

## مطالعه آزمایشگاهی تأثیر حضور اجسام شناور بر عمق آب‌شستگی اطراف گروه‌پایه کج مستقر روی سر شمع

احمد زارع گنجاوردی<sup>۱</sup>، محسن مسعودیان<sup>۲</sup> و مهدی اسمعیلی ورکی<sup>۳\*</sup>

۱ و ۲- به ترتیب: دانشجوی دکتری سازه‌های آبی؛ و دانشیار گروه مهندسی آب، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری، ساری، ایران  
۳- دانشیار گروه مهندسی آب، دانشکده علوم کشاورزی، وابسته پژوهشی گروه مهندسی آب و محیط زیست پژوهشکده حوضه آبی دریای خزر دانشگاه گیلان  
تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۴/۶؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۷/۷/۲

### چکیده

رودخانه‌ها در مواقع سیلابی اجسام شناور مانند بقایای درختان و گیاهان را با خود حمل می‌کنند که تجمع آنها مقابل پایه‌های پل می‌تواند با انسداد، تنگ‌کردن یا تغییر دادن مسیر جریان در دهانه‌های پل، تشدید آب‌شستگی در اطراف آن را به همراه داشته باشد و با توسعه عمق آب‌شستگی به زیر پی پل‌ها، تخریب آنها رخ دهد. در تحقیق حاضر تأثیر ابعاد اجسام شناور، تراز کارگذاری و ضخامت سر شمع، آرایش و قطر شمع‌ها بر توسعه زمانی و عمق حداکثر آب‌شستگی در اطراف گروه‌پایه کج بررسی شده است. پایه پل مورد بررسی متشکل است از دو پایه مستطیلی شکل با ابعاد ۲/۵ در ۳/۵ سانتی‌متر که با زاویه ۲۸ درجه روی سر شمع با ضخامت‌های (T<sub>pc</sub>) ۳ و ۵ سانتی‌متر و ابعاد ۱۰ در ۱۶ سانتی‌متر که روی شمع‌هایی با آرایش ۲×۲ و ۲×۳ و قطرهای مختلف نصب گردید. آزمایش‌ها در شرایط آب زلال برای عمق‌های نسبی (نسبت عمق جریان به عرض پایه) ۶/۴۲ و ۷/۸۵، ترازهای نسبی کارگذاری سر شمع (Z/T<sub>pc</sub>)، ۰ و ۱ و ۱/۵، جسم شناور با عرض نسبی (نسبت عرض جسم شناور به عرض پایه) ۲/۸۵، طول‌های نسبی (نسبت طول در راستای جریان جسم شناور به عرض پایه) ۲، ضخامت‌های نسبی جسم شناور (نسبت ضخامت جسم شناور به عرض پایه) ۰/۸۵ و ۱/۴۲، اجرا شده است. مقایسه نتایج به دست آمده نشان می‌دهد در تراز نسبی کارگذاری سر شمع  $Z/T_{pc} = 0$  حضور جسم شناور عمق حداکثر آب‌شستگی را در محدوده هندسه‌های مختلف سر شمع و آرایش شمع‌ها به طور متوسط ۸/۵ درصد نسبت به حالت بدون جسم افزایش می‌دهد. با تغییر تراز کارگذاری سر شمع به  $Z/T_{pc} = 1$  حضور جسم شناور به طور متوسط عمق حداکثر آب‌شستگی را به میزان ۴/۵ درصد نسبت به حالت بدون جسم افزایش می‌دهد. با افزایش تراز کارگذاری سر شمع به  $Z/T_{pc} = 1/5$ ، حضور جسم شناور عمق حداکثر آب‌شستگی را به طور متوسط به میزان ۴ درصد نسبت به حالت بدون جسم شناور افزایش می‌دهد. تجزیه و تحلیل نتایج حاکی از آن است که در شرایط حضور جسم شناور، افزایش عمق جریان بیشتر از ۶/۴۲ عرض پایه تأثیر محسوس بر عمق حداکثر آب‌شستگی ندارد.

### واژه‌های کلیدی

آرایش شمع، تراز کارگذاری پی، ضخامت سر شمع، قطر شمع

### مقدمه

می‌پيوندند: آب‌شستگی عمومی (تغییرات درازمدت بالآمدگی و پایین‌افتادگی بستر رودخانه به‌علت‌های طبیعی یا ناشی از فعالیت‌های انسانی مانند برداشت

در آبراهه‌های طبیعی، بسته به مکانیزم عمل جریان و بستر رسوبی، سه نوع آب‌شستگی به‌وقوع

آب‌شستگی تغییر خواهد کرد. فرآیند آب‌شستگی در حضور گروه‌پایه تحت تأثیر عامل تقویت‌کننده در پایه‌جلویی است که باعث افزایش عمق آب‌شستگی در مجاورت آن می‌شود و عامل حفاظ بودن است که منجر به کاهش سرعت موثر در اطراف پایه‌پایین‌دست و در نتیجه باعث کاهش مقدار آب‌شستگی در محدوده آن می‌گردد (Breusers & Raudkivi, 1991).

نتایج بررسی‌های هانا (Hannah, 1978) در خصوص آب‌شستگی موضعی در گروه شمع استوانه‌ای در شرایط آب زلال نشان می‌دهد که با افزایش فاصله بین پایه‌ها تأثیر عامل تقویت‌کننده کاهش می‌یابد و در شرایطی که فاصله بین پایه‌ها بیش از  $\frac{2}{5}$  برابر قطر پایه باشد، تأثیر گردابه‌نعل‌اسبی به هم فشرده شده ناچیز می‌شود. عطائی، آشتیانی و بهشتی (Ataie-Ashtiani & Beheshti, 2006) با بررسی اثر فاصله بین گروه‌پایه بر عمق آب‌شستگی در محدوده ۱ تا ۴ برابر قطر پایه‌ها، معادله‌ای برای تخمین عمق حداکثر آب‌شستگی پیشنهاد کردند. بررسی نتایج حاکی از آن بود که برای فاصله‌های کم بین پایه‌ها، عمق حداکثر آب‌شستگی حدود دو برابر مقدار متناظر برای پایه منفرد می‌شود. با افزایش فاصله بین پایه‌ها، عمق آب‌شستگی کاهش پیدا می‌کند و برابر با عمق آب‌شستگی در پایه منفرد می‌شود.

