (cm)	B (cm)	Lf (cm)	Bf (cm)				
1	Uniform	P-1	-	4.6	8.6	-	-	-	-	
2	Uniform	P-2	-	5.6	10.6	-	-	-	-	
3	Uniform	P-3	-	6	12	-	-	-	-	
4	Complex	FP21	0	5.6	10.6	12.6	24.6	0.00	0.44	0.43
5	Complex	FP22	1	5.6	10.6	12.6	24.6	0.18	0.44	0.43
6	Complex	FP23	2	5.6	10.6	12.6	24.6	0.36	0.44	0.43
7	Complex	FP24	3	5.6	10.6	12.6	24.6	0.54	0.44	0.43
8	Complex	FP31	0	6	12	12.6	24.6	0.00	0.48	0.49
9	Complex	FP32	1	6	12	12.6	24.6	0.17	0.48	0.49
10	Complex	FP33	2	6	12	12.6	24.6	0.33	0.48	0.49
11	Complex	FP34	3	6	12	12.6	24.6	0.50	0.48	0.49
12	Complex	FP41	0	4.6	8.6	9.6	18.6	0.00	0.48	0.46
13	Complex	FP42	1	4.6	8.6	9.6	18.6	0.22	0.48	0.46
14	Complex	FP43	2	4.6	8.6	9.6	18.6	0.43	0.48	0.46
15	Complex	FP44	3	4.6	8.6	9.6	18.6	0.65	0.48	0.46
16	Complex	FP51	0	5.6	10.6	9.6	18.6	0.00	0.58	0.57
17	Complex	FP52	1	5.6	10.6	9.6	18.6	0.18	0.58	0.57
18	Complex	FP53	2	5.6	10.6	9.6	18.6	0.36	0.58	0.57
19	Complex	FP54	3	5.6	10.6	9.6	18.6	0.54	0.58	0.57
20	Complex	FP61	0	6	12	9.6	18.6	0.00	0.63	0.65
21	Complex	FP62	1	6	12	9.6	18.6	0.17	0.63	0.65
22	Complex	FP63	2	6	12	9.6	18.6	0.33	0.63	0.65
23	Complex	FP64	3	6	12	9.6	18.6	0.5	0.63	0.65
24	Complex	FP71	0	4.6	8.6	12.6	24.6	0.00	0.37	0.35
25	Complex	FP72	1	4.6	8.6	12.6	24.6	0.22	0.37	0.35
26	Complex	FP73	2	4.6	8.6	12.6	24.6	0.43	0.37	0.35
27	Complex	FP74	3	4.6	8.6	12.6	24.6	0.65	0.37	0.35



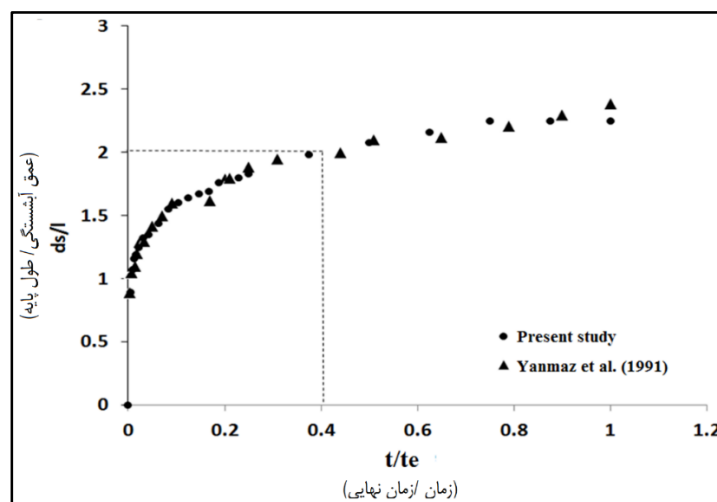
## نتایج و بحث

در این بخش نتایج مطالعه حاضر در دو بخش آبشستگی در اطراف پایه‌های یکنواخت و آبشستگی در اطراف پایه‌های مرکب ارائه خواهد گردید.

### آبشستگی در اطراف پایه‌های یکنواخت

جهت بررسی صحت نتایج بدست آمده در آزمایشگاه، در ابتدا نتایج حاصل از آزمایشات آبشستگی پایه‌های یکنواخت با نتایج محققان دیگر بررسی شده است. در شکل ۴ مقایسه نتایج حاصل از این تحقیق برای پایه‌های یکنواخت به عرض  $L=5.6$  cm (جدول ۱ پایه P-2) با نتایج حاصل از تحقیقات (Yanmaz, 1991) مقایسه گردیده است. تحقیقات (Yanmaz, 1991) برای پایه‌های یکنواخت مستطیلی به قطر ۵,۷ سانتی‌متر، اندازه رسوب برابر با ۰.۸۴ میلی‌متر و دبی ۳۰ lit/s انجام شده است. (Yanmaz, 1991) آزمایش‌های خود را در شرایط آب زلال با عمق تقریبی جریان برابر با ۱۴ cm انجام

داد، همچنین سرعت جریان نزدیک به آستانه حرکت رسوبات در نظر گرفته شد. مدت زمان کل این آزمایش‌ها حدود ۳۰۰ دقیقه (۵ ساعت) بوده است. در این شکل محور افق زمان آبشستگی می‌باشد (t) که بر اساس زمان نهایی آبشستگی (te) بی بعد شده است. همان گونه که مشاهده می‌شود نتایج این تحقیق به نتایج تانماز نزدیک بوده که نشان دهنده معتبر بودن آزمایش‌ها می‌باشد. همانگونه که در این شکل نشان داده شده است پس از گذشت مدت زمان ۰.۴٪ از کل آزمایش (t/te=0.4) عمق آبشستگی نسبی برابر با  $ds/L=2.0$  عمق آبشستگی و  $L=$  عرض پایه) می‌باشد. با توجه به اینکه مقدار آبشستگی نهایی در اطراف این پایه برابر با  $ds/L=2.25$  می‌باشد بنابراین حدود ۸۹٪ آبشستگی نهایی در این مدت رخ داده است. لازم به توضیح است که این نتیجه با تحقیقات انجام شده توسط (Mohammadpour et al., 2013) مطابقت دارد.



