

مطالعه آزمایشگاهی تأثیر ابعاد اجسام شناور بر مقدار آبشستگی اطراف گروه پایه کج تحت شرایط مختلف هیدرولیکی و رقوم کارگذاری فونداسیون

زهرا پاسخی درگاه¹، مهدی اسمعیلی ورکی^{2*}، بهنام شفیعی ثابت³

1- دانشجوی کارشناسی ارشد سازه‌های آبی، گروه مهندسی آب، مجتمع دانشگاه گیلان

2- استادیار سازه‌های آبی، گروه مهندسی آب، مجتمع دانشگاه گیلان

3- استادیار سازه‌های هیدرولیکی، گروه مهندسی آب، مجتمع دانشگاه گیلان

* esmaeili.varaki@yahoo.com

چکیده - در نظر نگرفتن نقش عوامل هیدرولیکی به‌ویژه حداکثر عمق آبشستگی در طراحی پل‌ها، یکی از مهم‌ترین عوامل تخریب این نوع از سازه‌ها می‌باشد. در شرایط سیلابی، تجمع شاخه و برگ و نیز تنه درختان در جلوی پایه‌های پل، با مسدود نمودن کامل یا بخشی از دهانه پل، باعث تغییر الگوی جریان و تسریع روند آبشستگی در اطراف آن شده و در نهایت عمق آبشستگی را افزایش خواهد داد. در تحقیق حاضر تأثیر ابعاد اجسام شناور بر حداکثر عمق آبشستگی در اطراف گروه پایه کج مورد بررسی قرار گرفت. پایه پل مورد بررسی متشکل از دو پایه مستطیلی شکل با ابعاد $2/5$ در $3/5$ سانتی‌متر که با زاویه 28 درجه بر روی فونداسیونی با ابعاد 10 در 16 سانتی‌متر نصب گردید، می‌باشد. آزمایش‌ها برای عمق‌های نسبی (نسبت عمق جریان به عرض پایه) $3/7$ ، $5/2$ و $6/6$ ، جسم شناور با عرض نسبی (نسبت عرض جسم شناور به عرض پایه) 6 ، طول‌های نسبی (نسبت طول در راستای جریان جسم شناور به عرض پایه) 2 و 3 و ضخامت‌های نسبی (نسبت ضخامت جسم شناور به عرض پایه) $0/5$ و 1 در شرایط آب زلال انجام پذیرفت. مقایسه نتایج نشان داد افزایش عمق جریان تأثیر محسوسی بر حداکثر عمق آبشستگی ندارد. تجزیه و تحلیل نتایج حاکی از آن است که افزایش ضخامت جسم شناور منجر به افزایش عمق آبشستگی (بطور متوسط به مقدار 29 درصد) نسبت به حالت بدون جسم شناور می‌شود. ولی با افزایش طول نسبی جسم شناور از میزان تأثیر آن کاسته شده و به 24 درصد نسبت به حالت بدون جسم شناور می‌رسد. تجزیه و تحلیل نتایج نشان داد که به‌طور کلی حضور اجسام شناور در دامنه هندسه‌های مورد بررسی بطور متوسط باعث افزایش حداکثر عمق آبشستگی به میزان 29 درصد می‌گردد.

کلید واژگان: آبشستگی، اجسام شناور، رقوم کارگذاری فونداسیون، عمق جریان، گروه پایه کج.

می‌پیوندد، شامل سه بخش آبشستگی عمومی (تغییرات دراز مدت بالآمدگی و پایین‌افتادگی بستر رودخانه به

1- مقدمه
مجموعه آبشستگی که در آبراهه‌های طبیعی به‌وقوع

خصوص آبشستگی موضعی در گروه شمع استوانه‌ای در شرایط آب زلال نشان داد که با افزایش فاصله بین پایه‌ها تأثیر عامل تقویت‌کننده کاهش یافته و در شرایطی که فاصله بین پایه‌ها بیش از $2/5$ برابر قطر پایه باشد، تأثیر گرداب نعل‌اسبی به هم فشرده شده ناچیز می‌شود (Hannah, 1978).

ویتال و همکاران (1994) با در نظر گرفتن سه پایه با قطر کوچک‌تر به جای یک تک پایه استوانه‌ای به این نتیجه رسیدند که در بهترین حالت، استقرار پایه‌ها به صورت گروهی منجر به کاهش عمق آبشستگی تا 40 درصد می‌گردد. همچنین آن‌ها ضمن بررسی تأثیر زاویه برخورد جریان نزدیک‌شونده بر حداکثر عمق آبشستگی، دریافتند که حداقل عمق آبشستگی در زاویه 30 درجه (زاویه برخورد راستای جریان با محور پایه) اتفاق افتاده و تغییرات عمق آبشستگی در زاویه‌های مختلف در حدود 6 درصد می‌باشد (Vittal et. al, 1994).

بهشتی و عطایی آشتیانی (1383)، ضمن بررسی اثر فاصله بین گروه پایه بر عمق آبشستگی در محدوده 1 تا 4 برابر قطر پایه‌ها، معادله‌ای را برای تخمین حداکثر عمق آبشستگی پیشنهاد نمودند. بررسی نتایج حاکی از آن بود که برای فواصل کم بین پایه‌ها، حداکثر عمق آبشستگی حدود دو برابر مقدار متناظر برای پایه منفرد می‌باشد. با افزایش فاصله بین پایه‌ها، عمق آبشستگی کاهش پیدا کرده و برابر با عمق آبشستگی در پایه منفرد می‌گردد.

امروزه با پیشرفت فناوری طراحی و ساخت سازه‌ها، ساخت پل‌ها با اشکال گوناگونی نظیر پل‌ها با گروه پایه کج مشاهده می‌شوند. مقایسه‌های انجام شده در خصوص تأثیر کج‌شدگی پایه بر تغییرات آبشستگی اطراف گروه پایه کج نشان داد که مقدار آبشستگی در گروه پایه کج تا 50 درصد بیش‌تر از حالت تک پایه بوده که این موضوع به دلیل تأثیر توام دو پایه و نیز کج‌شدگی به سمت بالادست می‌باشد. همچنین در شرایطی که تراز کارگذاری فونداسیون در زیر بستر و بالاتر از حداکثر عمق آبشستگی به ازای تک پایه باشد، مقدار آبشستگی کاهش می‌یابد (اسمعیلی و همکاران، 1390).

تحقیقات صورت گرفته در خصوص موقعیت فرارگیری تراز

علت‌های طبیعی یا ناشی از فعالیت‌های انسانی، نظیر برداشت شن و ماسه، آبشستگی ناشی از تنگ‌شدگی مسیر رودخانه و آبشستگی موضعی (در اطراف پل‌ها و تکیه‌گاه‌های آن و نیز پایین‌دست سازه‌های هیدرولیکی) می‌باشد. از این میان، آبشستگی اطراف پایه‌های پل به دلیل نقش مهمی که این نوع از سازه‌ها در چرخه حمل و نقل و ارتباط‌های زمینی دارند، بسیار حائز اهمیت می‌باشد (Lagaass et.al, 2009).

با استقرار پایه پل در مسیر جریان، به تناسب سرعت آن، گردایان فشار رو به پایین پدید می‌آید که باعث ایجاد یک جریان رو به پایین در جلوی پایه شده و پس از تداخل با جریان اصلی گرداب نعل‌اسبی را تشکیل می‌دهد. در نتیجه فعالیت آن‌ها، سرعت موضعی و تنش برشی جریان در مجاورت پایه افزایش یافته و جبهه آبشستگی به تدریج در مقابل و طرفین پایه گسترش می‌یابد. همچنین در اثر جدایی جریان از اطراف پایه، گردابه‌هایی تشکیل می‌شود که محور آن‌ها عمود بر بستر جریان بوده و به آن‌ها گردابه‌های برخاستگی اطلاق می‌گردد. این گردابه‌ها در کناره و پایین‌دست پایه بوجود آمده و به صورت چرخش‌هایی در سطح آب ظاهر می‌گردند. فعالیت این گردابه‌ها مانند گردباد بوده که ذرات بستر را جدا نموده و در معرض جریان قرار می‌دهند. حفر گودال آبشستگی توسط گرداب نعل‌اسبی تا جایی ادامه می‌یابد که عمق گودال، انرژی گردابه‌ها را مستهلک نموده و دیگر قادر به فرسایش ذرات بستر در گودال آبشستگی نباشند. در این مرحله عمق حفره آبشستگی به تعادل رسیده و ثابت می‌ماند (Breusers and Raudkivi, 1991).

در صورت استفاده از گروه پایه‌ها، الگوی‌های متفاوت دیگری در اطراف پایه شکل گرفته که در نتیجه آن مقدار آبشستگی تغییر خواهد نمود. فرآیند آبشستگی در حضور گروه پایه تحت تأثیر عامل تقویت‌کننده در پایه جلویی که باعث افزایش عمق آبشستگی در مجاورت آن شده و عامل حفاظ بودن که منجر به کاهش سرعت مؤثر در اطراف پایه پایین‌دست و در نتیجه کاهش مقدار آبشستگی در محدوده آن می‌گردد، می‌باشد (Breusers and Raudkivi, 1991). تحقیقات هانا (1978)، در

ملویل و دانگل (1992)، تأثیر اشکال مختلف جسم شناور شامل استوانه‌ای، مخروطی و بیضوی را مورد بررسی قرار دادند. نتایج آزمایش‌های آن‌ها نشان داد که بیش‌ترین عمق آب‌شستگی برای جسم شناور با شکل استوانه‌ای رخ می‌دهد. هم‌چنین مقایسه نتایج حاکی از آن بود که در حضور توده اجسام شناور، برای نسبت عمق جریان به قطر پایه کوچک‌تر از 4، عمق آب‌شستگی افزایش یافته و با افزایش این نسبت، مقدار آن دچار سیر نزولی شده و در نهایت تأثیر اجسام شناور ناچیز می‌شود (Melville and Dongol, 1992).

لاکاس و همکاران (2010) در بررسی تأثیر جسم شناور بر حداکثر عمق آب‌شستگی به این نتیجه رسیدند که بسته به میزان انسداد ایجاد شده توسط جسم شناور در جلوی پایه، ابعاد گردابه‌ها، نسبت به حالت بدون جسم شناور، می‌تواند بزرگ‌تر یا کوچک‌تر باشد. بررسی‌ها نشان داد، زمانی که اجسام از بعد طولی با پایه در تماس باشند، شکل مستطیلی جسم شناور بیش‌ترین آب‌شستگی را ایجاد می‌کند (Laggasse et. al, 2010).