شپرد و همکاران (Sheppard *et al.*, 2004) بر اساس مفهوم قطر مؤثر پایه، رابطه‌ای برای تخمین عمق آب‌شستگی گروه پایه‌ها ارائه دادند. علاوه بر مشخصات هندسی پایه‌های پل، آرایش و قطر شمع‌های مستقر در زیر سر شمع نیز نقش مهمی در مقدار نهایی آب‌شستگی دارد. عطائی، آشتیانی و همکاران (Ataie-Ashtiani & Beheshti, 2006)

شن و ماسه)، آب‌شستگی ناشی از تنگ‌شدگی مسیر رودخانه و آب‌شستگی موضعی (اطراف پایه‌ها و تکیه‌گاه‌های پل‌ها و پایین‌دست سازه‌های هیدرولیکی). از این میان، آب‌شستگی اطراف پایه‌های پل و در نظر نگرفتن عمق کافی برای پی آنها به دلیل تأثیر آن در تخریب این نوع از سازه‌ها بر چرخه حمل و نقل و ارتباط‌های زمینی، بسیار با اهمیت است (Lagasse *et al.*, 2009).

با احداث پل در مسیر جریان در رودخانه، به تناسب سرعت آن، گرادیان فشار رو به پایین اطراف پایه پل پدید می‌آید که باعث ایجاد جریان رو به پایین در جلو پایه می‌شود و پس از تداخل با جریان اصلی گردابه‌های نعل‌اسبی تشکیل می‌دهد. در اثر جدایی جریان از اطراف پایه، گردابه‌هایی نیز تشکیل می‌شود که محور آنها عمود بر بستر جریان است و به آنها گردابه‌های برخاستگی اطلاق می‌شود. این گردابه‌ها در کناره و پایین‌دست پایه به وجود می‌آید و به صورت چرخش‌هایی در سطح آب ظاهر می‌گردد. فعالیت این گردابه‌ها مانند گردباد است که ذرات رسوبی را از بستر جدا می‌کند و در معرض جریان قرار می‌دهد. با فعالیت این گردابه‌ها، سرعت موضعی و تنش برشی جریان در مجاورت پایه افزایش می‌یابد و جبهه آب‌شستگی به تدریج در مقابل و طرفین پایه گسترش می‌یابد. حفر گودال آب‌شستگی بر اثر گرداب نعل‌اسبی تا جایی ادامه می‌یابد که عمق گودال، انرژی گردابه‌ها را مستهلک کند و دیگر قادر به فرسایش ذرات بستر در گودال آب‌شستگی نباشد. در این مرحله، عمق حفره آب‌شستگی به تعادل می‌رسد و ثابت می‌ماند (Breusers & Raudkivi, 1991).

با ایجاد گروه پایه‌ها، الگوهای متفاوت دیگری در اطراف پایه‌ها شکل می‌گیرد که در نتیجه آن مقدار

تحقیقات دربارهٔ موقعیت تراز فونداسیون بر عمق حداکثر آبشستگی حاکی از آن است که با قرارگیری فونداسیون در زیر بستر، عمق حداکثر آبشستگی کاهش می‌یابد، (Jones et al., 1992; Lyn et al., 2003; Esmaeili-Varaki et al., 2013). برای شرایطی که تراز فونداسیون در فاصلهٔ بین سطح بستر تا عمق حداکثر آبشستگی به‌ازای تک‌پایه قرار می‌گیرد، عمق آبشستگی بستگی به مقدار گسترش سطح رویی فونداسیون نسبت به پایه دارد. برای شرایطی که فونداسیون بالاتر از بستر مستقر شود، عمق حداکثر آبشستگی افزایش چشم‌گیری پیدا می‌کند (Jones et al., 1992).

امروزه با پیشرفت فناوری طراحی و ساخت سازه‌ها، شاهد ساخت پل‌هایی با شکل‌های گوناگون هستیم از جمله پل‌ها با گروه‌پایه کج. مقایسهٔ تأثیر کج‌شدگی پایه بر تغییرات آبشستگی اطراف گروه‌پایه کج نشان می‌دهد که مقدار آبشستگی در گروه‌پایه کج تا ۵۰ درصد بیشتر از مقدار آبشستگی در حالت تک‌پایه است که دلیل آن تأثیر توأم دو پایه و نیز کج‌شدگی به‌سمت بالادست است (Esmaeili-Varaki & Saadati-Pacheh-Kenari, 2015). حسینی و همکاران (Hoseini et al., 2016) آبشستگی اطراف گروه‌پایه کج مستقر بر گروه‌شمع را به‌صورت آزمایشگاهی بررسی کردند و نشان دادند که تغییر آرایش شمع‌ها از  $2 \times 2$  به  $2 \times 3$  به‌طور متوسط مقدار عمق حداکثر آبشستگی را در قطرهای نسبی (نسبت قطر شمع به عرض پایه) شمع  $0/6$  و  $0/9$  به‌ترتیب  $50$  و  $60$  درصد افزایش می‌دهد. در شرایط کارگذاری سر شمع‌ها هم‌تراز بستر و مدفون، تغییر آرایش و قطر شمع‌ها، تأثیر محسوسی بر عمق حداکثر آبشستگی ندارد. با افزایش ضخامت نسبی سر شمع (نسبت ضخامت

روش‌هایی را که کولمن (Coleman, 2005) در تخمین عمق آبشستگی اطراف گروه شمع‌ها ارائه داده است بررسی کردند و رابطهٔ اصلاحی برای این منظور ارائه دادند.