شکل ۴- تغییرات عمق آبشستگی در پایه یکنواخت

Fig. 4- Variation of local scour around uniform pier

تنش برشی کاهش یافته و در نتیجه سرعت آبشستگی نیز کاهش خواهد یافت. بنابراین تغییرات عمق آبشستگی در اطراف پایه‌های یکنواخت بصورت

در ابتدای آزمایش‌ها، بعلت زیاد بودن مقدار تنش برشی در جلو پایه سرعت آبشستگی بالا می‌باشد، اما با گذشت زمان و افزایش عمق آبشستگی، میزان

لگاریتمی می‌باشد. در همه آزمایش‌ها، آبشستگی از جلوی پایه پل شروع شده و به طرفین کشیده می‌شود، بطوریکه پس از مدت زمان کوتاهی آبشستگی به پشت پایه پل می‌رسد. مقایسه نتایج در جدول ۲ نشان می‌دهد که ابعاد پایه‌های یکنواخت تاثیر بسزایی بر عمق آبشستگی داشته و با افزایش ابعاد پایه عمق آبشستگی افزایش می‌یابد به گونه‌ای که آبشستگی در اطراف پایه P-1، P-2 و P-3 با ابعاد ۴٫۶، ۵٫۶ و ۶ سانتی‌متر به ترتیب برابر با ۱۱٫۶۸، ۱۲٫۶۰ و ۱۴٫۱۰ سانتی‌متر می‌باشد. لازم به توضیح است که آبشستگی نسبی (ds/L) برای تمام پایه‌های یکنواخت تقریباً یکسان و بین ۲٫۲۵ الی ۲٫۵۴ می‌باشد.

جدول ۲- نتایج آبشستگی در اطراف پایه‌های مرکب و پایه یکنواخت

Table 2- Local scour at uniform and complex piers

Case	Exp.	طول پایه (سانتی‌متر) L(cm)	طول فونداسیون (سانتی‌متر) Lf(cm)	عرض پایه (سانتی‌متر) B(cm)	عرض فونداسیون (سانتی‌متر) Bf(cm)	عمق فونداسیون (سانتی‌متر) Y(cm)	L/Lf	B/Bf	Z/L	ds(cm)	ds/L
1	1-P	4.6	-	8.6	-	-	21	-	-	11.68	2.54
2	2-P	5.6	-	10.6	-	-	21	-	-	12.6	2.25
3	3-P	6	-	12	-	-	21	-	-	14.1	2.35
4	FP21	5.6	12.6	10.6	24.6	0	21	0.43	0.44	11.4	2.04
5	FP22	5.6	12.6	10.6	24.6	1	21	0.43	0.44	9.97	1.78
6	FP23	5.6	12.6	10.6	24.6	2	21	0.43	0.44	9.46	1.69
7	FP24	5.6	12.6	10.6	24.6	3	21	0.43	0.44	7.93	1.42
8	FP31	6	12.6	12	24.6	0	21	0.49	0.48	13.56	2.26
9	FP32	6	12.6	12	24.6	1	21	0.49	0.48	11.7	1.95
10	FP33	6	12.6	12	24.6	2	21	0.49	0.48	11.52	1.92
11	FP34	6	12.6	12	24.6	3	21	0.49	0.48	11.28	1.88
12	FP41	4.6	9.6	8.6	18.6	0	21	0.46	0.48	7.27	1.58
13	FP42	4.6	9.6	8.6	18.6	1	21	0.46	0.48	6.9	1.5
14	FP43	4.6	9.6	8.6	18.6	2	21	0.46	0.48	6.16	1.34
15	FP44	4.6	9.6	8.6	18.6	3	21	0.46	0.48	5.98	1.3
16	FP51	5.6	9.6	10.6	18.6	0	21	0.57	0.58	10.7	1.91
17	FP52	5.6	9.6	10.6	18.6	1	21	0.57	0.58	9.69	1.73
18	FP53	5.6	9.6	10.6	18.6	2	21	0.57	0.58	8.29	1.48
19	FP54	5.6	9.6	10.6	18.6	3	21	0.57	0.58	7.7	1.38
20	FP61	6	9.6	12	18.6	0	21	0.65	0.63	12.5	2.08
21	FP62	6	9.6	12	18.6	1	21	0.65	0.63	11.58	1.93
22	FP63	6	9.6	12	18.6	2	21	0.65	0.63	11.28	1.88
23	FP64	6	9.6	12	18.6	3	21	0.65	0.63	11.16	1.86
24	FP71	4.6	12.6	8.6	24.6	0	21	0.35	0.37	7.5	1.63
25	FP72	4.6	12.6	8.6	24.6	1	21	0.35	0.37	6.76	1.47
26	FP73	4.6	12.6	8.6	24.6	2	21	0.35	0.37	6.39	1.39
27	FP74	4.6	12.6	8.6	24.6	3	21	0.35	0.37	6.16	1.34

فونداسیون در تراز بستر قرار گرفته ( $Z/L=0$ ) و حداکثر عمق آبشستگی نسبی برابر با  $ds/L=2.083$  می‌باشد. همانگونه که در این شکل نشان داده شده است حداکثر عمق آبشستگی در پایه‌های مرکب نیز در جلو پایه رخ می‌دهد. با مقایسه آبشستگی این پایه و همچنین پایه یکنواخت P-3 که دارای ابعاد مشابه می‌باشد ( $L=6\text{cm}$  و  $B=12\text{ cm}$ ) می‌توان نتیجه گرفت که حضور فونداسیون در تراز بستر (و یا زیراین تراز) موجب کاهش آبشستگی می‌گردد.

### آبشستگی در اطراف پایه‌های غیر یکنواخت

نتایج آزمایشگاهی آبشستگی در اطراف پایه‌های مرکب در جدول ۲ نشان داده شده است. با توجه به اینکه یکی از اهداف این تحقیق بررسی تراز قرارگیری عمق فونداسیون بر روی آبشستگی می‌باشد، لذا دو ستون آخرین جدول، مقادیر تراز قرارگیری فونداسیون ( $Z$ ) و عمق آبشستگی ( $ds$ ) با استفاده از بعد پایه ( $L$ ) بی بعد و ارائه شده است. در شکل ۵ توپوگرافی حفره آبشستگی برای پایه مرکب FP61 نشان داده شده است. در این پایه مرکب،