پالیارا و کارناسینا (2010 و 2011)، در بررسی تأثیر انباشتگی توده اجسام شناور بر گودال آب‌شستگی و ریخت‌شناسی آن، به این نتیجه رسیدند که انباشتگی اجسام شناور بر عمق گودال آب‌شستگی، طول، عرض و ریخت‌شناسی پشته رسوبی پشت پایه بسیار تأثیرگذار بوده، به طوری که حداکثر طول و عرض گودال آب‌شستگی، به ترتیب به 3 و 4 برابر حالت بدون تجمع اجسام شناور می‌رسد. هم‌چنین آن‌ها ضمن بررسی تأثیر اجسام شناور بر آب‌شستگی در پایه‌های پل، با در نظر گرفتن شکل‌های مستطیلی، مثلثی و استوانه‌ای برای اجسام شناور، آزمایش‌هایی در شرایط مختلف هیدرولیکی انجام داده و روش ساده‌ای را برای پیش‌بینی عمق آب‌شستگی پایه پل در شرایط حضور اجسام شناور پیشنهاد نمودند. بررسی‌ها نشان داد، تأثیر شکل‌های مستطیلی و مثلثی بر تغییرات حداکثر عمق آب‌شستگی ناچیز می‌باشد (Pagliara and Carnacina, 2010, 2011).

مشعشی و همکاران (1394)، در بررسی تأثیر تجمع اجسام شناور چوبی‌شکل بر آب‌شستگی اطراف پایه

فونداسیون بر حداکثر عمق آب‌شستگی حاکی از آن است که با قرارگیری فونداسیون در زیر بستر، حداکثر عمق آب‌شستگی کاهش می‌یابد (Jones et.al, 1992 and Lyn et. al, 2003). تحقیقات صورت گرفته توسط جونز و همکاران (1992) نشان داد که میزان آب‌شستگی برای شرایطی که تراز فونداسیون در فاصله بین سطح بستر تا حداکثر عمق آب‌شستگی به ازای تک‌پایه قرار می‌گیرد، بستگی به مقدار گسترش سطح رویی فونداسیون نسبت به پایه دارد. هم‌چنین برای شرایطی که فونداسیون بالاتر از بستر مستقر شود، مقدار حداکثر عمق آب‌شستگی افزایش چشم‌گیری پیدا می‌کند (Jones et.al, 1992).

پارولا و همکاران (1996) ضمن بررسی تغییرات هندسه و موقعیت قرارگیری فونداسیون بر عمق آب‌شستگی، معادلاتی را برای پیش‌بینی تأثیر قرارگیری تراز فونداسیون بر عمق آب‌شستگی و ارزیابی مدل‌های جایگزین برای فونداسیون ارائه نمودند (Parola et.al, 1996).

یکی از اتفاقات رایج در زمان وقوع سیل در رودخانه‌ها، تجمع اجسام شناور، نظیر بقایای درختان و گیاهان در مجاورت پایه پل می‌باشد. تجمع اجسام شناور می‌تواند با ایجاد انسداد، تنگ‌شدگی و یا تغییر مسیر جریان در دهانه‌های پل، باعث خرابی و یا آب‌شستگی بیش از حد در اطراف فونداسیون پایه پل شود (Laggasse et.al, 2010). انقباض جریان حاصل از اجسام شناور و توده شاخ و برگ می‌تواند احتمال تخریب پایه را با تسریع فرآیند آب‌شستگی و افزایش عمق گودال آب‌شستگی افزایش دهد (Pagliara and Carnacina, 2011). هندسه و ابعاد جسم شناور بسیار متنوع بوده و از پشته کوچک در اطراف پایه‌های پل تا انسداد کامل دهانه پل در تغییر می‌باشد. تحقیقات انجام شده نشان داده است که هندسه اجسام شناور تابعی از خصوصیات فیزیکی آن، ویژگی‌های جریان و نیز هندسه پل و مجرای جریان است (Laggasse et. al, 2010).

مطالعات صورت‌گرفته بر روی تأثیر اجسام شناور بر آب‌شستگی اطراف پایه‌های پل نشان داد که ابعاد گودال آب‌شستگی نسبت به حالت پایه بدون جسم شناور، بزرگ‌تر و عمیق‌تر می‌باشد (Loursen and Toch, 1956).

که از شاخ و برگ به عنوان جسم شناور استفاده می‌گردد، Z تراز استقرار فونداسیون، D_{50} قطری که 50 درصد ذرات بستر رسوبی از آن کوچکتر است، σ_g انحراف معیار مصالح رسوبی بستر، ρ_s چگالی رسوبات بستر، ρ چگالی آب، μ لزوجت دینامیک، g شتاب ثقل، α زاویه انحراف پایه‌ها در صفحه موازی جریان، β زاویه انحراف پایه‌ها در صفحه عمود بر جریان، t زمان از شروع آبشستگی، t_e زمان تعادل آبشستگی، $\Delta A = [(W-D)T]/(b.y)$ ضریب انسداد ناشی از تجمع جسم شناور، $A_b = Dy + \Delta A.b$ سطح اشغال شده توسط پایه و جسم شناور و S_{hd} پارامتر شکل جسم شناور می‌باشد. با به‌کارگیری تئوری باکینگهام در تحلیل ابعادی، رابطه (1) را می‌توان به صورت رابطه بی بعد (2) نوشت:

$$\frac{d_s}{D} = f_2\left(\frac{y}{D}, \frac{U_c}{U}, \frac{b}{D_*}, \frac{D}{D_*}, \frac{l_*}{D_*}, \frac{l}{D}, \frac{L}{D}, \frac{W}{D}, \frac{T}{D}, \frac{Z}{D}, \frac{D_{50}}{D}, \frac{\rho_s}{\rho}, \frac{t}{t_e}, \frac{Uyt}{A_b}, \Delta A, S_{hd}, \frac{\rho U y}{\mu}, \frac{U}{\sqrt{g y}}, \frac{tU}{y}, n_d, \sigma_g, \alpha, \beta\right) \quad (2)$$

از میان پارامترهای بی‌بعد استخراج شده، اثر انحراف معیار هندسی به دلیل یکنواختی رسوبات مورد استفاده، W/D و l/D به علت ثابت بودن عرض و طول پایه و جسم شناور، D/D_* و l_*/D_* به دلیل ثابت بودن ابعاد پایه و فونداسیون، S_{hd} به دلیل ثابت بودن شکل جسم شناور، U_c/U ، D_{50}/D و زوایای پایه‌های پل در صفحه جریان و قائم ثابت در نظر گرفته شد. براساس مطالعات لاگاس و همکاران (2010) تأثیر زبری و نفوذپذیری جسم شناور بر حداکثر عمق آبشستگی چندان قابل ملاحظه نیست بنابراین از تأثیر n_d صرف نظر شده است. هم‌چنین به علت اینکه عدد رینولدز در تمام آزمایش‌ها از مقدار 9100 بیش‌تر بود، لذا از تأثیر این پارامتر صرف نظر شده و رابطه (2) پس از ساده‌سازی به صورت رابطه (3) خلاصه گردید.

$$\frac{d_s}{D} = f_3\left(\frac{y}{D}, Fr, \frac{L}{D}, \frac{T}{D}, \frac{Z}{D}, \frac{t}{t_e}, T^*, \Delta A\right) \quad (3)$$

که در آن، $T^* = Uyt/A_b$ عامل بی‌بعد زمان می‌باشد. در این تحقیق رابطه (3) به عنوان یک رابطه پایه برای انجام

استوانه‌ای شکل مستقر بر گروه‌شمع، به این نتیجه رسیدند که تجمع اجسام شناور می‌تواند عمق آبشستگی را 12 تا 14 برابر نسبت به حالت بدون جسم شناور افزایش دهد. هم‌چنین نتایج حاصل از آزمایش‌ها حاکی از آن است که محل قرارگیری اجسام شناور در جلوی پایه تأثیر به‌سزایی بر عمق، عرض و طول گودال آبشستگی دارد، به طوری که هر چه اجسام شناور به بستر جریان نزدیک‌تر باشند، ابعاد گودال آبشستگی افزایش می‌یابد. هم‌چنین هر چه نسبت عرض جسم شناور به عرض کانال افزایش یابد، آبشستگی در جلوی پایه بیش‌تر می‌گردد. همان‌طور که اشاره شد، حضور اجسام شناور که عموماً در زمان سیلاب رخ می‌دهد، می‌تواند تأثیر چشم‌گیری بر الگوی جریان و حداکثر عمق آبشستگی اطراف پایه‌های پل ایجاد نماید. از آنجا که تاکنون تحقیقی در خصوص تأثیر ابعاد هندسی جسم شناور بر هندسه آبشستگی اطراف گروه پایه کج مستقر بر روی فونداسیون صورت نگرفته است، هدف از تحقیق حاضر بررسی تأثیر توام تراز کارگذاری فونداسیون و حضور اجسام شناور با ابعاد مختلف بر تغییرات عمق آبشستگی در اطراف گروه پایه کج برای شرایط مختلف هیدرولیکی می‌باشد.