عبدالدايم و همکاران (Abdeldayem et al., 2011) با تغییر تعداد و فاصلهٔ شمع در آرایش مربعی شکل در دو جهت طولی و عرضی جریان، اثر گروه شمع را در آبشستگی موضعی در اطراف پایه‌های پل مقایسه کردند. تجزیه و تحلیل نتایج نشان داد که برای گروه شمعی که در یک ردیف در جهت جریان قرار داده شود، در صورتی که نسبت فاصلهٔ شمع‌ها مساوی یا بزرگتر از  $6/5$  برابر قطر شمع باشد، آبشستگی برای هر شمع به‌صورت منفرد عمل می‌کند. همچنین زمانی که گروه شمع‌ها در چند ستون و ردیف مرتب شوند با افزایش فاصله بین شمع‌ها عمق آبشستگی کاهش می‌یابد. فرارو و همکاران (Ferraro et al., 2013) اثر ضخامت سر شمع بر عمق حداکثر آبشستگی در پایه‌های مرکب را بررسی کردند و نتیجه گرفتند که به‌طور کلی هرچه سر شمع ضخیم‌تر باشد عمق آبشستگی بیشتر خواهد بود. در شرایطی که سر شمع در بالای بستر قرار دارد، تأثیر ضخامت آن بر عمق آبشستگی با افزایش فاصله بین بالای سر شمع و سطح بستر کاهش می‌یابد. برای یک سر شمع مدفون، تأثیر ضخامت آن بر عمق حداکثر آبشستگی به عمق قرارگیری آن در زیر بستر بستگی دارد. مورنو و همکاران (Moreno et al., 2016) برای ارزیابی سهم هر جزء پایهٔ مرکب (پایه، سر شمع، گروه شمع) در مقابل عمق تعادل آبشستگی کل روشی پیشنهاد دادند، اینکه سهم هر جزء به‌شکلی قابل توجه به موقعیت آن نسبت به سطح بستر و هندسهٔ پایه بستگی دارد.

بیشترین آب‌شستگی را ایجاد می‌کند. پالیارا و کارناسینا (Pagliara & Carnacina, 2010; 2011). با بررسی تأثیر انباشتگی توده اجسام شناور بر گودال آب‌شستگی و ریخت‌شناسی آن، به این نتیجه رسیدند که حداکثر طول و عرض گودال آب‌شستگی به ترتیب ۳ و ۴ برابر حالت بدون تجمع اجسام شناور می‌رسد. این محققان ضمن بررسی تأثیر اجسام شناور با شکل‌های مستطیلی، مثلثی و استوانه‌ای بر آب‌شستگی اطراف پایه‌های پل در شرایط مختلف هیدرولیکی، روشی ساده برای پیش‌بینی عمق آب‌شستگی در شرایط حضور اجسام شناور پیشنهاد دادند. بررسی‌ها نشان می‌دهد تأثیر شکل‌های مستطیلی و مثلثی بر تغییرات عمق حداکثر آب‌شستگی ناچیز است.

مشعشعی و همکاران (Moshashaei *et al.*, 2015)، در بررسی تأثیر تجمع اجسام شناور چوبی شکل بر آب‌شستگی اطراف پایه استوانه‌ای شکل مستقر بر گروه‌شمع، به این نتیجه رسیدند که تجمع اجسام شناور می‌تواند عمق آب‌شستگی را ۱۲ تا ۱۴ برابر نسبت به حالت بدون جسم شناور افزایش دهد. پاسخی‌درگاه و همکاران (Pasokhi-Darghah *et al.*, 2017) با بررسی آزمایشگاهی تأثیر ابعاد اجسام شناور بر مقدار آب‌شستگی اطراف گروه پایه کج مستقر روی فونداسیون نشان دادند که افزایش عمق جریان از ۳/۷ برابر عرض پایه تأثیر محسوسی بر عمق حداکثر آب‌شستگی ندارد و افزایش ضخامت جسم شناور موجب افزایش عمق آب‌شستگی، به‌طور متوسط ۲۹ درصد نسبت به حالت بدون جسم شناور می‌شود ولی افزایش طول نسبی جسم شناور در جهت جریان از ۲ به ۳ برابر عرض پایه، مقدار عمق حداکثر آب‌شستگی را کاهش می‌دهد. برای برآورد عمق حداکثر آب‌شستگی برای گروه‌پایه کج با

سر شمع به عرض پایه) از ۰/۹ به ۱/۴، بیشینه عمق آب‌شستگی برای هندسه و قطرهای مختلف شمع، به‌طور متوسط ۲۰ درصد و با تغییر قطر نسبی شمع‌ها از ۰/۶ به ۰/۹ در ترازهای نسبی کارگذاری سر شمع بالای بستر، مقدار عمق حداکثر آب‌شستگی به‌طور متوسط ۵ و ۱۰ درصد افزایش می‌یابد.