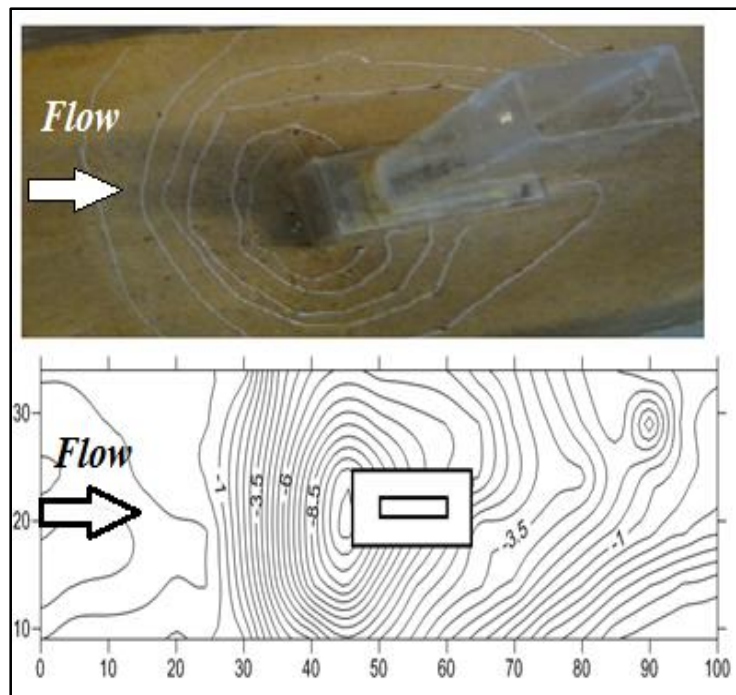


Fig. 5- Topography around non-uniform pier of Fp61

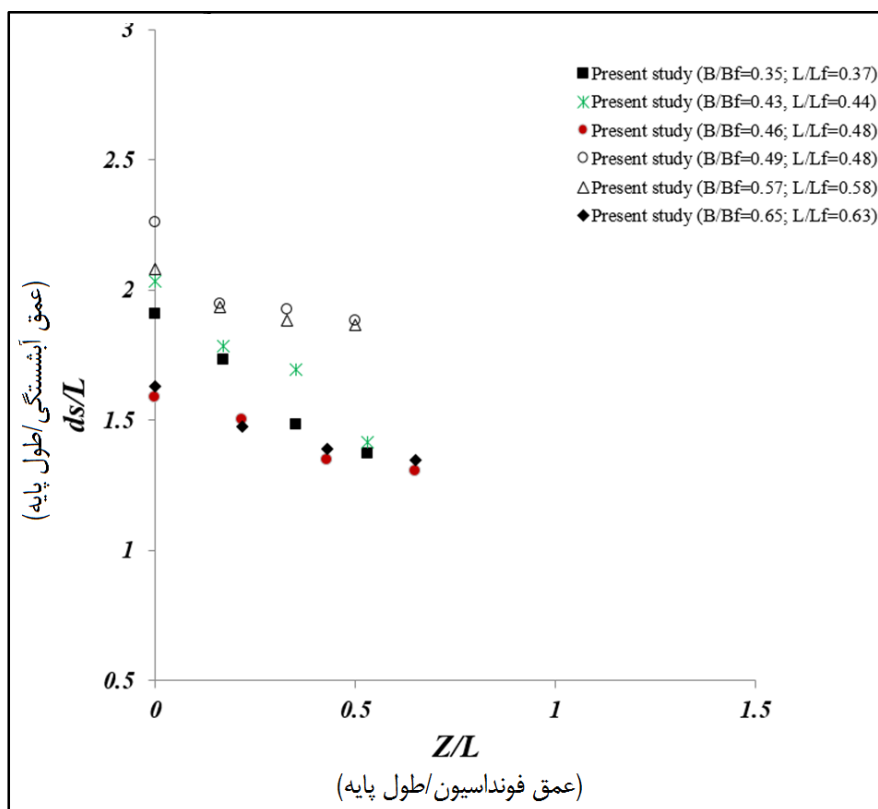
شکل ۵ - توپوگرافی در اطراف پایه‌های غیر یکنواخت Fp61

کاهش می‌یابد. جهت بررسی صحت این مسئله، نتایج حاصل از این تحقیق با نتایج محققان دیگر از جمله عطایی آشتیانی و همکاران (Ataie-Ashtiani *et al.*, 2010)، کالمن (Coleman, 2005)، ملویل و رادکیوی (Melville & Raudkivi, 1996)، پارولا (Parola, 1996)، چابرت وانگلدینگر (Chabert &

در شکل ۶ نتایج حاصل از این تحقیق بر حسب ترازهای مختلف فونداسیون نشان داده شده است. در این شکل محور افقی نسبت تراز قرارگیری فونداسیون ( $Z/L$ ) و محور عمودی نسبت عمق آبشستگی ( $ds/L$ ) می‌باشد. نتایج بدست آمده نشان می‌دهد که با افزایش تراز فونداسیون عمق آبشستگی

دلیل این مسئله را می‌توان به این صورت توضیح داد که با قرار گیری فونداسیون در ترازهای بین ۱ و ۱/۲، حضور فونداسیون موجب کاهش قدرت گردابه‌های نعل اسبی در جلو پایه می‌شود و آبشستگی کاهش می‌یابد. با افزایش تراز فونداسیون ( $Z/L > 1.2$ ) عمق آبشستگی تا روی تراز فونداسیون پایین خواهد آمد و پس از آن در همین تراز باقی می‌ماند. طبیعتاً با افزایش بیشتر تراز فونداسیون و هنگامی که فونداسیون در زیر تراز آبشستگی حداکثر قرار گیرد، مقدار آبشستگی در اطراف پایه‌های مرکب شبیه به پایه‌های یکنواخت خواهد بود.

Engeldinger, 1956) مقایسه شده و در شکل ۷ نشان داده شده است. در کلیه آزمایشها تراز قرار گیری فونداسیون نسبت به سطح اولیه رسوب بستر اندازه‌گیری شده و در تمامی حالات فونداسیون در زیر بستر قرار دارد. روند تغییرات حداکثر عمق آبشستگی در مجموعه داده‌های 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 ۱/۲ رسیده و پس از آن با افزایش تراز فونداسیون میزان آبشستگی افزایش یافته است.



شکل ۶- تغییرات حداکثر عمق آبشستگی بر حسب تراز فونداسیون ( $Z/L$ )

Fig. 6- Maximum local scour in terms of foundation level ( $Z/L$ )

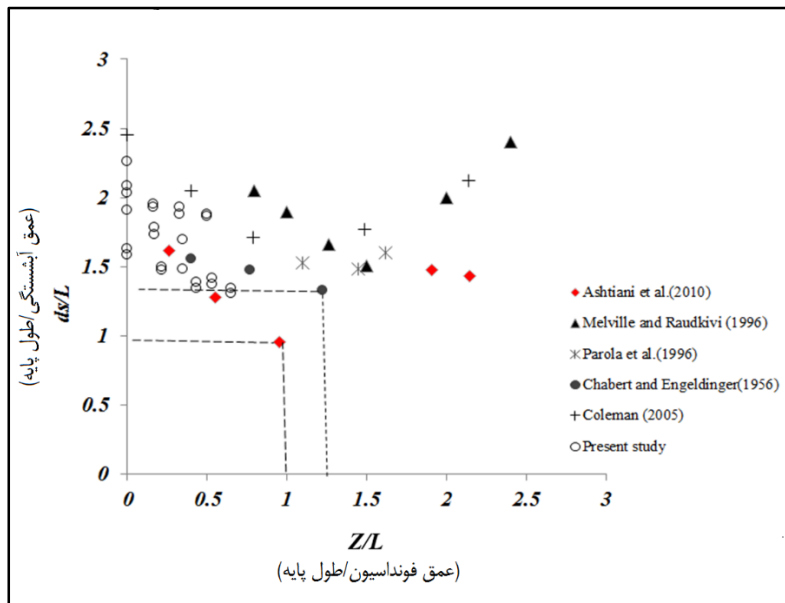


Fig. 7- A comparison between present study and others  
 شکل ۷- مقایسه نتایج تحقیق حاضر با دیگر محققان