2- مواد و روش‌ها

الف) تحلیل ابعادی

عمق آبشستگی در اطراف پایه پل متأثر از عوامل زیادی شامل پارامترهای توصیف‌کننده هندسه پایه پل، شرایط هیدرولیکی جریان، هندسه اجسام شناور، مشخصات سیال، رسوب بستر و زمان می‌باشند که آنها را می‌توان به صورت رابطه تابعی (1) نوشت:

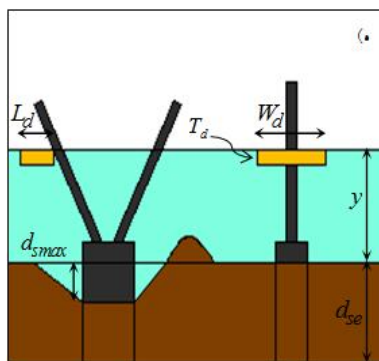
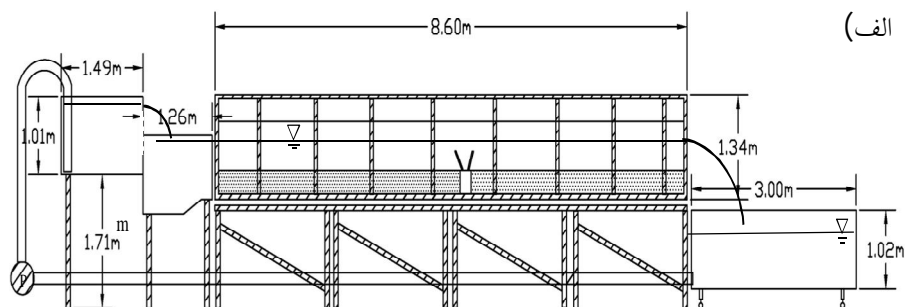
$$d_s = f_1(y, U, U_c, b, D, l, D_*, L, W, T, n_d, Z, D_{50}, \sigma_g, \rho_s, \rho, \mu, g, \alpha, \beta, t, t_e, \Delta A, A_b, S_{hd}) \quad (1)$$

در این رابطه d_s عمق آبشستگی، y عمق جریان، U سرعت متوسط جریان، U_c سرعت آستانه حرکت ذرات رسوبی، b عرض کانال، D عرض پایه پل، l طول پایه پل، D_* عرض فونداسیون، l_* طول فونداسیون پل، L طول جسم شناور در راستای جریان، W عرض جسم شناور، T ضخامت جسم شناور، n_d زبری جسم شناور در شرایطی

آزمایش‌ها مورد استفاده قرار گرفت.

توسط پمپ وارد مخزن اندازه‌گیری بالادست شده که در انتهای آن سرریز مثلی برای اندازه‌گیری دبی جریان نصب شده بود. سپس جریان با عبور از سرریز وارد مخزن آرام‌کننده پایین‌دست شده و در ادامه وارد کانال می‌گردید. برای کاهش تلاطم جریان ورودی به کانال و مانع از شکل‌گیری جریان‌های عرضی در ورودی آن، از مستقیم‌سازنده جریان در ابتدای کانال استفاده شد. برای تنظیم عمق جریان در کانال از دریچه پروانه‌ای که در انتهای آن نصب شده بود، استفاده گردید.

ب) تجهیزات آزمایشگاهی و روش انجام آزمایش‌ها
 آزمایش‌ها در آزمایشگاه هیدرولیک و مدل‌های فیزیکی هیدرولیکی گروه مهندسی آب دانشگاه گیلان و در فلومی با سیستم بازچرخانی و به طول 8/6 متر، عرض 0/88 و عمق 1 متر که دارای دیواره‌هایی از جنس شیشه و کف آهنی بود، انجام شد. به‌منظور تأمین دبی جریان از پمپ سانتریفیوژ که قادر بود دبی سیستم را تا 70 لیتر بر ثانیه تأمین نماید، استفاده گردید (شکل 1).



شکل 1 الف) طرح کلی فلوم آزمایشگاهی، ب) نمایی از فلوم آزمایشگاهی، ج) نمای روبه‌رو از استقرار جسم شناور، د) نمایی از استقرار گروه‌پایه و جسم شناور و ه) معرفی پارامترهای عمق آب‌شستگی در حضور اجسام شناور

برای ممانعت از تشکیل شکنج در سرعت‌های نزدیک به آستانه حرکت، قطر رسوبات باید از 0/7 میلی‌متر بیش‌تر باشد. رسوبات مورد استفاده در این تحقیق دارای قطر 0/7 میلی‌متر بود که از مصالح رودخانه‌ای تهیه و بعد از الک کردن در بازه‌ای به طول 1/5 متر از فلوم آزمایشگاهی که محدوده مورد مطالعه برای آبشستگی بود، قرار داده شد. ضخامت مواد بستر با توجه به بیشینه عمق آبشستگی، 30 سانتی‌متر انتخاب گردید. برای شبیه‌سازی بهتر بستر رسوبی کانال، در بالادست و پایین‌دست بازه مورد مطالعه از رسوبات درشت‌دانه که در مرحله الک کردن باقی مانده بود، استفاده گردید. قبل از شروع آزمایش‌ها لازم بود که سرعت آستانه حرکت برای قطر رسوبات مورد استفاده مشخص گردد. بنابراین برای شرایط مختلف عمق و دبی، وضعیت آستانه حرکت بررسی و در نهایت مقدار متوسط سرعت جریان برای آستانه حرکت 0/22 متر بر ثانیه تعیین گردید. مقایسه نتایج حاصله با دیاگرام شیلدز و روابط تجربی مطابقت مطلوبی را نشان داد.

تعیین زمان تعادل در مطالعه مربوط به آبشستگی از اهمیت ویژه‌ای برخوردار می‌باشد. محققان معیارهای مختلفی را برای تعیین زمان تعادل پیشنهاد نموده‌اند. ملویل و چیو (1999) اشاره نمودند زمان تعادل، زمانی است که میزان آبشستگی در طی دوره زمانی 24 ساعته کمتر از 5 درصد قطر پایه باشد. رادکیوی و اتما (1983)، زمان تعادل را مدت زمانی معرفی نمودند که در سه ساعت متوالی بیش از یک میلی‌متر آبشستگی رخ ندهد. در آزمایش‌های انجام شده در این پژوهش از معیار ملویل و چیو (1999) برای تعیین زمان تعادل استفاده شد. برای این منظور، ابتدا آزمایشی به مدت 72 ساعت و با سرعت نسبی 0/95 انجام و تغییرات عمق آبشستگی با استفاده از عمق‌سنج با دقت 0/1 میلی‌متر اندازه‌گیری گردید. مقایسه نتایج نشان داد که بعد از گذشت زمان 24 ساعت از شروع آزمایش، تغییرات عمق آبشستگی کمتر از 5 درصد قطر پایه می‌گردد. بنابراین زمان تعادل برای کل آزمایش‌ها 24 ساعت در نظر گرفته شد. در هر یک از آزمایش‌ها، ابتدا با تعیین دبی جریان برای سرعت نسبی 0/95 آستانه حرکت و عمق مورد نظر، آب به تدریج و به آرامی وارد کانال شده

با توجه به اینکه در آزمایش‌ها تنظیم دقیق دبی بسیار حائز اهمیت بود، از یک دستگاه کنترل‌کننده دور موتور برای تنظیم دور الکتروموتور پمپ استفاده گردید که با استفاده از آن امکان تنظیم دقیق دبی جریان با حداقل اتلاف وقت میسر شد. برای اطمینان از توسعه‌یافتگی جریان قبل از رسیدن به پایه پل، محل نصب آن 5 متر بعد از ورودی انتخاب گردید.

گروه پایه کج مورد بررسی در این تحقیق از دو پایه مستطیلی شکل به طول و عرض 2/5 و 3/5 سانتی‌متر (معادل با مقیاس 1:190 از پل هشتم اهواز) با زاویه 28 درجه بر روی فونداسیون مستطیلی شکل به طول و عرض 16 و 10 سانتی‌متر نصب شده بودند، تشکیل می‌شد. در انتخاب مقیاس سعی شد که ابعاد نهایی پایه به گونه‌ای باشد که دیواره‌ها بر روی آبشستگی تأثیری نداشته باشند، طبق نظر Raudkivi and Ettema (1983) چنانچه نسبت عرض فلوم به عرض پایه از 6/25 بیشتر باشد، دیواره‌های فلوم تأثیری بر مقدار آبشستگی نخواهند داشت. مقدار این نسبت برای پایه و فونداسیون پل مورد بررسی در فلوم آزمایشگاهی به ترتیب برابر با 26 و 9 بود.

بر اساس تحقیقات لاگاس و همکاران (2010) زبری و تخلخل توده اجسام تأثیر زیادی بر الگوی آبشستگی یا مقدار عمق آبشستگی در مقابل پایه ندارند و در مقایسه با اندازه، شکل و موقعیت توده اجسام، زبری و تخلخل می‌تواند متغیرهای ثانویه در نظر گرفته شوند (Lagasse et al, 2010). لذا برای انجام آزمایش‌ها این عوامل مورد توجه قرار گرفته و اجسام شناور به طول 7 و 10/5 سانتی‌متر (طول‌های نسبی 2 و 3)، عرض 21 سانتی‌متر (عرض نسبی 6) و ضخامت 1/7 و 3/5 سانتی‌متر (ضخامت‌های نسبی 0/5 و 1) از جنس ارتالون و چوب ساخته شد.

اندازه ذره رسوب یکی از عوامل مؤثر بر عمق آبشستگی است. برای حذف اثر اندازه رسوب بر عمق آبشستگی موضعی، طبق تحقیق ملویل و ساترلند (Melville and Sutherland, 1988)، نسبت عرض پایه به قطر ذرات رسوبی باید از 20-25 بیشتر باشد. همچنین رادکیوی و اتما (Raudkivi and Ettema, 1983) اظهار داشتند که

برای جسم شناور با ابعاد نسبی $6 \times 2 \times 0/5$ ، حدود 8 و 12 درصد، جسم شناور با ابعاد نسبی $6 \times 2 \times 1$ ، حدود 20 و 41 درصد، جسم شناور با ابعاد نسبی $6 \times 3 \times 0/5$ حدود 7 و 10 درصد و جسم شناور با ابعاد نسبی $6 \times 3 \times 1$ ، حدود 6 و 10 درصد نسبت به حالت بدون جسم شناور (که با علامت اختصاری $N.D^1$ در نمودارها مشخص شده است) افزایش یافت.

همچنین متوسط مقادیر اندازه‌گیری لحظه‌ای عمق آب‌شستگی برای عمق‌های مختلف جریان در تراز نسبی کارگذاری فونداسیون $Z/D = +1/5$ در زمان‌های نسبی $0/05$ و $0/2$ ، به ترتیب برای جسم شناور با ابعاد نسبی $6 \times 2 \times 0/5$ ، حدود 8 و 5 درصد، جسم شناور با ابعاد نسبی $6 \times 2 \times 1$ ، حدود 27 و 25 درصد، جسم شناور با ابعاد نسبی $6 \times 3 \times 0/5$ حدود 5 و 4 درصد و جسم شناور با ابعاد نسبی $6 \times 3 \times 1$ ، حدود 15 و 13 درصد نسبت به حالت بدون جسم شناور افزایش یافت.