حضور شاخه و برگ و نیز تنه درختان در مواقع سیلابی در رودخانه‌ها و تجمع آنها در جلو پایه‌های پل، با مسدود کردن کامل یا بخشی از دهانه پل، باعث تقویت گردابه‌های اطراف پایه پل و آب‌شستگی بیش از حد در اطراف آن می‌گردد. هندسه و ابعاد جسم شناور بسیار متنوع است و از پشته کوچک در اطراف پایه‌های پل تا انسداد کامل دهانه پل تغییر می‌کند. تحقیقات نشان می‌دهد هندسه اجسام شناور تابعی از خصوصیات فیزیکی آنها، ویژگی‌های جریان، هندسه پل و مجرای جریان است (Lagasse *et al.*, 2010). ملویل و دانگل (Melville & Dongol, 1992) با بررسی تأثیر شکل‌های مختلف جسم شناور شامل استوانه‌ای، بیضی و مخروطی نشان دادند که بیشترین عمق آب‌شستگی برای جسم شناور با شکل استوانه‌ای رخ می‌دهد. همچنین، در حضور توده اجسام شناور، برای نسبت عمق جریان به قطر پایه کوچک‌تر از ۴، عمق آب‌شستگی افزایش می‌یابد و با افزایش این نسبت، مقدار آن سیر نزولی می‌گیرد و سرانجام تأثیر اجسام شناور ناچیز می‌شود. لاگاس و همکاران (Lagasse *et al.*, 2010) می‌گویند بسته به میزان انسداد بر اثر جسم شناور در جلو پایه، ابعاد گردابه‌ها، نسبت به حالت بدون جسم شناور، می‌تواند بزرگ‌تر یا کوچک‌تر باشد. زمانی که اجسام از بعد طولی با پایه در تماس باشند، شکل مستطیلی جسم شناور

### مواد و روش‌ها

#### تحلیل ابعادی

عوامل تأثیرگذار بر آب‌شستگی موضعی اطراف گروه‌پایه کج مستقر بر گروه‌شمع در حضور اجسام شناور مجموعه‌ای از پارامترهای توصیف‌کننده است که اندر کنش این عوامل در مسیر جریان موجب افزایش یا کاهش آب‌شستگی می‌شود. مشخصات نوع سیال و رسوب بستر، هندسه پایه پل، شمع‌ها و اجسام شناور، شرایط هیدرولیکی جریان و مدت زمان از جمله این پارامترها هستند که آنها را می‌توان به صورت رابطه تابعی ۱ نوشت.

$$f_1(y, d_s, D, D_{pc}, T_{pc}, d_p, l_m, l_n, m, n, W_d, T_d, L_d, D_{50}, Z, U, \rho, \mu, g, \sigma_g, \alpha, \beta, t, t_e) = 0 \quad (1)$$

شمع تا تراز بستر اولیه جریان؛  $U$  = سرعت متوسط جریان؛  $\rho$  = چگالی آب؛  $\mu$  = لزوجت دینامیک؛  $g$  = شتاب ثقل؛  $\sigma_g$  = انحراف معیار مصالح رسوبی بستر؛  $\alpha$  = زاویه انحراف پایه‌ها در صفحه موازی جریان؛  $\beta$  = زاویه انحراف پایه‌ها در صفحه عمود بر جریان؛  $t$  = مدت زمان از شروع آب‌شستگی؛ و  $t_e$  = مدت زمان تعادل آب‌شستگی. با به‌کارگیری تئوری باکینگهام در تحلیل ابعادی، رابطه ۱ را می‌توان به صورت رابطه بی‌بعد ۲ نوشت.

$$f_2\left(\frac{Y}{D}, \frac{d_s}{D}, \frac{D_{50}}{D}, \frac{D}{D_{pc}}, \frac{T_{pc}}{D}, \frac{d_p}{D}, \frac{Z}{T_{pc}}, \frac{l}{d_p}, \frac{W_d}{D}, \frac{T_d}{D}, \frac{L_d}{D}, \frac{Ut}{D}, \frac{Ut_e}{D}, Re, Fr, m, n, \sigma_g, \alpha, \beta\right) = 0 \quad (2)$$

جریان و قائم ثابت در نظر گرفته شد. به دلیل آشفتگی بودن جریان، عدد رینولدز در تمام آزمایش‌ها از مقدار ۹۱۰۰ بیشتر بود و از این‌رو تأثیر این پارامتر صرف نظر و رابطه ۲ به صورت رابطه ۳ اصلاح شد.

$$\frac{d_s}{D} = f_3\left(\frac{Y}{D}, Fr, \frac{T_{pc}}{D}, \frac{d_p}{D}, \frac{Z}{d_p}, \frac{l}{d_p}, \frac{W_d}{D}, \frac{T_d}{D}, \frac{L_d}{D}, \frac{tU}{D}, \frac{t_e U}{D}, m, n\right) \quad (3)$$

فونداسیون کارگذاری شده بالاتر از بستر، رابطه‌ای جدید ارائه شده است. حضور اجسام شناور که عموماً به‌هنگام سیلاب رخ می‌دهد، تأثیری چشم‌گیر بر الگوی جریان و عمق حداکثر آب‌شستگی اطراف پایه‌های پل ایجاد کند. تاکنون تحقیقی در خصوص تأثیر ابعاد هندسی جسم شناور بر عمق آب‌شستگی اطراف گروه‌پایه کج مستقر روی سر شمع صورت نگرفته است، از این‌رو هدف از تحقیق حاضر بررسی تأثیر توام تراز کارگذاری سر شمع و ضخامت آن، آرایش و قطر شمع‌ها و حضور اجسام شناور با ابعاد مختلف بر عمق آب‌شستگی در اطراف گروه‌پایه کج در شرایط مختلف هیدرولیکی است.