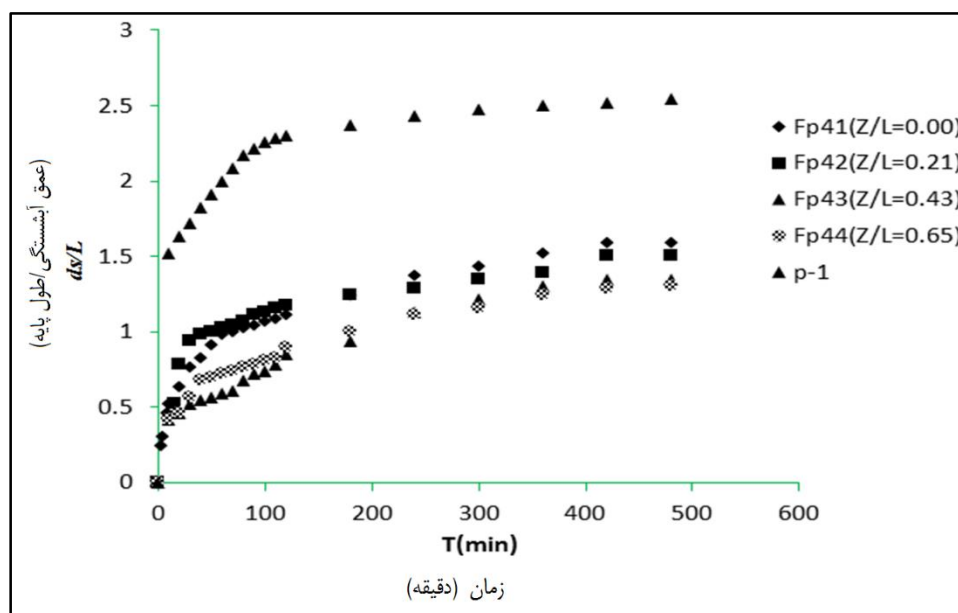
نعل اسبی تشکیل شده در جلو پایه پس از برخورد به فونداسیون قدرت خود را از دست داده و توانایی فرسایش و حمل رسوبات آنها کاهش یافته به گونه‌ای که رسوبات جلو فونداسیون بطور نامحسوسی و بسیار کم جابجا می‌شوند. با گذشت زمان، مقداری از رسوبات جلو فونداسیون به پایین دست حمل می‌شود و از این مرحله به بعد فونداسیون نیز در معرض جریان قرار گرفته که خود باعث تولید یکسری گردابه‌های نعل اسبی دیگر می‌شوند. این گردابه‌های نعل اسبی جدید باعث فرسایش رسوبات در جلو فونداسیون و افزایش عمق آبشستگی می‌شوند. همانگونه که در شکل ۸ نشان داده شده است عمق آبشستگی برای پایه مرکب Fp44 (با تراز فونداسیون برابر با  $Z/L=0.65$  به سرعت به تراز فونداسیون می‌رسد و سپس برای حدود ۴۰ دقیقه در همان تراز باقی می‌ماند و سپس به علت تشکیل گردابه‌های نعل اسبی دیگری در جلو پایه، شروع به افزایش می‌کند. این در حالی است که برای پایه یکنواخت P-1 با ابعاد مشابه، عمق آبشستگی بدون

جهت بررسی تاثیر قرار گیری تراز فونداسیون، در شکل ۸ مقایسه‌ای بین آبشستگی در اطراف پایه یکنواخت P-1 با بعد  $L=4.6$  cm و پایه‌های غیر یکنواخت FP41, FP42, FP43 و FP44 انجام شده است. همانگونه که در جدول ۱ نشان داده شده است، ابعاد پایه و فونداسیون برای تمامی پایه‌های مرکب ثابت و به ترتیب برابر با  $L=4.6$  cm و  $L_f=9.6$  cm می‌باشد. تراز نسبی فونداسیون ( $Z/L$ ) برای FP41, FP42, FP43 و FP44 متغیر و به ترتیب برابر با 0.43, 0.22, 0.00 و 0.65 سانتی‌متر می‌باشد. همانگونه که در این شکل نشان داده شده است تغییرات عمق آبشستگی در پایه‌های غیر یکنواخت نیز همانند پایه‌های یکنواخت بصورت لگاریتمی می‌باشد. در پایه‌های غیر یکنواخت، عمق آبشستگی با زمان افزایش می‌یابد و با رسیدن به تراز فونداسیون، برای مدت زمان خاصی تقریباً ثابت باقی می‌ماند که این زمان ممکن است تا چندین ساعت نیز به طول انجامد (بسته به تراز قرار گیری فونداسیون). دلیل این مسئله آن است که، گردابه‌های

علت حضور فونداسیون موجب می‌شود که زمان نهایی آبشستگی افزایش می‌یابد.

در صورت قرارگیری فونداسیون زیر تراز بستر در رودخانه‌ها، این افزایش زمان فرصتی را فراهم می‌آورد که بتوان فونداسیون پل‌ها را بعد از بروز سیل تعمیر و بازسازی کرد و به این ترتیب می‌توان با طراحی مناسب تراز فونداسیون از تخریب پل‌ها جلوگیری کرد.

هیچ توقفی افزایش یافته و پس از ۴۰ دقیقه چندین برابر پایه مرکب Fp44 شده است. نتایج حاصله نشان می‌دهد که در تمامی حالات عمق آبشستگی در اطراف پایه‌های مرکب کمتر از پایه‌های یکنواخت می‌باشد. از طرفی با افزایش تراز فونداسیون از  $Z/L=0.0$  به  $Z/L=0.65$  عمق آبشستگی کاهش می‌یابد. بطور مثال مقدار  $ds/L$  برای پایه Fp41 برابر با 1.58 و این مقدار برای Fp44 برابر با 1.30 می‌باشد. لازم به توضیح است که زمان تاخیر ذکر شده به



شکل ۸- تغییرات عمق آبشستگی در پایه مرکب برای ترازهای مختلف Z

Fig. 8- Variation of local scour at complex piers in terms of Z

فونداسیون‌های مشابه که عرض آن (Lf) برابر با 9.6 سانتی‌متر می‌باشد استفاده و تراز قرارگیری آنها برابر با  $Z=0$  cm در نظر گرفته شده است. همچنین جهت بررسی و مقایسه بهترین پایه‌ها نتایج حاصله با پایه یکنواخت (P-1) نیز مقایسه شده است.