به‌منظور درک بهتر از تأثیر اجسام شناور بر الگوی جریان نزدیک‌شونده به پایه‌های پل، آشکارسازی جریان با استفاده از تزریق ماده رنگی انجام گردید که نمونه‌ای از تصاویر تهیه شده برای عمق نسبی $3/7$ در شکل‌های 3 و 4 نشان داده شده است. مشاهدات آزمایشگاهی نشان داد که با قرارگیری جسم شناور در جلوی پایه، بخشی از میدان جریان توسط جسم شناور مسدود گردیده و جریان پس از برخورد به جسم شناور به سمت وجه پایین دست آن انحراف می‌یابد. به عبارت دیگر حضور جسم شناور منجر به آن می‌شود که انحراف خطوط جریان از سطح به عمق از فاصله دورتری از پایه آغاز شده و در نتیجه محدوده تغییرات میدان جریان و تنش برشی از فاصله‌ی دورتر از پایه آغاز می‌گردد. با تداخل خطوط جریان منحرف‌شده به زیر جسم شناور با جریان برخوردی به پایه، قدرت گردابه‌های نعل‌اسبی افزایش یافته و عمق آب‌شستگی در جلوی پایه بیش‌تر می‌گردد.

بر اساس مطالعات صورت‌گرفته توسط فلاح گلنشینی و همکاران (1390)، در یک سرعت ثابت، با کاهش عمق جریان تأثیر حضور اجسام شناور بیش‌تر می‌گردد. در

و بعد از تنظیم دبی، عمق مورد نظر در کانال با مانور دریچه انتهایی برقرار گردید. در تمام آزمایش‌ها تغییرات آب‌شستگی به مدت 7 ساعت که تقریباً 85 درصد آب‌شستگی رخ می‌داد، به‌صورت پیوسته با استفاده از عمق‌سنجی نقطه‌ای با دقت $\pm 0/1$ میلی‌متر اندازه‌گیری و سپس حداکثر عمق آب‌شستگی بعد از قطع آزمایش در زمان 24 ساعت با استفاده از متر لیزری با دقت ± 1 میلی‌متر اندازه‌گیری شد.

در این تحقیق به‌منظور بررسی تأثیر اجسام شناور بر آب‌شستگی اطراف گروه‌پایه کج، در مجموع 30 آزمایش برای عمق‌های جریان 13، 18 و 23 سانتی‌متر (اعماق نسبی $3/7$ ، $5/2$ و $6/6$)، رقوم‌های نسبی مختلف کارگذاری فونداسیون (فاصله روی فونداسیون تا سطح بستر نسبت به عرض پایه)، -3 و $+1/5$ و جسم شناور به‌صورت هم‌راستا با جریان در ضخامت‌های مختلف انجام پذیرفت.

3- نتیجه‌گیری و بحث

3-1- بررسی الگوی جریان و توسعه زمانی عمق آب‌شستگی

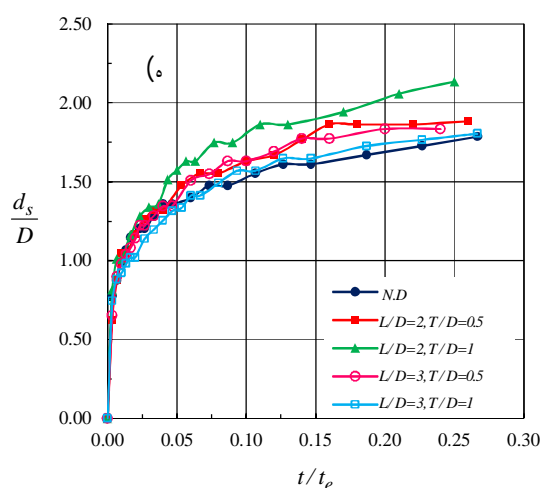
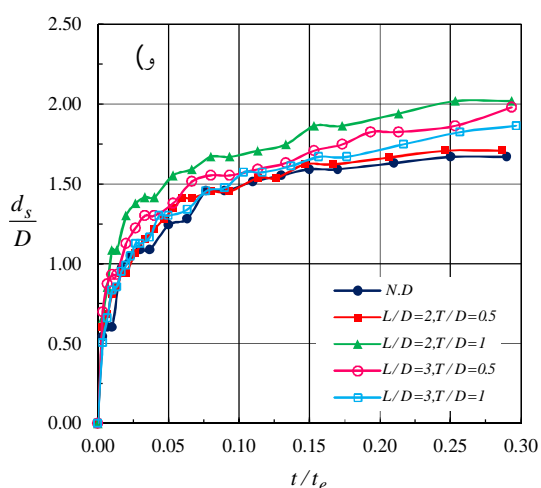
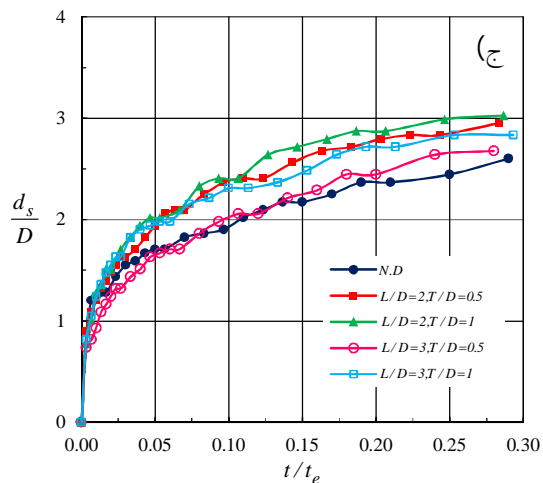
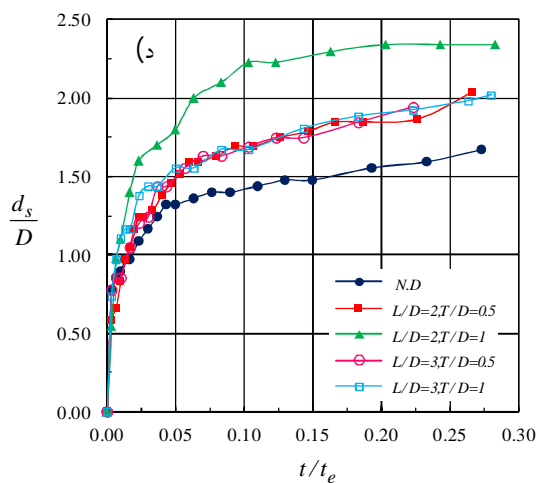
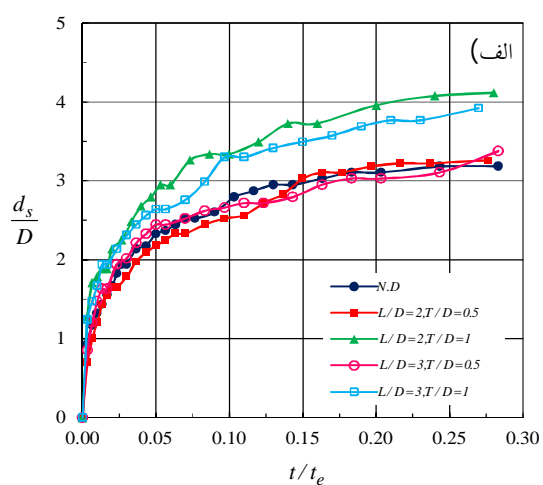
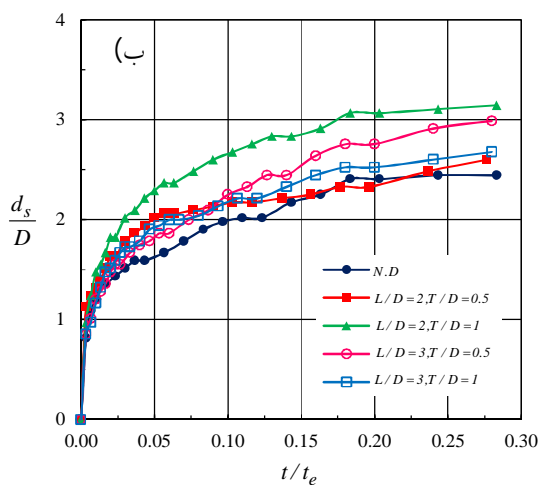
نتایج حاصل از اندازه‌گیری لحظه‌ای عمق آب‌شستگی برای عمق‌های نسبی، ابعاد جسم شناور و ترازهای کارگذاری مختلف در نمودارهای شکل 2 نشان داده شده است. به دلیل آنکه مقایسه‌های توسعه زمانی عمق لحظه‌ای آب‌شستگی با شرایط حضور و عدم حضور جسم شناور صورت گرفت، لذا به جای استفاده از پارامتر بی‌بعد زمان، T^* ، از پارامتر زمان نسبی (t/t_e) ، استفاده گردید. همان‌طور که در این نمودارها ملاحظه می‌شود، در هر عمق جریان، حضور جسم شناور منجر به افزایش مقدار لحظه‌ای عمق آب‌شستگی می‌گردد. مقایسه نتایج نشان داد که اختلاف مقدار لحظه‌ای عمق آب‌شستگی در شرایط حضور و عدم حضور جسم شناور با افزایش عمق جریان، به تدریج کاهش می‌یابد.

مقایسه مقادیر عمق لحظه‌ای آب‌شستگی در تراز نسبی کارگذاری فونداسیون $Z/D = -3$ نشان داد متوسط مقادیر اندازه‌گیری لحظه‌ای عمق آب‌شستگی برای عمق‌های مختلف جریان در زمان‌های نسبی $0/05$ و $0/2$ ، به ترتیب

¹ No Debris

مختلف نشان داده شده است.