که در آن،  $Y$  = عمق جریان؛  $d_s$  = عمق آب‌شستگی؛  $D$  = عرض پایه پل؛  $D_{pc}$  = عرض سر شمع؛  $T_{pc}$  = ضخامت سر شمع؛  $d_p$  = قطر شمع؛  $l_m$  = فاصله طولی شمع‌ها؛  $l_n$  = فاصله عرضی شمع‌ها؛  $m$  = تعداد شمع در یک ردیف؛  $n$  = تعداد شمع در یک ستون؛  $W_d$  = عرض جسم شناور؛  $T_d$  = ضخامت جسم شناور؛  $L_d$  = طول جسم شناور؛  $D_{50}$  = قطری که ۵۰ درصد ذرات از آن کوچک‌تر است؛  $Z$  = فاصله سر

با توجه به شرایط آزمایشگاهی در تحقیق حاضر، از میان پارامترهای مؤثر بر آب‌شستگی پایه پل، پارامتر انحراف معیار هندسی ذرات رسوبی به دلیل یکنواختی رسوبات انتخاب شده و زاویه‌های پایه‌های پل در صفحه

## آماده‌سازی تجهیزات آزمایشگاهی

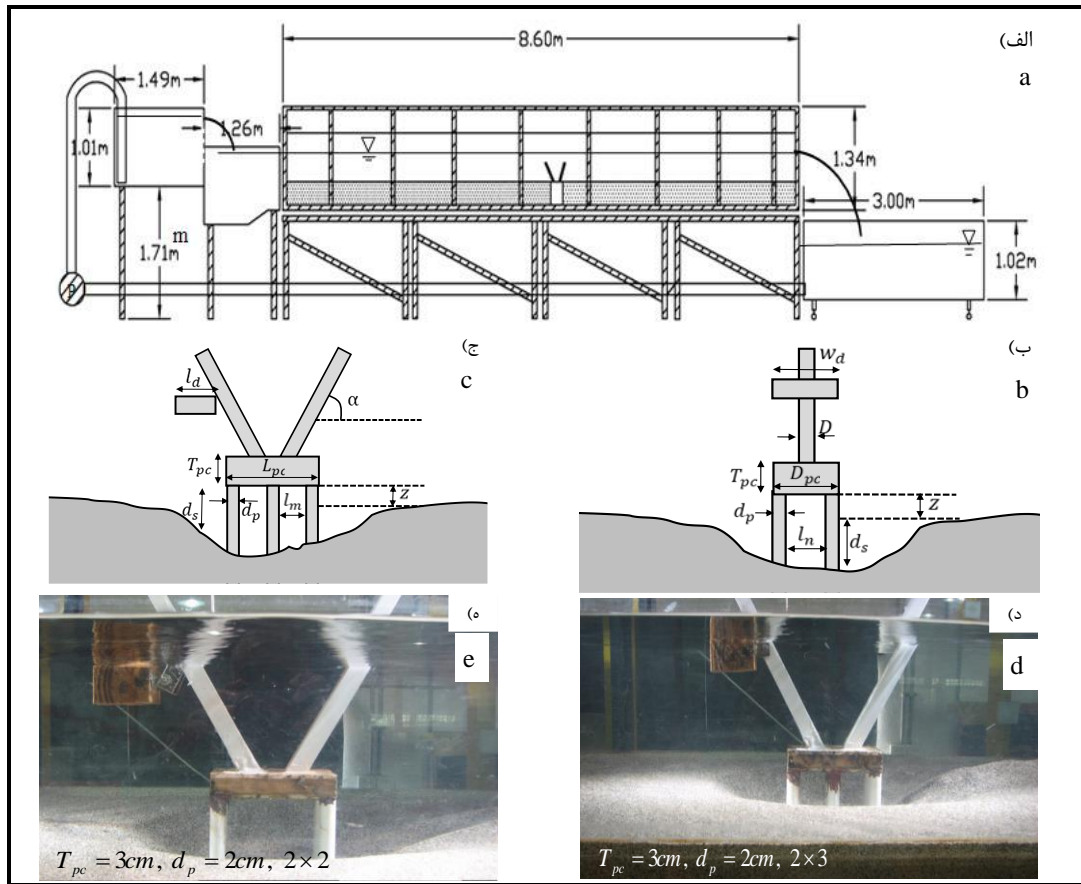
آزمایش‌های تحقیق حاضر در آزمایشگاه هیدرولیک و مدل‌های فیزیکی هیدرولیکی گروه مهندسی آب دانشگاه گیلان و در فلومی مستطیلی با سیستم بازچرخانی به طول ۸/۶ متر، عرض ۰/۸۹ متر و عمق ۱ متر با دیواره‌هایی از جنس شیشه و کف آهنی، اجرا شد (شکل ۱-الف).

برای تأمین دبی جریان از پمپ سانتریفیوژ استفاده شد که دبی جریان را تا ۷۰ لیتر بر ثانیه تأمین کند. با توجه اهمیت بسیار بالای تنظیم دقیق دبی در آزمایش‌ها، از یک دستگاه کنترل‌کننده دور موتور استفاده شد که امکان تنظیم دقیق دبی جریان را با حداقل اتلاف وقت فراهم می‌کرد. جریان خروجی از پمپ ابتدا وارد مخزن اولیه و پس از عبور از سرریز مثلثی برای اندازه‌گیری دبی وارد مخزن آرام‌کننده پایین دست می‌شود و با عبور از مسقیم‌ساز جریان در خروجی این مخزن، وارد فلوم می‌گردد. برای حصول اطمینان از توسعه‌یافتگی جریان قبل از رسیدن به پایه پل، محل نصب پایه ۵ متر بعد از ورودی فلوم انتخاب گردید.