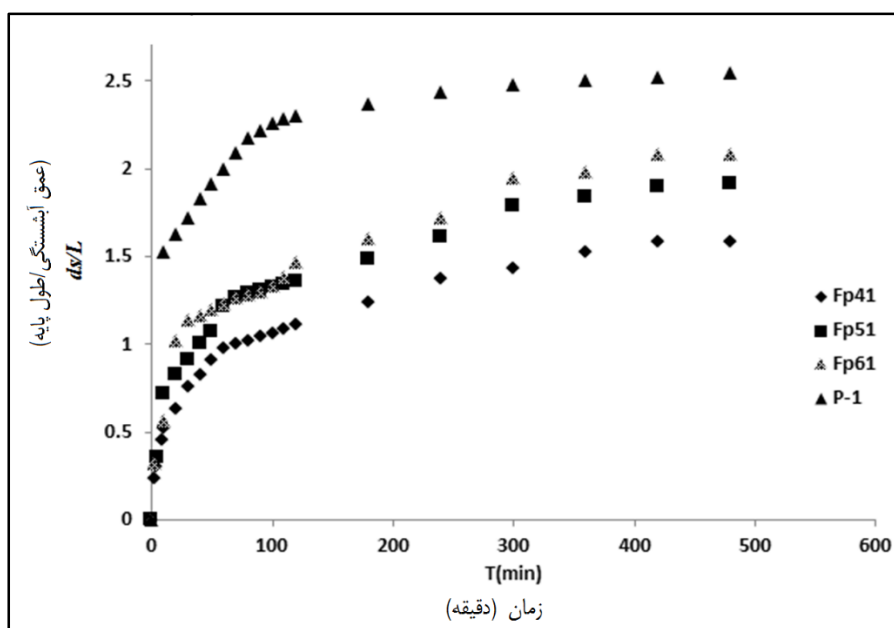
در شروع آبشستگی با توجه به اینکه فونداسیون در تراز بستر ( $Z/L=0$ ) قرار دارد، گردابه‌های نعل اسبی در تراز بستر به فونداسیون برخورد می‌کند و

### بررسی تأثیر ابعاد پایه‌ها بر عمق آبشستگی

جهت بررسی تأثیر ابعاد پایه‌های مرکب بر عمق آبشستگی در شکل ۹ مقایسه‌ای بین آبشستگی در اطراف پایه‌های مرکب با ابعاد مختلف انجام شده است. در این شکل از پایه‌های مرکب Fp51, Fp41 و FP61 استفاده شده که به ترتیب دارای عرضی (L) برابر با 4.6، 5.6 و 6.0 سانتی‌متر می‌باشد. جهت بی تأثیر نمودن ابعاد فونداسیون در تمامی پایه‌های از

آن افزایش قدرت گردابه‌های نعل اسبی در اثر افزایش عرض پایه می‌باشد. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که ابعاد پایه‌های مستطیلی مرکب تاثیر مستقیم بر عمق آبخستگی داشته و با افزایش آن عمق آبخستگی نیز افزایش می‌یابد. نتایج مشابهی توسط Melville & Raudkivi (1996) ارائه شده است. آنها در تحقیق خود بر روی پایه‌های مرکب استوانه‌ای نشان دادند که برای پایه‌ای مرکب با قطر فونداسیون مشابه  $D^*=81$  mm (با افزایش قطر پایه از  $D=30$  mm به  $D=42$  mm میزان آبخستگی نسبی (ds/L) از ۱٫۲ به ۱٫۴ افزایش می‌یابد.

قدرت خود را از دست داده و مقدار عمق آبخستگی در زمان‌های ابتدایی نسبت به پایه یکنواخت (P-1) کمتر می‌باشد. نتایج نشان می‌دهد که در زمان 100 دقیقه پس از شروع آزمایش میزان عمق آبخستگی برای پایه‌های FP41، FP51 و FP61 به ترتیب برابر با 1.00، 1.30 و 1.30 بوده در حالیکه در این زمان میزان آبخستگی نسبی در اطراف پایه یکنواخت برابر با 2.30 می‌باشد. نتایج نشان می‌دهد که در پایه‌های مرکب با افزایش عرض پایه عمق آبخستگی نهایی نیز افزایش می‌یابد به طوری که مقدار ds/L برای پایه‌های FP41، FP51 و FP61 به ترتیب برابر با 1.58، 1.91 و 2.08 می‌باشد که دلیل



شکل ۹- تاثیر ابعاد پایه‌ها بر عمق آبخستگی در پایه‌های غیر یکنواخت  
Fig. 9- Effect of pier dimension on local scour at complex piers

اطراف پایه‌های مرکب FP31، FP61 و همچنین پایه یکنواخت P-3 ارائه شده است. جهت چشم پوشی از تاثیر عرض پایه‌ها در تمامی پایه‌های عرض پایه (L) برابر با 6 سانتی‌متر بوده و همچنین تراز فونداسیون در تمامی پایه‌های مرکب در تراز سطح بستر

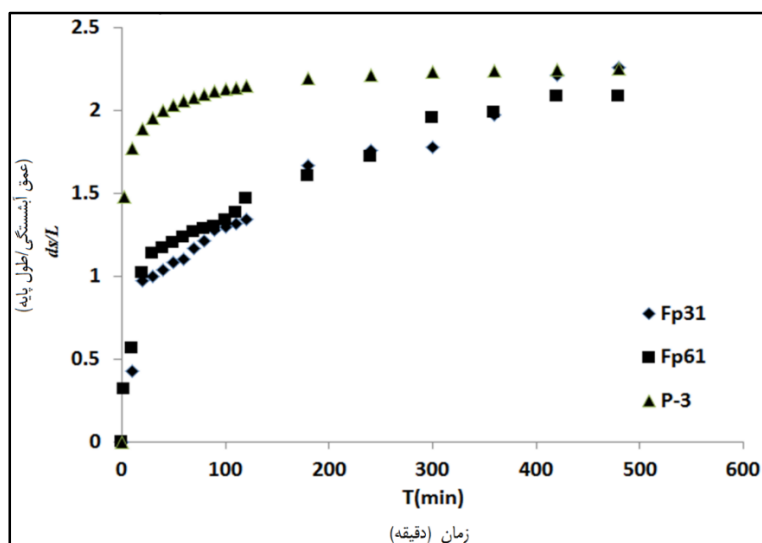
بررسی تأثیر ابعاد فونداسیون بر عمق آبخستگی

شکل ۱۰ تاثیر ابعاد فونداسیون بر روی آبخستگی را در پایه‌هایی با عرض ثابت نشان می‌دهد. در این شکل مقایسه‌ای بین آبخستگی در