شکل 5 آشکارسازی الگوی جریان برای عمق‌های نسبی



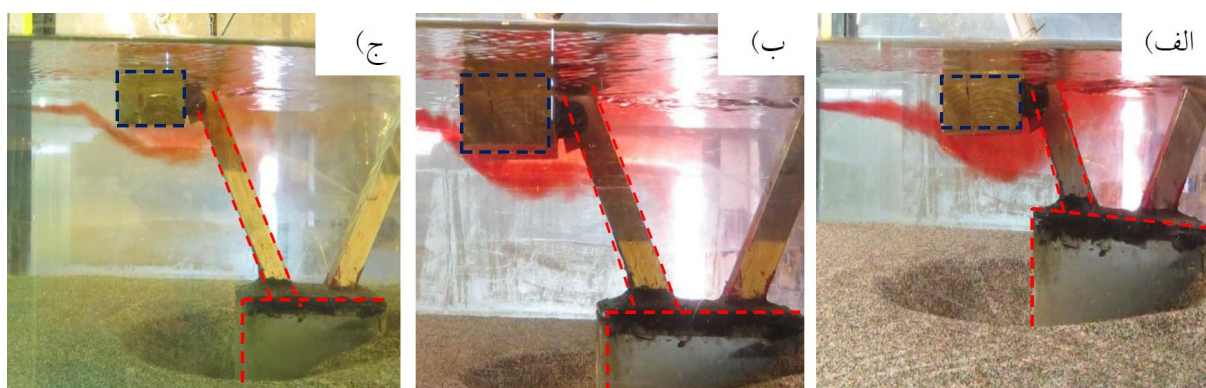
شکل 2 توسعه زمانی حداکثر عمق آبشستگی در اعماق مختلف جریان برای شرایط با و بدون جسم شناور در تراز نسبی کارگذاری فونداسیون و عمق‌های مختلف الف) $y/D=3/7$ و $Z/D=+1/5$ ب) $y/D=5/2$ و $Z/D=+1/5$ ج) $y/D=6/6$ و $Z/D=+1/5$ د) $y/D=3/7$ و $Z/D=-3$ و $y/D=6/6$ و $Z/D=-3$ ه) $y/D=5/2$ و $Z/D=-3$ و $y/D=6/6$ و $Z/D=-3$ ادامه



شکل 3 نمایی از آشکارسازی جریان نزدیک‌شونده به گروه‌پایه کج در حالت با و بدون جسم شناور، برای جسم شناور با ابعاد نسبی $6 \times 2 \times 1$ ، $y/D=5/2$ و $Z/D=-3$. الف) تزریق بدون جسم شناور، ب) تزریق جریان هم‌تراز جسم شناور و ج) تزریق میانی جریان



شکل 4 نمایی از آشکارسازی جریان نزدیک‌شونده به گروه‌پایه کج در حالت با و بدون جسم شناور، برای جسم شناور با ابعاد نسبی $6 \times 2 \times 1$ ، $y/D=5/2$ و $Z/D=+1/5$. الف) تزریق بدون جسم شناور، ب) تزریق جریان هم‌تراز جسم شناور و ج) تزریق میانی جریان



شکل 5 آشکارسازی جریان برای اعماق مختلف جریان در حضور جسم شناور با ابعاد نسبی $6 \times 2 \times 1$. الف) $y/D=3/7$ ، ب) $y/D=5/2$ و ج) $y/D=6/6$

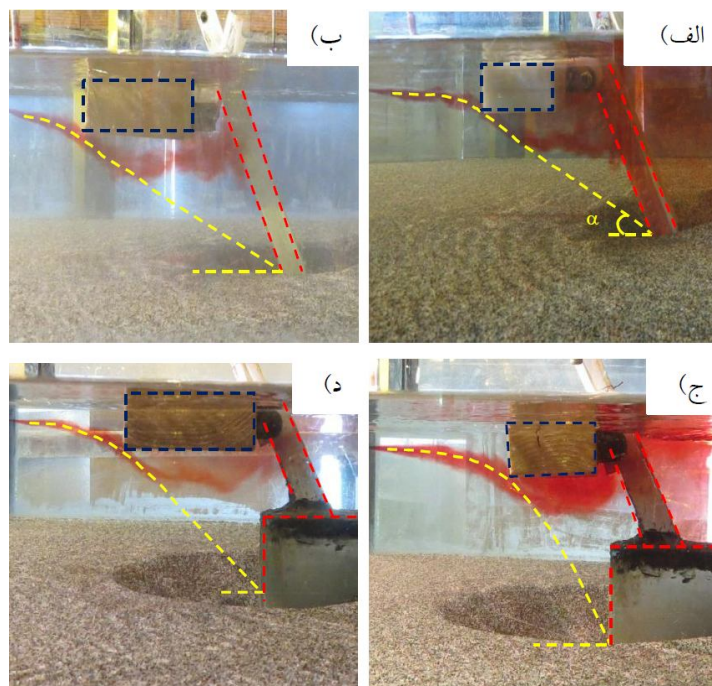
گردابه‌های نعل‌اسبی کاسته شده و مقدار عمق آب‌شستگی کاهش یابد.

مطالعات صورت‌گرفته توسط لاگاس و همکاران (2010) حاکی از آن است که با افزایش طول جسم شناور، قطر

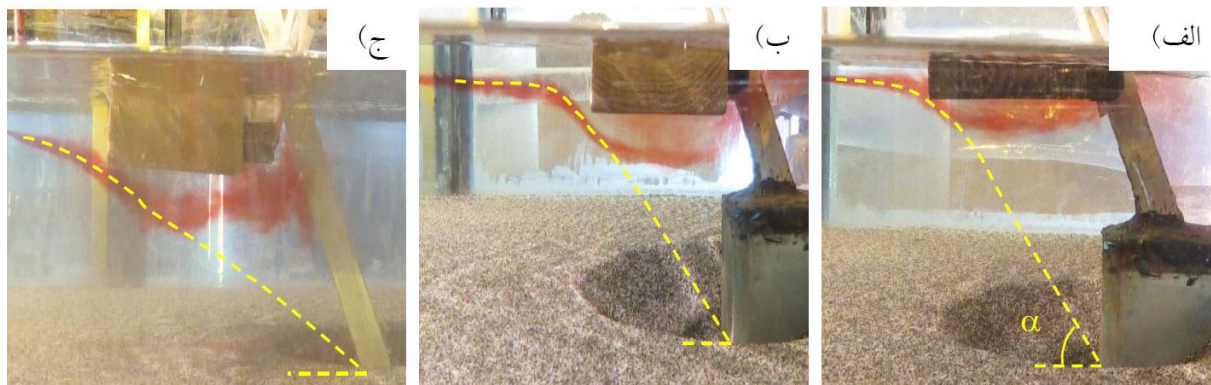
همان‌طور که ملاحظه می‌گردد با افزایش عمق جریان و افزایش فاصله جسم شناور نسبت به بستر، طول مسیر برخورد جریان پایین‌رونده به سمت پایه و بستر افزایش یافته و در نتیجه می‌توان انتظار داشت که از قدرت

به راستای قائم از 28 درجه به 33 درجه افزایش می‌یابد. داده‌های آزمایشگاهی حاصل از آزمایش‌های ملویل و دانگل (1992) نشان داد که با افزایش ضخامت جسم شناور، قطر مؤثر پایه افزایش یافته و در نتیجه حداکثر عمق آبشستگی افزایش می‌یابد. مطالعات پاگالیرا و کارناسینا (2011) نیز حاکی از آن است که با افزایش ضخامت جسم شناور، درصد انسداد جریان توسط جسم شناور افزایش یافته و باعث افزایش عمق آبشستگی می‌شود.

مؤثر (قطر معادل با حضور جسم شناور) پایه کاهش یافته و از تأثیر آن بر حداکثر عمق آبشستگی کاسته می‌شود. همان‌طور که در شکل 6 مشاهده می‌شود، با افزایش طول نسبی جسم شناور، زاویه انحراف جریان به سمت بستر کاهش می‌یابد. در نتیجه جریان در ارتفاعی بالاتر از بستر به پایه برخورد می‌نماید. این وضعیت مشابه با شرایط افزایش زاویه استقرار پایه عمل می‌نماید. مقایسه‌های به‌عمل آمده حاکی از آن است که با افزایش طول نسبی جسم شناور از 2 به 3، زاویه انحراف جریان به بستر نسبت



شکل 6 آشکارسازی تأثیر افزایش طول جسم شناور بر الگوی جریان برای جسم شناور با ضخامت نسبی 0/5 و ترازهای نسبی مختلف. (الف و ب) $Z/D=-3$ ، (ج و د) $Z/D=+1/5$



شکل 7 آشکارسازی تأثیر تغییر ضخامت جسم شناور بر الگوی جریان برای عمق نسبی 3/7 و جسم شناور با ابعاد نسبی 6×3×0/5 و ترازهای نسبی کارگذاری مختلف، (الف و ب) تراز نسبی 1/5 $Z/D=+$ و (ج) $Z/D=-3$

عمق نسبی جریان $y/D=3/7$ ، حداکثر عمق آب‌شستگی برای جسم شناور با ابعاد نسبی $6 \times 3 \times 0/5$ ، 5 درصد بیش‌تر از حالت بدون جسم شناور بوده و با افزایش ضخامت نسبی جسم شناور از $0/5$ به 1، اختلاف حداکثر عمق آب‌شستگی نسبت به حالت بدون جسم شناور به 24 درصد افزایش می‌یابد (جدول 1).

با افزایش طول جسم شناور، زاویه برخورد جریان به بستر افزایش یافته و حداکثر عمق آب‌شستگی کاهش می‌یابد. مقایسه نتایج حاصل از آزمایش‌ها حاکی از آن است که مقدار حداکثر عمق آب‌شستگی برای عمق نسبی $3/7$ و ابعاد نسبی $6 \times 2 \times 1$ ، 29 درصد بیش‌تر از حالت بدون جسم شناور می‌باشد. با افزایش طول نسبی جسم شناور از 2 به 3، حداکثر عمق آب‌شستگی به 24 درصد بیش‌تر از حالت بدون جسم شناور تغییر می‌یابد (جدول 1).