گروه پایه مورد بررسی از دو پایه مستطیلی شکل از جنس آلومینیم به طول ۲/۵ و عرض ۳/۵ سانتی‌متر تشکیل شد که با زاویه ۲۸ درجه روی سر شمع مستطیلی از جنس پلاستیک فشرده به طول و عرض ۱۰ و ۱۶ سانتی‌متر نصب شده بود. در انتخاب مقیاس سعی شد ابعاد نهایی پایه به‌گونه‌ای باشد که ضوابط از قبل تعیین شده در خصوص تأثیرناپذیر بودن مقدار آب‌شستگی از عرض فلوم، رعایت شود. طبق نظر رادکیوی و اتما (Raudkivi & Ettema, 1983)، چنانچه نسبت عرض فلوم به عرض پایه از ۶/۲۵ بیشتر باشد، دیواره‌های فلوم تأثیری بر مقدار آب‌شستگی نخواهند داشت. این نسبت برای پایه و سر شمع پل مورد بررسی در فلوم آزمایشگاهی به ترتیب ۲۵ و ۹ است. شمع‌های مورد استفاده از لوله‌هایی با جنس

پلی‌اتیلن در قطرهای ۲ و ۳ سانتی‌متر تهیه و در قالب آرایش‌های ۲×۲ و ۲×۳ در زیر سر شمع نصب گردیدند (شکل ۱-ب و ج). بر اساس تحقیقات لاگاس و همکاران (Lagasse et al., 2010)، زبری و تخلخل توده اجسام تأثیری چندانی 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. از این رو برای اجرای آزمایش‌ها، به این عوامل توجه شد و اجسام شناور با عرض نسبی (نسبت عرض جسم شناور به عرض پایه) ۲/۸۵، طول نسبی (نسبت طول در راستای جریان جسم شناور به عرض پایه) ۲، ضخامت‌های نسبی (نسبت ضخامت جسم شناور به عرض پایه) ۰/۸۵ و ۱/۴۲، در شرایط آب زلال کار گذاشته 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 & Sutherland, 1988)، نسبت عرض پایه به قطر ذرات رسوبی باید از ۲۵-۲۰ بیشتر باشد. رادکیوی و اتما (Raudkivi & Ettema, 1983) نیز معتقدند برای جلوگیری از تشکیل شکنج در سرعت‌های نزدیک به آستانه حرکت، قطر رسوبات باید از ۰/۷ میلی‌متر بیشتر باشد. از این رو رسوبات مورد استفاده در این تحقیق با قطر یکنواخت ۰/۷ میلی‌متر در نظر گرفته شد که از ماسه معدنی تهیه و در بازه‌ای به طول ۱/۵ متر، ضخامت ۰/۳ متر در فاصله ۵ متری از ابتدای کانال قرار داده شد که محدوده مورد مطالعه برای آب‌شستگی پایه پل بود. برای شبیه‌سازی بهتر بستر رسوبی کانال، ب‌الادست و پایین دست بازه مورد مطالعه از رسوبات درشت‌دانه باقی‌مانده در مرحله الک کردن، استفاده گردید.



شکل ۱- الف) طرح کلی فلوم آزمایشگاهی، ب) نمای روبه‌رو از پارامترهای هندسی گروه پایه و عمق آب‌شستگی در حضور اجسام شناور، ج) نمای جانبی از پارامترهای هندسی و عمق آب‌شستگی در حضور اجسام شناور، د) نمای جانبی از گروه پایه کج در تراز کارگذاری سر شمع  $Z/T_{pc} = 1$  و ه) نمای جانبی از گروه پایه کج در تراز کارگذاری سر شمع  $Z/T_{pc} = 1/5$

Figure 1- a) Schematic view of experimental flume, b and c) Frontal and lateral view of geometric parameters of piers group and scour depth in presence of debris, d) Lateral view of inclined bridge piers group at pile cape installation level of  $Z/T_{pc}=1$  and e) Lateral view of inclined bridge piers group at pile cape installation level of  $Z/T_{pc}=1.5$

۲۴ ساعته کمتر از ۵ درصد قطر پایه باشد. رادکیوی و اتما (Raudkivi & Ettema, 1983)، مدت زمان تعادل را این‌گونه می‌دانند که در سه ساعت متوالی بیش از یک میلی‌متر آب‌شستگی رخ ندهد. در پژوهش حاضر از معیار ملویل و چيو (Melville & Chiew, 1999) برای تعیین مدت زمان تعادل استفاده شد. برای این منظور، ابتدا با آزمایشی به مدت ۷۲ ساعت و با سرعت نسبی ۰/۹۵ تغییرات عمق آب‌شستگی با استفاده از عمق سنج با دقت ۰/۱ میلی‌متر اندازه‌گیری شد.

نتایج به‌دست آمده نشان داد که بعد از گذشت ۲۴ ساعت از شروع آزمایش، تغییرات عمق

لازم بود سرعت آستانه حرکت برای قطر رسوبات مورد استفاده مشخص شود. بنابراین برای شرایط مختلف عمق و دبی، وضعیت آستانه حرکت ذرات بررسی و مقدار متوسط سرعت جریان برای آستانه حرکت ۰/۲۷ متر بر ثانیه تعیین گردید. مقایسه نتایج به‌دست آمده با دیاگرام شیلدز و روابط تجربی، مطابقت مطلوبی را نشان می‌دهد. تعیین مدت زمان تعادل در مطالعه آب‌شستگی اهمیت ویژه‌ای دارد. محققان معیارهای مختلفی برای تعیین مدت زمان تعادل پیشنهاد کرده‌اند. ملویل و چيو (Melville & Chiew, 1999) می‌گویند مدت زمان تعادل، زمانی است که میزان آب‌شستگی طی دوره‌ای