می‌یابد. علت‌این مسئله آن است که در ابتدا فونداسیون به عنوان مانعی در برابر آبشستگی عمل کرده و با برخورد گردابه‌های تعل اسبی به آن قدرت‌این گردابه‌ها را کاهش می‌دهد که این مسئله باعث می‌شود در زمانهای ابتدایی عمق آبشستگی در اطراف پایه‌های مرکب کمتر از پایه‌های یکنواخت باشد. اما با گذشت زمان، و شکل‌گیری آبشستگی در اطراف فونداسیون، قسمتی از فونداسیون در معرض جریان قرار گرفته که این امر منجر به ایجاد گردابه‌های جدیدی می‌گردد و هر چه ابعاد فونداسیون بزرگتر باشد میزان آبشستگی نیز افزایش خواهد یافت. لازم به توضیح است که در ترازهای زیر بستراین روند مشاهده نشده و نیاز به تحقیقات بیشتری در این زمینه می‌باشد. با توجه به اینکه در پایه‌های مرکب منحنی آبشستگی در زمانهای انتهایی با افق مماس نشده است، می‌توان نتیجه گرفت که آبشستگی در اطراف پایه‌های مرکب در زمان‌های بالاتر از ۵۰۰ دقیقه در حال افزایش بوده و مقدار آبشستگی همچنان در حال افزایش می‌باشد. 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.

در نظر گرفته شده است. لازم به توضیح است که عرض فونداسیون‌ها ( $L_f$ ) در پایه‌های مرکب Fp61 و Fp31 به ترتیب برابر با 9.6 و 12.6 سانتی‌متر می‌باشد. مقایسه نتایج نشان می‌دهد که این حالت نیز مانند وضعیت قبل در زمان‌های ابتدایی، میزان آبشستگی در اطراف پایه‌های مرکب کمتر از پایه‌های یکنواخت می‌باشد. بطور مثال پس از گذشت 100 دقیقه از شروع آزمایش، مقدار  $ds/L$  برای پایه یکنواخت P-3 در حدود 2.0 بوده، در حالیکه این مقدار برای هر دو پایه‌های مرکب کمتر از 1.50 می‌باشد. بعد از زمان 100 دقیقه، عمق آبشستگی برای پایه‌های مرکب به سرعت شروع به افزایش کرده بطوری که پس از گذشت 500 دقیقه مقدار  $ds/L$  برای Fp61 با فونداسیون کوچک برابر با 2.08 و برای پایه Fp31 با فونداسیون بزرگتر برابر با 2.26 می‌باشد. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که ابعاد فونداسیون یکی از پارامترهای مهم و تاثیر گذار بر روی عمق آبشستگی می‌باشد. بطوریکه هنگامیکه فونداسیون در تراز سطح بستر قرار گیرد ( $Z=0$ )، با افزایش ابعاد فونداسیون عمق آبشستگی نهایی نیز افزایش می‌یابد. نتایج مشابه‌ای توسط Melville & Raudkivi (1996) برای پایه‌های غیر یکنواخت استوانه‌ای ارائه شده است (جدول ۳). عبارت دیگر در پایه‌های استوانه‌ای نیز هنگامیکه  $Z=0$  می‌باشد، با افزایش ابعاد فونداسیون، عمق آبشستگی افزایش





شکل ۱۰- تاثیر ابعاد فونداسیون بر عمق آبشستگی در پایه‌های غیر یکنواخت  
Fig. 10- Effect of foundation dimension on local scour at complex piers

جدول ۳- مقایسه نتایج آبشستگی تحقیقات Melville & Raudkivi (1996) و تحقیق حاضر

Table 2- Comparison between present study and Melville and Raudkivi (1996)

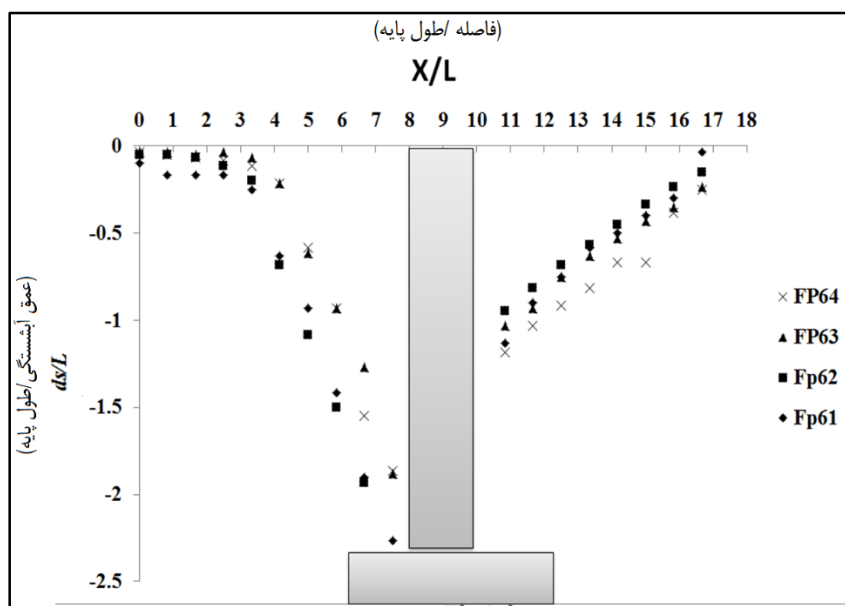
Name	D (mm)	D* (mm)	Z (mm)	D/D*	ds (mm)	ds/D
F (Melville & Raudkivi ,1996)	45	55	0	0.82	102	2.27
B (Melville & Raudkivi ,1996)	45	63	0	0.71	106	2.36
C (Melville & Raudkivi ,1996)	45	81	0	0.55	111	2.47
FP-61 (Present study)	60	96	0	0.63	125	2.08
FP-31 (Present study)	60	126	0	0.48	135.6	2.26

D = قطر پایه و D\* = قطر فونداسیون

بطور کلی می‌توان گفت که شیب حفره آبشستگی در پشت پایه برای تمامی پایه‌های تقریباً مشابه بوده و برابر با زاویه قرارگیری رسوبات می‌باشد. در این شکل نسبت عمق آبشستگی ( $ds/L$ ) برای پایه مرکب FP61 که در تراز  $Z/L=0.0$  برابر با 2.08 بوده در حالیکه با افزایش قرارگیری فونداسیون به  $Z/L=0.5$  (FP64) عمق آبشستگی به 1.86 کاهش می‌یابد. این مقدار کاهش بستگی به تراز قرارگیری فونداسیون خواهد تراز داشت. نکته قابل توجه آن است که شیب حفره آبشستگی در پشت پایه نیز برای تمامی پایه‌ها یکسان می‌باشد.

### بررسی توپوگرافی در اطراف پایه‌های غیر یکنواخت

در شکل ۱۱ پروفیل طولی بستر کانال از محور گذرنده در مرکز تقارن پایه‌های مرکب نشان داده شده است. 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 نسبی فونداسیون ( $Z/L$ ) برای پایه‌های FP61، FP62، FP63، FP64 و برابر با 0.0، 0.16، 0.33 و 0.5 می‌باشد. در این شکل محورهای افقی (فاصله) و قائم (عمق آبشستگی) توسط عرض پایه ( $L$ ) بی بعد شده‌اند.