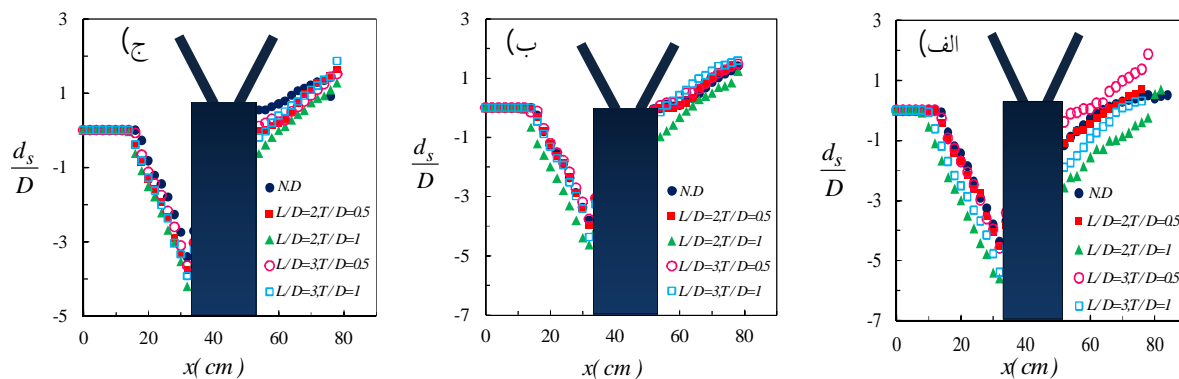
در شکل 9 نیم‌رخ نهایی آب‌شستگی برای شرایط مختلف هیدرولیکی و هندسه اجسام شناور در تراز نسبی کارگذاری فونداسیون 3- نشان داده شده است. مقایسه نتایج حاکی از آن است که برای جسم شناور با ابعاد نسبی $6 \times 2 \times 0/5$ و $6 \times 2 \times 1$ در عمق نسبی $y/D=3/7$ ، حداکثر عمق آب‌شستگی تا روی تراز فونداسیون توسعه یافته و پس از آن متوقف می‌شود. در این حالت حداکثر عمق آب‌شستگی نسبت به حالت بدون جسم شناور، حدود 16 درصد افزایش می‌یابد. مقایسه نتایج نشان داد با افزایش عمق نسبی جریان به $y/D=5/2$ و $y/D=6/6$ ، حداکثر عمق آب‌شستگی به میزان 5 درصد بیش‌تر از حالت بدون جسم شناور می‌شود.

مشاهدات آزمایشگاهی حاصل از تزریق مواد رنگی در تحقیق حاضر حاکی از آن است که با افزایش ضخامت نسبی جسم شناور، میزان انسداد جریان توسط جسم شناور افزوده شده و در نتیجه انحراف بیش‌تر خطوط جریان به سمت بستر و تقویت گردابه نعل اسبی به‌دنبال دارد؛ از این رو میزان عمق آب‌شستگی بیش‌تر می‌شود.

3-2- مقایسه نتایج حداکثر عمق آب‌شستگی

در شکل 8 نیم‌رخ نهایی حفره آب‌شستگی برای شرایط مختلف هیدرولیکی و هندسه اجسام شناور و در تراز کارگذاری فونداسیون $+1/5$ نشان داده شده است. مقایسه نتایج حاکی از آن است که برای جسم شناور با ابعاد نسبی $6 \times 2 \times 1$ ، در عمق نسبی $y/D=3/7$ ، حداکثر عمق آب‌شستگی نسبت به حالت بدون جسم شناور 29 درصد افزایش می‌یابد. مقایسه نتایج نشان داد با افزایش عمق نسبی جریان به $y/D=5/2$ و $y/D=6/6$ ، مقدار تفاوت حداکثر عمق آب‌شستگی نسبت به حالت بدون جسم شناور به‌تدریج کاهش یافته و به میزان 22 و 17 درصد می‌رسد. همان‌طور که در قسمت قبل بیان گردید، با افزایش عمق جریان و فاصله گرفتن جسم شناور از بستر، طول مسیر جریان پایین‌رونده افزایش یافته و از قدرت جریان گردابه‌ای کاسته می‌شود، لذا عمق آب‌شستگی کاهش می‌یابد (جدول 1).

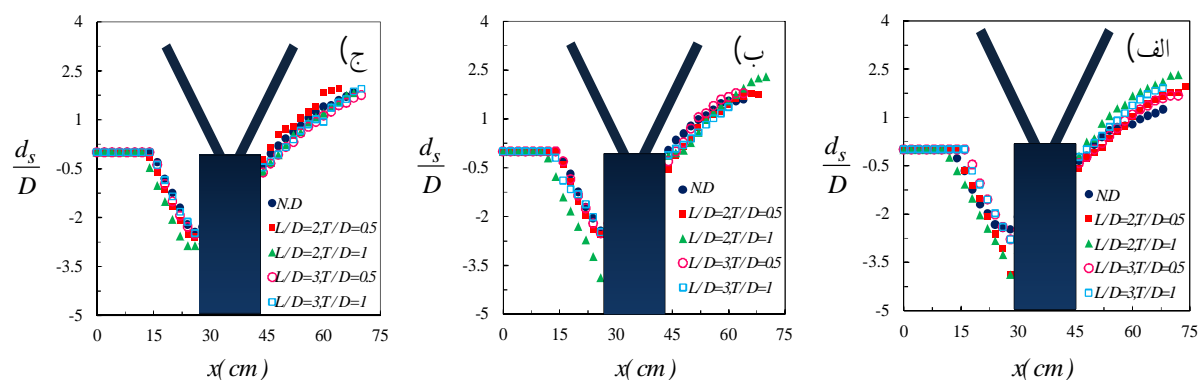
همان‌طور که اشاره شد، با افزایش ضخامت نسبی جسم شناور، به میزان انسداد جریان افزوده شده و در نتیجه میزان عمق آب‌شستگی افزایش می‌یابد، به‌طوری که در



شکل 8 نیم‌رخ نهایی حفره آب‌شستگی برای عمق‌های مختلف جریان در شرایط با و بدون جسم شناور در تراز نسبی $Z/D=+1/5$ (الف) $y/D=3/7$ ، (ب) $y/D=5/2$ ، (ج) $y/D=6/6$

جدول 1 تغییرات حداکثر عمق آبشستگی در شرایط حضور و عدم حضور جسم شناور

	L/D (طول نسبی)	T/D (ضخامت نسبی)	y/D (عمق نسبی جریان)	d_s/D (عمق نسبی آبشستگی)
$Z/D = -3$	2	0/5	3/7	15
			5/2	5
			6/6	5
			3/7	16
			5/2	15
			6/6	15
	3	0/5	3/7	13
			5/2	2/5
			6/6	2/5
			3/7	13
			5/2	2
			6/6	2
$Z/D = +1/5$	2	0/5	3/7	7
			5/2	6
			6/6	6
			3/7	29
			5/2	22
			6/6	17
	3	0/5	3/7	5
			5/2	4
			6/6	3
			3/7	24
			5/2	11
			6/6	9



شکل 9 نیمرخ نهایی آبشستگی برای عمق‌های مختلف جریان در شرایط با و بدون جسم شناور در تراز نسبی $Z/D = -3$.
الف) $y/D = 3/7$ ، ب) $y/D = 5/2$ ، ج) $y/D = 6/6$

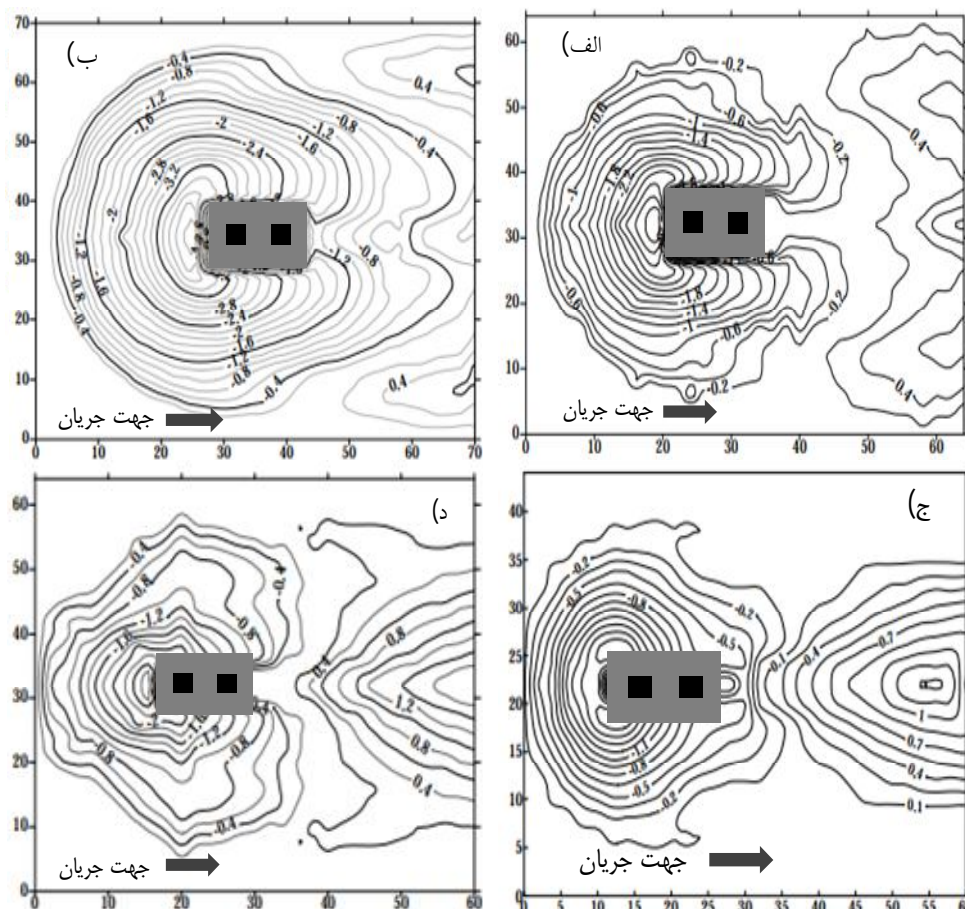
13 درصد بیشتر نسبت به حالت بدون جسم شناور تغییر می‌یابد.