با افزایش عمق جریان و فاصله گرفتن جسم شناور از بستر، به تدریج کاهش می‌یابد. مقایسه مقادیر عمق لحظه‌ای آب‌شستگی برای ضخامت نسبی سر شمع  $0.85/0.57$  و قطر نسبی شمع  $0.57/0.85$  در تراز نسبی کارگذاری فونداسیون  $Z/T_{pc} = 0$  نشان می‌دهد که متوسط مقادیر اندازه‌گیری لحظه‌ای عمق آب‌شستگی در زمان بی‌بعد  $3 \times 10^4$ ، برای جسم شناور با ضخامت نسبی  $0.85/0.42$  و  $0.42/0.85$  در آرایش‌های  $2 \times 2$  و  $2 \times 3$  به میزان ۷ تا ۳۴ درصد در زمان بی‌بعد  $6 \times 10^4$  در محدوده ۸ تا ۳۶ درصد افزایش می‌یابد. با افزایش ضخامت نسبی سر شمع به  $0.42/0.85$ ، مقادیر اندازه‌گیری لحظه‌ای عمق آب‌شستگی در زمان  $3 \times 10^4$  برای جسم شناور با ضخامت نسبی  $0.85/0.42$  و  $0.42/0.85$  در آرایش‌های  $2 \times 2$  و  $2 \times 3$  به میزان ۵ تا ۲۵ درصد و در زمان بی‌بعد  $6 \times 10^4$  در محدوده ۶ تا ۳۰ درصد افزایش می‌یابد.

مقایسه مقادیر عمق لحظه‌ای آب‌شستگی برای ضخامت نسبی سر شمع  $0.85/0.57$  و ضخامت نسبی شمع  $0.57/0.85$  در تراز نسبی کارگذاری فونداسیون  $Z/T_{pc} = 1$  نشان می‌دهد متوسط مقادیر اندازه‌گیری لحظه‌ای عمق آب‌شستگی در زمان بی‌بعد  $3 \times 10^4$ ، برای جسم شناور با ضخامت نسبی  $0.85/0.42$  و  $0.42/0.85$  در آرایش‌های  $2 \times 2$  و  $2 \times 3$  به میزان ۱۲ تا ۳۰ درصد و در زمان بی‌بعد  $6 \times 10^4$  در محدوده ۸ تا ۲۷ درصد افزایش می‌یابد. مقایسه نتایج حاکی از آن است که متوسط مقادیر اندازه‌گیری لحظه‌ای عمق آب‌شستگی در زمان بی‌بعد  $3 \times 10^4$  برای جسم شناور با ضخامت نسبی  $0.85/0.42$  و  $0.42/0.85$  سر شمع  $0.42/0.85$  در آرایش‌های  $2 \times 2$  و  $2 \times 3$  به میزان ۱۳ تا ۴۰ درصد و در زمان بی‌بعد  $6 \times 10^4$  در محدوده ۹ تا ۳۰ درصد افزایش می‌یابد. بررسی مقادیر عمق لحظه‌ای آب‌شستگی برای ضخامت نسبی سر شمع  $0.85/0.57$  و ضخامت نسبی شمع  $0.57/0.85$  در تراز نسبی کارگذاری فونداسیون  $Z/T_{pc} = 1/5$  نشان می‌دهد متوسط مقادیر اندازه‌گیری لحظه‌ای

آب‌شستگی کمتر از ۵ درصد قطر پایه است. بنابراین، مدت زمان تعادل برای کل آزمایش‌ها ۲۴ ساعت در نظر گرفته شد. در هر یک از آزمایش‌ها، ابتدا با تعیین دبی جریان برای سرعت نسبی  $0.95/0.85$  سرعت جریان متناظر با آستانه حرکت و عمق مورد نظر، آب به تدریج و به آرامی به فلووم وارد و بعد از تنظیم دبی، عمق مورد نظر در کانال با مانور دریچه انتهایی برقرار گردید. در همه آزمایش‌ها تغییرات آب‌شستگی به مدت ۷ ساعت، که تقریباً ۸۵ درصد آب‌شستگی در این مدت زمان رخ می‌دهد، به صورت پیوسته با استفاده از عمق‌سنج نقطه‌ای با دقت  $\pm 0.1$  میلی‌متر اندازه‌گیری شد. عمق حداکثر آب‌شستگی بعد از قطع آزمایش با استفاده از متر لیزری مدل Leica-DISTO D3a با دقت  $\pm 1$  میلی‌متر اندازه‌گیری شد. برای بررسی تأثیر توام تراز کارگذاری سر شمع، آرایش شمع‌ها و ابعاد اجسام شناور بر تغییرات عمق آب‌شستگی، در مجموع ۱۲۰ آزمایش شامل ضخامت‌های نسبی سر شمع  $(T_{pc}/D)$   $0.85/0.42$  و  $0.42/0.85$ ، قطر نسبی شمع  $(d_p/D)$   $0.57/0.85$  و  $0.85/0.42$ ، ضخامت نسبی جسم شناور  $(T_d/D)$   $0.85/0.42$  و  $0.42/0.85$ ، آرایش شمع‌ها  $2 \times 2$  و  $2 \times 3$ ، عمق نسبی جریان  $(Y/D)$   $6/42$  و  $7/85$  و ترازهای نسبی کارگذاری سر شمع  $(Z/T_{pc}) = 0$ ،  $1$  و  $1/5$  اجرا شد.