شکل ۱۱- آبشستگی گودال در اطراف پایه‌های غیر یکنواخت

Fig.11- Local scour at complex piers

### نتیجه‌گیری

به علت مسائل ژئوتکنیکی و اقتصادی اغلب پایه‌ها بر روی فونداسیون ساخته شده و پیش بینی دقیق آبشستگی در اطراف اینگونه پایه‌ها (پایه‌های مرکب) منجر به طراحی اقتصادی پلها می‌گردد. در این تحقیق، آبشستگی موضعی در اطراف پایه‌های یکنواخت و مرکب به صورت آزمایشگاهی تحت شرایط آب زلال و با رسوبات یکنواخت با قطر متوسط 0.7 میلی‌متر انجام شد. در تمامی آزمایش‌ها، فونداسیون در زیر بستر و در ترازهای متفاوت در نظر گرفته شده است. در پایه‌های غیر یکنواخت، عمق آبشستگی تا بالای فونداسیون به سرعت افزایش می‌یابد و پس از رسیدن به فونداسیون، ابعاد فونداسیون مانع از رشد آبشستگی به مدت زمان معینی (زمان تاخیر) می‌شوند. مدت زمان تأخیر به ابعاد پایه‌ها، اندازه فونداسیون و تراز

قرارگیری فونداسیون بستگی دارد. مقایسه نتایج حاصل از این تحقیق و محققان پیشین نشان داد که حداقل عمق آبشستگی زمانی حاصل می‌گردد 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 آبشستگی می‌گردد. این مطالعه نشان می‌دهد که طراحی دقیق ابعاد و تراز فونداسیون باعث کاهش عمق آبشستگی و افزایش مدت زمان آبشستگی می‌شود. در صورت قرارگیری فونداسیون در زیر تراز مناسبی از بستر در رودخانه‌ها، این افزایش زمان فرصتی را فراهم می‌آورد که بتوان آبشستگی در اطراف فونداسیون پل‌ها را بعد از بروز سیل تعمیر و بازسازی کرد و به این ترتیب می‌توان با طراحی مناسب تراز فونداسیون از تخریب پل‌ها جلوگیری کرد.

## مراجع

- Arneson, L. A., Zevenbergen, L. W., Lagasse, P. F., and Clopper, P. E. (2012). Evaluating scour at bridges (HEC-18). *Technical Rep. No. HIF-12-003*, Federal Highway Administration, Washington, DC.
- Ataie-Ashtiani, B. and Aslani-Kordkandi, A. (2013). Flow field around single and tandem piers. *Flow, Turbulence and Combustion*, 90(3), 471-4.
- Ataie-Ashtiani, B., Baratian-Ghorghi, Z. and Beheshti, A. A. (2010). Experimental Investigation of Clear-Water Local Scour of Compound Piers. *Journal of Hydraulic Engineering-Asce*, 136(6), 343-351.
- Cardoso, A. H. & Fael, C. M. S. (2010). *Time to equilibrium scour at vertical-wall bridge abutments. Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Water Management*, 163, 509-513.
- Chabert, J. and Engeldinger, P. (1956). Etude des affouillements autour des piles de ponts. Serie A, Laboratoire National d'Hydraulique. *Chatou, France* (in French).
- Coleman, S. E. (2005). Clearwater local scour at complex piers. *Journal of Hydraulic Engineering-Asce*, 131(4), 330-334.
- Dey S, Raikar R. (2007) Characteristics of horseshoe vortex in developing scour holes at piers. *J Hydraul Eng*. 133(4), 399-413.
- Ettema, R., Constantinescu, G. and Melville, B. W. (2011). Evaluation of Bridge Scour Research: Pier Scour Processes and Predictions. NCHRP 24-27(01), *Transportation Research Board, Washington, DC*.
- Ferraro, D., Tafarojnoruz, A., Gaudio, R., and Cardoso, A. H. (2013). Effects of pile cap thickness on the maximum scour depth at a complex pier. *J. Hydraul. Eng. (ASCE) HY.1943-7900.0000704*, 482 – 491.
- Ghani, A. A. and Mohammadpour, R. (2015). Temporal variation of clear-water scour at compound Abutments. *Ain Shams Engineering Journal*, <http://dx.doi.org/10.1016/j.asej.2015.07.005>
- Graf, W. H. and Istiarto, I. (2002). Flow pattern in the scour hole around a cylinder. *Journal of Hydraulic Research*, 40(1), 13-20.
- Jones, J. S., Kilgore, R. T. and Mistichelli, P. (1992). Effects of Footing Location on Bridge Pier Scour. *Journal of Hydraulic Engineering*, 118(2), 280-289.
- Lança, R., Fael, C., Maia, R., Pêgo, J., and Cardoso, A. (2013). Clear-water scour at comparatively large cylindrical piers. *J. Hydraul. Eng., 10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.0000788*, 1117 –1125.
- Lu, J.-Y., Shi, Z.-Z., Hong, J.-H., ee,-J., and Raikar, V. K. (2011). Temporal variation of scour depth at nonuniform cylindrical piers. *J. Hydraul. Eng., 10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.0000272*, 45-56.
- Melville, B. W. (1992). Local Scour at Bridge Abutments. *Journal of Hydraulic Engineering-Asce*, 118(4), 615-631.
- Melville, B. W. and Raudkivi, A. J. (1996). Effects of foundation geometry on bridge pier scour. *Journal of Hydraulic Engineering-Asce*, 122(4), 203-209.
- Melville, B. W. & Coleman, S. E. (2000). *Bridge scour*, Water Resources Publications, Highlands Ranch, Colo.
- Melville, B. W. & Sutherland, A. J. (1988). Design method for local scour at bridge piers. *Journal of Hydraulic Engineering*, 114, 1210-1226.