تجزیه و تحلیل نتایج حاکی از آن است که با افزایش طول نسبی جسم شناور از 2 به 3، حداکثر عمق آبشستگی، به

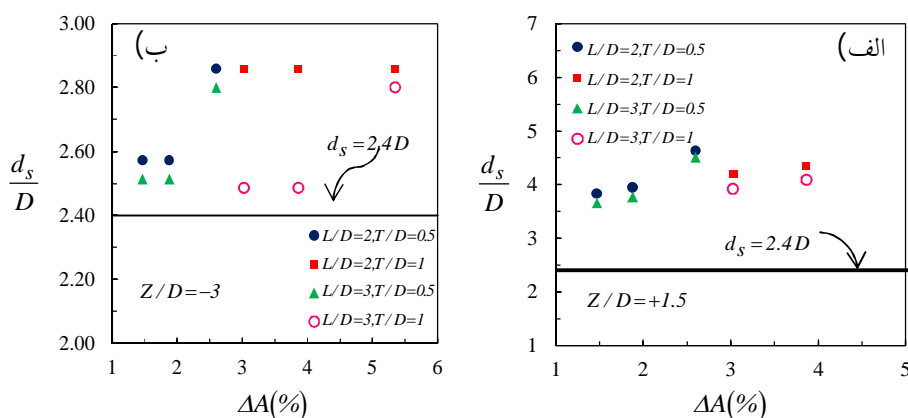
اثر افزایشی جسم شناور بر حداکثر عمق آب‌شستگی کاهش می‌یابد. همچنین در کلیه ابعاد جسم شناور، با افزایش عمق جریان، اثر جسم شناور کاهش می‌یابد. در نمودارهای شکل 10، نمونه‌هایی از توپوگرافی آب‌شستگی در اطراف پایه‌های پل برای رقوم کارگذاری $1/5 +$ و $3 -$ نشان داده است. در شکل 11 میزان تأثیر درصد انسداد بر حداکثر عمق آب‌شستگی نسبی برای اجسام شناور مختلف به همراه خط مربوط به حداکثر عمق آب‌شستگی به ازای تک پایه نشان داده شده است. همان‌طور که در نمودار مشخص است با افزایش درصد انسداد توسط جسم شناور عمق آب‌شستگی افزایش می‌یابد. همچنین با تغییر تراز کارگذاری فونداسیون از $3 -$ به $1/5 +$ ، محدوده تغییرات حداکثر عمق چشم‌گیر بوده و از محدوده $2/5 - 2/9$ در تراز $3 -$ به محدوده $3/5 - 4/5$ در تراز $1/5 +$ افزایش می‌یابد.

با افزایش ضخامت نسبی جسم شناور در عمق نسبی جریان $v/D=5/2$ ، حداکثر عمق آب‌شستگی برای جسم شناور با ابعاد نسبی $6 \times 2 \times 0/5$ ، 5 درصد بیش‌تر از حالت بدون جسم شناور بوده و با افزایش ضخامت نسبی جسم شناور از $0/5$ به 1 ، اختلاف حداکثر عمق آب‌شستگی نسبت به حالت بدون جسم شناور به 16 درصد افزایش می‌یابد.

به عنوان جمع‌بندی کلی می‌توان بیان داشت که حضور جسم شناور منجر به افزایش ابعاد گودال آب‌شستگی نسبت به حالت بدون جسم شناور می‌شود. مقایسه نتایج نشان داد که با افزایش ضخامت نسبی جسم شناور بر قدرت گرداب‌های نعل‌اسبی افزوده شده و ابعاد گودال آب‌شستگی افزایش می‌یابد. همچنین با افزایش طول نسبی جسم شناور، به دلیل کاهش زاویه انحراف جریان به سمت بستر و در نتیجه کاهش شدت تأثیر جسم شناور،

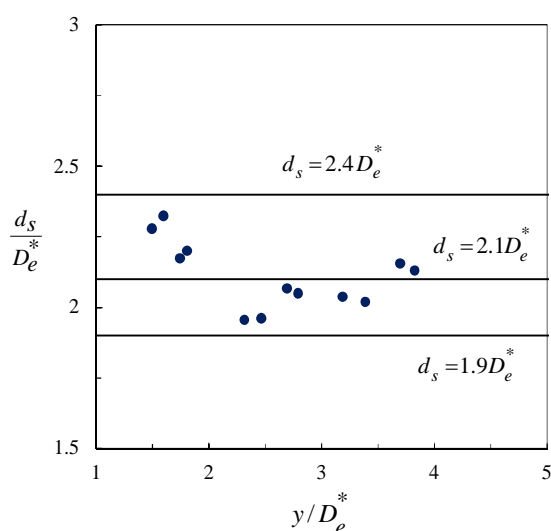


شکل 10 تغییرات توپوگرافی بستر برای جسم شناور با ابعاد نسبی $6 \times 2 \times 1$ (الف) بدون جسم شناور، $Z/D=+1/5$ (ب) با حضور جسم شناور، $Z/D=+1/5$ (ج) بدون حضور جسم شناور، $Z/D=3 -$ (د) با حضور جسم شناور، $Z/D=3 -$



شکل 11 تأثیر درصد انسداد بر حداکثر عمق آبشستگی نسبی برای اجسام شناور و تراز نسبی فونداسیون. الف) $Z/D = +1.5$ و ب) $Z/D = -3$

(5) برای محاسبه قطر مؤثر گروه پایه کج همراه با فونداسیون مورد بررسی، در شرایط حضور جسم شناور اصلاح و ضرایب k_{d1} و k_{d2} به ترتیب 0/35 و -0/55 محاسبه گردید. شکل 12 تغییرات حداکثر عمق آبشستگی نسبت به عمق جریان را با توجه به عمق معادل پایه نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود محدوده تغییرات حداکثر عمق آبشستگی در حضور جسم شناور در حدود 1/9 تا 2/4 برابر عمق مؤثر پایه می‌باشد.



شکل 12 تغییرات حداکثر عمق آبشستگی به صورت تابعی از قطر معادل پایه

پالپارا و کارناسینا (2011)، رابطه ساده‌ای را بر اساس

3-3- بررسی روابط عمق آب شستگی در شرایط

حضور جسم شناور

ملویل و دانگل (1992) با معرفی قطر مؤثر پایه در شرایط حضور جسم شناور، رابطه ارائه شده توسط ملویل و ساترلند (1988) را برای محاسبه حداکثر عمق آبشستگی برای پایه استوانه‌ای اصلاح نمودند (معادله 4).

$$D_e = \frac{[0.52TW + (y - 0.52T)D]}{y} \quad (4)$$

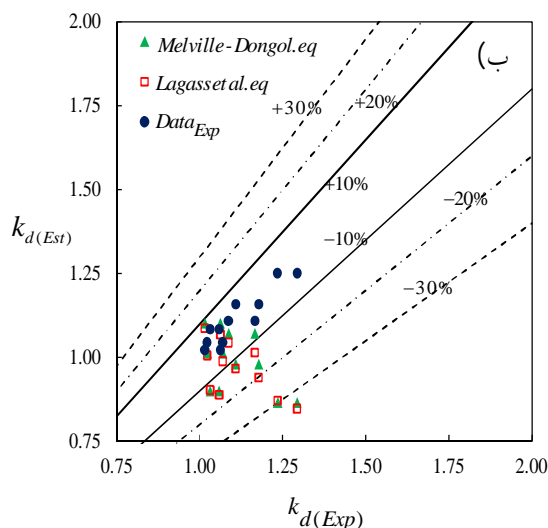
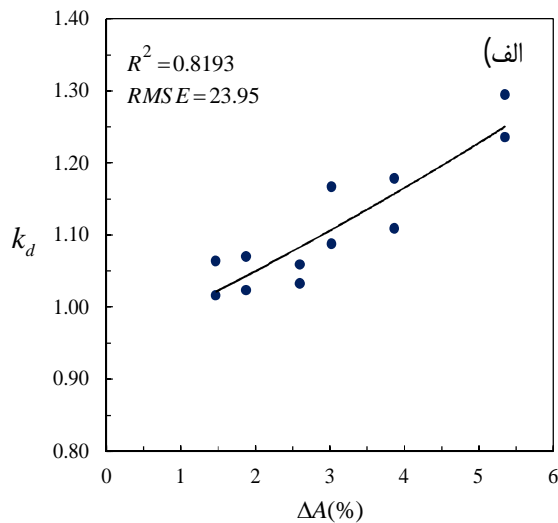
که در آن D_e قطر معادل پایه در شرایط حضور جسم شناور، y عمق جریان، D قطر پایه پل، T و W ، به ترتیب ضخامت و عرض جسم شناور می‌باشد. پس از آن لاگاس و همکاران (2010) با در نظر گرفتن طول جسم شناور و معرفی ضرایب اصلاحی، معادله ارائه شده توسط ملویل و دانگل (1992) را توسعه دادند.

$$D_e^* = \frac{k_{d1}(TW)(L/y)^{k_{d2}} + (y - k_{d1}T)D}{y} \quad (5)$$

که آن رابطه k_{d1} و k_{d2} به ترتیب، ضریب و توان بی‌بعد بهینه شده از داده‌های آزمایشگاهی و L طول جسم شناور می‌باشد. لاگاس و همکاران (2010) k_{d1} و k_{d2} را برای اجسام شناور مستطیلی به ترتیب، 0/39 و -0/79 و برای اجسام شناور مثلثی 0/14 و -0/17 پیشنهاد نمودند. آنها همچنین اظهار داشتند برای نسبت $L/y \leq 1$ می‌توان از طول جسم شناور در محاسبه قطر مؤثر پایه صرف‌نظر نمود.

در این تحقیق با استفاده از داده‌های آزمایشگاهی رابطه

شرایط حضور جسم شناور در دامنه پارامترهای آزمایشگاهی برآورد نماید.



شکل 13 الف) تأثیر نسبت انسداد ΔA بر عامل انقباض جسم شناور k_d برای داده‌های آزمایشگاهی و ب) مقایسه k_d داده‌های آزمایشگاهی با روابط ارائه‌شده توسط لاگاس و همکاران (2010) و ملویل و دانگل (1992)

4- نتیجه‌گیری

یکی از موضوعات مهم در خصوص آب‌شستگی اطراف پایه‌های پل، نقش اجسام شناور که در زمان سیلاب همراه با جریان در رودخانه به حرکت در می‌آیند، بر تغییرات عمق آب‌شستگی اطراف آن می‌باشد. در تحقیق حاضر تأثیر جسم شناور بر میزان حداکثر عمق آب‌شستگی

درصد انسداد ایجاد شده توسط جسم شناور و نسبت حداکثر عمق آب‌شستگی در حالت با جسم شناور به حالت بدون جسم شناور، به صورت زیر برای پیش‌بینی عمق آب‌شستگی در حضور جسم شناور ارائه نمودند.

$$k_d = z_{\max} / z_{\max 0} = 1 + \xi \cdot \Delta A^\psi \quad (6)$$

که در آن، k_d عامل تعادل انقباض جسم شناور و ξ و ψ ضرایب حاصل از رگرسیون داده‌های آزمایشگاهی می‌باشند.