- Mohammadpour, R., Ghani, A. A. & Azamathullah, H. M. 2011. *Estimating time to equilibrium scour at long abutment by using genetic programming*. 3rd International Conference on Managing Rivers in the 21st Century, Rivers 2011. Penang, Malaysia.
- Mohammadpour, R., Ghani, A. A. and Azamathulla, H. M. (2013). Estimation of dimension and time variation of local scour at short abutment. *International Journal of River Basin Management*, 11(1), 121-135.
- Mohammadpour, r., ab. Ghani, a. & azamathulla, h. M. (2013). Prediction of equilibrium scour time around long abutments. Proceedings of the Institution of Civil Engineers: *Water Management*, 166, 394-401.
- Mohammadpour, R., Ghani, A. A., Zakaria, N. A. and Ali, T. a. M. (2015b). Predicting scour at river bridge abutments over time. Proceedings of the Institution of Civil Engineers - *Water Management*, 0(0), 1-16.
- Mohammadpour, R., Ghani, A. and Zakaria, N. (2014). *Time variation of scour depth around complex abutment*. Scour and Erosion: Proceedings of the 7th International Conference on Scour and Erosion, Perth, Australia, 2-4 December 2014, 2014. CRC Press, 455-460.
- Mohammadpour, R., Ghani, A., Vakili, M. and Sabzevari, T. (2015a). Prediction of temporal scour hazard at bridge abutment. *Natural Hazards*, 10.1007/s11069-015-2044-8, 1-21.
- Mohammadpour, R., Ghani, A. A., Zakaria, N. A. & Thamer, A. M. A. (2017). Predicting scour at river bridge abutments over time. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Water Management*, 170, 15-30.
- Mohammadpour, R., Ghani, A. A., Sabzevari, T. & Fared murshed, M. (2019). Local scour around complex abutments. *ISH Journal of Hydraulic Engineering*, 1-9.
- Oliveto, G. & Hager, W. H. (2002). Temporal evolution of clear-water pier and abutment scour. *Journal of Hydraulic Engineering-Asce*, 128, 811-820.
- Moreno, M., Maia, R. and Couto, L. (2016). Prediction of Equilibrium Local Scour Depth at Complex Bridge Piers. *Journal of Hydraulic Engineering*, 142(11).
- Parola, A. C., Mahavadi, S. K., Brown, B. M. and Elkhoury, A. 1996. Effects of rectangular foundation geometry on local pier scour. *Journal of Hydraulic Engineering-Asce*, 122(1), 35-40.
- Richardson, E. V., Davis, S. R. (2001). *Evaluating scour at bridges*. Hydraulic Engineering Circular No. 18 (HEC-18), 4th Ed., Rep. No.FHWA NHI 01-001. Federal Highway Administration, Washington,D.C.
- Sheppard, D. M. and Renna, R. (2005). *Florida bridge scour manual*. Florida DOT, Tallahassee,Fla.
- Yanmaz, A. M. and Altinbilek, H. D. (1991). Study of Time-Dependent Local Scour around Bridge Piers. *Journal of Hydraulic Engineering-Asce*, 117(10), 1247-1268.

## Temporal Variation of Local Scour at Complex Rectangular Pier

R. Mohammadpour\*, A. Taghi shahbazi, T. sabzvvari and M. Karami moghadam

\* Corresponding Author: Assistant professor Department of Civil Engineering, Islamic Azad University, Estahban Branch, Fars, Iran. Email reza564@gmail.com  
Received: 21 August 2020, Accepted: 11 January 2021

### Introduction

Due to geotechnical and financial reasons, actual piers are built on foundation, while there is limited number of study available about effect of the foundation on the local scour. In the vicinity of the pier, the local scour is caused by the development of high shear stress due to three-dimensional separation of the boundary layer. However, the underestimation of scour depth would result in shallow foundation and providing a chance to expose the foundation to the flow. It is definitely dangerous for bridge safety. Previously, extensive research has been carried out about local scour around (Jones *et al.* 1992; Melville *et al.* 1992; Mohammadpour *et al.* 2011 and 2013; Lança *et al.* 2013). However, only some studies are available in literature to predict the maximum scour depth at complex piers Mohammadpour *et al.* 2019).

In this study, local scour have been experimentally investigated around uniform and non-uniform rectangular complex piers under clear water conditions and the top of foundation was located below the initial bed. The local scour is investigated with variation of foundation level ( $Z$ ), pier dimension and foundation dimension.

### Materials and Methods

A flume with rectangular cross section and the dimension of 12.0 m long, 0.4 m wide, and 0.6 m deep was chosen for all experiments. Three uniform and nonuniform rectangular piers were chosen for tests (Table 1). Uniform sediment with  $d_{50} = 0.70$  mm maintain the clear water conditions, the flow velocity was set close to the critical velocity of sediment ( $U/U_c$  between 0.94 and 0.99).

### Results and Discussion

The trend of local scour at non-uniform pier is time dependent. To investigate the effects of foundation level ( $Z$ ) on temporal variation of local scour around pier, four levels of 0.0 , 1.0 , 2.0.3.0 cm were chosen for  $Z$ . The scour depth develops to top of foundation quickly, and then the foundation postpones the scour development for a certain time (lag –time). It was observed that during of lag-time, the scour hole is slightly extended in parallel to and in front of the pier. In addition, development of local scour in parallel to pier (in the flow direction) is faster than those in front of abutment (upstream). The scour hole in the foundation nose is enlarged in the area, and it is somewhat deeper than other parts at the upstream side. The deepest depth at the upstream of non-uniform pier gradually develops around the sides of the foundation to create a shallow groove parallel to the foundation. Subsequently, the depth of the scour ahead of the foundation is more increased due to the formation of a vortex at upstream of the foundation. Although, the foundation postpones development of scour depth firstly, but if the foundation exposes to the scour hole, the vortex in front of exposed foundation increases the scour depth. The lag-time (latency) directly depends on pier width ( $L$ ), foundation width ( $L_f$ ) and level of foundation under the sediment bed ( $Z$ ). The rate of sediment transport decreases with increasing the scour hole dimension, and it will be stopped approximately close to the equilibrium scour depth. The reduction of scour depth due to lag –time is very useful to prevent the failure of bridge especially in the flood events that bridges are the main structures in transportation.

Generally, the peak of flood may not be long-lasting to develop equilibrium scour depth and the flood may be stopped within lag-time. Therefore, the lag-time postpones the maximum scour depth and provides an opportunity to repair the bridge foundation after the flood events.

Generally, For  $0 < Z/L < 1.2$  the local scour decreases with increasing the foundation level ( $Z$ ) and reaches to minimum value at a level between  $L$  and  $1.2L$ . For  $Z/L > 1.2$ , the local scour increasing with increasing foundation level ( $Z$ ) and for  $Z \geq 2.4L$  the local scour at compound pier is similar to uniform pier.

### **Conclusions**

In this study, temporal variation of local scour at non-uniform piers is investigated experimentally under the clear water conditions. The non-uniform piers were included a rectangular pier founded on a larger rectangular pier. In all experiments, the scour depth is developed to top of foundation quickly, and then the foundation postpones the scour development for a certain time (lag-time). Duration of lag-time is depended on the dimension of pier, foundation size and the foundation level. A comparison between the uniform and non-uniform piers indicated that the trend of scour depth at non-uniform and uniform piers is similar to each other. This study highlights that a proper design of foundation level decreases the scour depth and increases the duration of scouring. Furthermore, the lag-time provides an opportunity to repair the bridge foundation after the flood events.

**Keywords:** Local scour, Scour mechanism, Non-uniform pier, Foundation dimension, Foundation level.