در شکل 13- الف تغییرات پارامتر k_d در مقابل ΔA برای داده‌های آزمایشگاهی تحقیق حاضر نشان داده شده است. با برازش بهترین خط رگرسیونی بر داده‌ها، معادله (7) استخراج گردید.

$$k_d = z_{\max} / z_{\max 0} = 0.9461e^{0.052\Delta A} \quad (7)$$

برای ارزیابی و بررسی معادله ارائه شده، شاخص‌های آماری مجذور میانگین مربعات خطا ($RMSE$) و خطای نسبی (RE) استفاده گردید.

$$RMSE = \sqrt{\frac{(\sum (d_{sEst} - d_{sExp})^2)}{n-1}} \quad (8)$$

$$RE = (d_{sEst} - d_{sExp}) / d_{sEst} \quad (9)$$

که در آن، d_{sEst} عمق آب‌شستگی محاسبه شده از معادله (7) و d_{sExp} عمق آب‌شستگی بدست آمده از داده‌های آزمایشگاهی و n تعداد داده‌ها می‌باشد.

تجزیه و تحلیل صورت گرفته نشان داد که مقدار شاخص میانگین مجذور مربعات ($RMSE$) و خطای نسبی (RE) برای برآورد عمق آب‌شستگی به ترتیب 23/95 و 0/11 بدست آمد.

در شکل 13- ب مقایسه مقادیر k_d داده‌های آزمایشگاهی حاصل از رابطه ارائه شده (معادله 7) با k_d روابط ارائه شده توسط لاگاس و همکاران (2010) و ملویل و دانگل (1992) نشان داده شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود رابطه اصلاحی در تحقیق حاضر توانسته است با دقت مناسب‌تری نسبت به روابط سایر محققان مقدار حداکثر عمق آب‌شستگی را در اطراف گروه پایه کج در

D_*	عرض فونداسیون	اطراف گروه پایه کج در راستای جریان، مورد بررسی قرار گرفت. بدین منظور آزمایش‌هایی در شرایط آب زلال، سرعت نسبی 0/95 آستانه حرکت و عمق‌های نسبی جریان، 3/7، 5/2 و 6/6 انجام شد. نتایج حاصل از آزمایش‌ها حاکی از آن بود که برای اعماق کمتر جریان، میزان تأثیر جسم شناور بر آبشستگی پایه پل بیش‌تر می‌باشد و با افزایش عمق جریان و فاصله گرفتن جسم شناور از بستر، از تأثیر جسم شناور بر آبشستگی اطراف گروه پایه کاسته می‌شود. به‌طور کلی برای تراز نسبی کارگذاری فونداسیون $Z/D = +1/5$ و $Z/D = -3$ با حضور جسم شناور در جلوی پایه به‌ترتیب، حداکثر عمق آبشستگی به میزان 29 و 15 درصد نسبت به حالت بدون جسم شناور افزایش می‌یابد. مقایسه‌های صورت‌گرفته نشان داد که افزایش ضخامت نسبی جسم شناور نسبت به افزایش طول نسبی آن تأثیر بیش‌تری را بر افزایش حداکثر عمق آبشستگی دارد. برای عمق نسبی جریان $y/D = 3/7$ با افزایش ضخامت نسبی از 0/5 به 1 (طول نسبی 3) و طول نسبی جسم شناور از 2 به 3 (ضخامت نسبی 1)، برای تراز نسبی $Z/D = +1/5$ حداکثر عمق آبشستگی نسبت به حالت بدون جسم شناور به ترتیب، حدود 29 و 24 درصد افزایش می‌یابد و برای تراز نسبی $Z/D = -3$ با افزایش ضخامت نسبی و طول نسبی جسم شناور حداکثر عمق آبشستگی به ترتیب، 15 و 13 درصد نسبت به حالت بدون جسم شناور افزایش می‌یابد. همچنین با اصلاح ضرایب مربوط به معادله ارائه شده توسط لاگاس و همکاران (2010)، رابطه‌ی جدیدی برای محاسبه حداکثر عمق آبشستگی برای گروه پایه کج با فونداسیون بالاتر از بستر در دامنه پارامترهای آزمایشگاهی تحقیق حاضر ارائه گردید.
D_{50}	قطری که 50 درصد ذرات بستر رسوبی از آن کوچک‌تر است	
d_s	عمق آبشستگی	
d_{sEst}	عمق آبشستگی محاسبه شده	
d_{sExp}	عمق آبشستگی آزمایشگاهی	
g	شتاب ثقل	
k_{d1} و k_{d2}	ضریب و توان بی‌بعد بهینه‌شده از داده‌های آزمایشگاهی	
L	طول جسم شناور در راستای جریان	
l	طول پایه پل	
l_*	طول فونداسیون پل	
n_d	زبری جسم شناور	
S_{hd}	پارامتر شکل جسم شناور	
$T^* = Uyt / A_b$	عامل بی‌بعد زمان	
T	ضخامت جسم شناور	
t	زمان از شروع آبشستگی	
t_e	زمان تعادل آبشستگی	
U	سرعت متوسط جریان	
U_c	سرعت آستانه حرکت ذرات رسوبی	
W	عرض جسم شناور	
y	عمق جریان	
Z	تراز استقرار فونداسیون	
α	زاویه انحراف پایه‌ها در صفحه موازی جریان	
β	زاویه انحراف پایه‌ها در صفحه عمود بر جریان	
$\Delta A = [(W-D)T] / (b.y)$	ضریب انسداد ناشی از تجمع جسم شناور	
μ	لزجت دینامیکی	
ρ_s	چگالی رسوبات بستر	
ρ	چگالی آب	
σ_g	انحراف معیار مصالح رسوبی بستر	

6- منابع

اسمعیلی ورکی، م.، س. موسی پور و م. حاتم جعفری. (1392). "بررسی آزمایشگاهی تأثیر عوامل هندسی بر مشخصات آبشستگی اطراف گروه پایه‌های کج با فونداسیون"، مجله پژوهش آب ایران، سال هفتم، شماره 13، صص. 141-151.

بهشتی، ع.، ب. عطایی آشتیانی. (1383). "آبشستگی در

5- فهرست علائم

سطح اشغال‌شده توسط پایه و جسم شناور
 $A_b = Dy + \Delta A.b.y$
 b عرض کانال
 D عرض پایه پل
 D_e قطر معادل پایه در شرایط حضور جسم شناور

International Conference on Scour and Erosion, (ICSE-5), pp. 854-863.

Laursen E.M. and Toch A. 1956. "Scour around bridge piers and abutments". Bulletin No. 4, Iowa Highway Research Board.

Lyn D.A., Cooper T.J., Yi Y., Sinha R.N and Rao A.R. 2003. "Debris accumulation at bridge crossing, laboratory and field studies". Rep. No. FHWA/IN/JTRP/10. West Lafayette, IN 47906.

Melville, B. W. and Sutherland, A.J. 1988. "Design method for local scour at bridge piers". J. Hydraul. Eng. 114(10): 1210-1226.

Melville B.W. and Dongol D.M. 1992. "Bridge pier scour with debris accumulation". ASCE, J. Hydraul. Eng., 118(9): 1306-1310

Pagliara S., and Carnacina I. 2010. "Scour and dune morphology in presence of large wood debris accumulation at bridge pier". Dittrich, Koll, Aberle & Geisenhainer (eds). Bundesanstalt für Wasserbau ISBN 978-3-939230-00-7

Pagliara S. and Carnacina L. 2011. "Influence of wood debris accumulation on bridge pier scour". ASCE, J. Hydraul. Eng., 137(2): 254-261

Parola A.C., Mahavadi S.K., Brown B.M and Khoury A.El. 1996. "Effects of rectangular foundation geometry on local pier scour". ASCE, J. Hydraul. Eng., 122(1): 35-40.

Raudkivi, A.J. and Ettema, R. 1983. "Clear-water scour at cylindrical piers". ASCE, J. Hydraul. Eng., 109(3): 339-350.

Vittal N., Kothiyari U.C and Haghghat M. 1994. "Clear-water scour around bridge pier group". ASCE, J. Hydraul. Eng., 120(11): 1309-1318.

شرایط آب صاف در اطراف گروه پایه"، اولین کنگره ملی مهندسی عمران، 22-24 اردیبهشت ماه 1373، دانشگاه صنعتی شریف.

فلاح گلنشینی، ن، ع. ظهیری، م. مفتاح هلقی و الف. دهقانی. (1390). "بررسی آزمایشگاهی تأثیر عمق آب بر حداکثر عمق آب‌شستگی پایه پل در شرایط حضور توده شاخ و برگ"، اولین کنفرانس بین‌المللی و سومین کنفرانس ملی سد و نیروگاه‌های برق‌آبی، تهران، ایران.

مشععی، س. م، م. اسدی آقبلاغی و ح. صمدی. (1394). "بررسی تأثیر تجمع اجسام شناور چوبی، در آب‌شستگی جلوی پایه دایره‌ای شکل دارای سیستم صفحه شمع". نشریه دانش آب و خاک. جلد 25، شماره 2، صص. 141-153.

Breusers N.H.C. and Raudkivi A.J. 1991. "Hydraulic structure design manual: scouring". Vol. 2, Balkema, Rotterdam, Netherlands

Hannah C.R. 1978. "Scour at pile group". University of Canterbury, N. Z. Civil Eng. Research Rep. No. 78.

Jones J.S., Kilgore R.T., and Mistichelli M.P. 1992. "Effect of footing location on bridge pier scour". ASCE, J. Hydraul. Eng., 118(2): 280-290

Lagasse P.F., Clopper P.E., Pagan-Qrtiz J.E., Zevenbergen L.W., Arneson L.A., Schall J.D., and Girard L.G. 2009. "Bridge scour and stream instability countermeasures. experience, selection, and design guidance". FHWA, Hydraulic Engineering Circular No. 23.

Lagasse P.F., Zevenbergen L.W and Clipper P.E. 2010. "Impacts of debris on bridge pier scour".