## نتایج و بحث

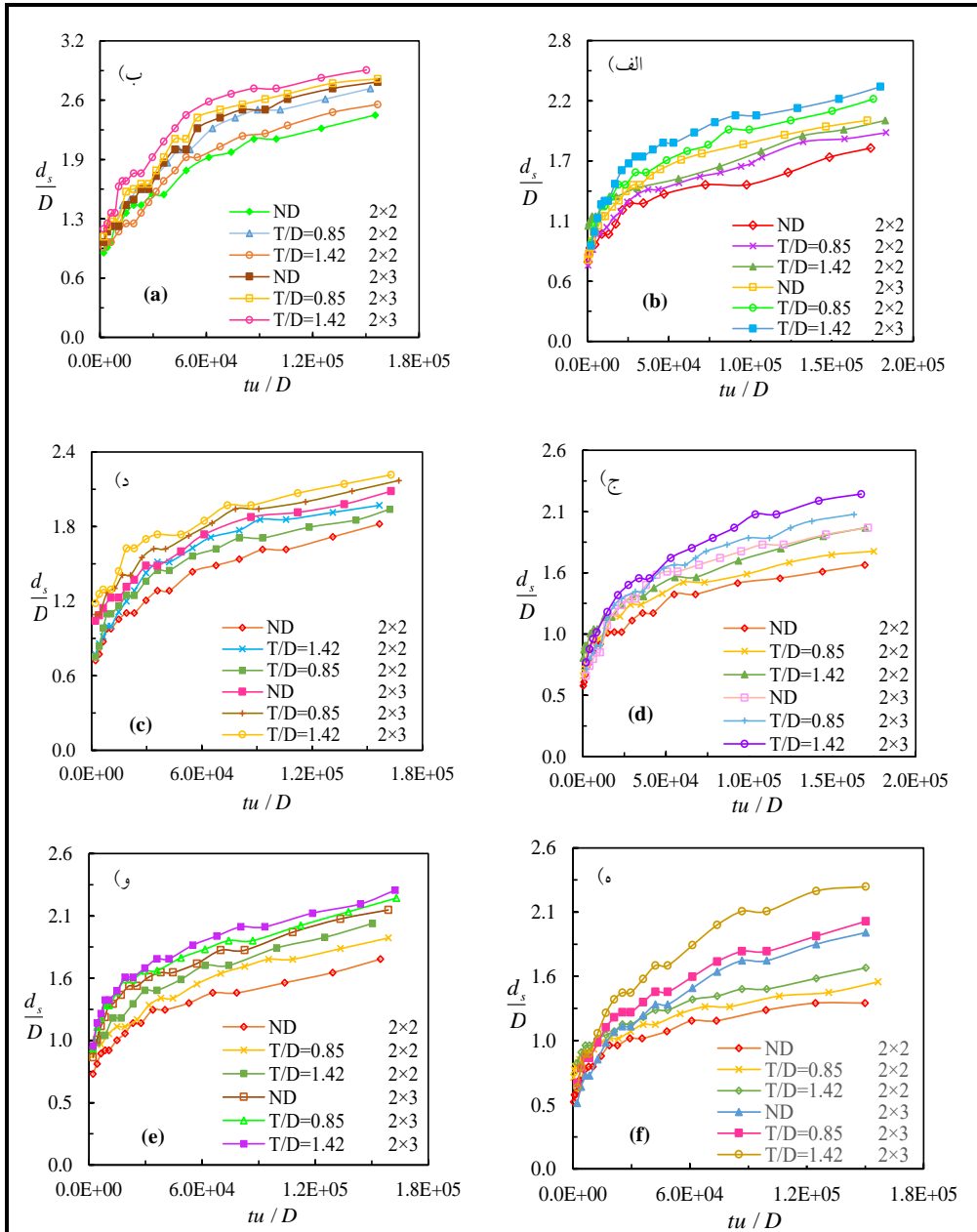
### بررسی الگوی جریان و توسعه زمانی عمق آب‌شستگی

نتایج حاصل از اندازه‌گیری لحظه‌ای عمق آب‌شستگی برای ضخامت‌های سر شمع، آرایش‌های مختلف گروه شمع، ابعاد جسم شناور و ترازهای کارگذاری مختلف، در نمودارهای شکل ۲ نشان داده شده است. در این نمودارها مشاهده می‌شود که حضور جسم شناور مقدار لحظه‌ای عمق آب‌شستگی را افزایش می‌دهد. مقایسه نتایج به‌دست آمده همچنین نشان می‌دهد اختلاف مقدار لحظه‌ای عمق آب‌شستگی، در شرایط با و بدون حضور جسم شناور،



اندازه‌گیری لحظه‌ای عمق آب‌شستگی در زمان بی‌بعد  $3 \times 10^4$  برای جسم شناور با ضخامت نسبی  $0/85$  و  $1/42$  در آرایش‌های  $2 \times 2$  و  $2 \times 3$  به‌میزان  $4$  تا  $34$  درصد و در زمان بی‌بعد  $6 \times 10^4$  در محدوده  $8$  تا  $34$  درصد افزایش می‌یابد.

عمق آب‌شستگی در زمان بی‌بعد  $3 \times 10^4$  برای جسم شناور با ضخامت نسبی  $0/85$  و  $1/42$  در آرایش‌های  $2 \times 2$  و  $2 \times 3$  به‌میزان  $6$  تا  $33$  درصد و در زمان بی‌بعد  $6 \times 10^4$  در محدوده  $5$  تا  $45$  درصد افزایش می‌یابد. در ضخامت نسبی سر شمع  $1/42$ ، متوسط مقادیر



شکل ۲- توسعه زمانی عمق حداکثر لحظه‌ای آب‌شستگی برای شرایط با و بدون جسم شناور در تراز نسبی کارگذاری سر شمع و

عمق‌های مختلف، الف)  $Z/T_{pc}=0$  و  $T_{pc}/D=0/85$  (ب)  $Z/T_{pc}=0$  و  $T_{pc}/D=1/42$  (ج)  $Z/T_{pc}=1$  و  $T_{pc}/D=0/85$ ،

د)  $Z/T_{pc}=1$  و  $T_{pc}/D=1/42$ ، ه)  $Z/T_{pc}=1.5$  و  $T_{pc}/D=0/85$ ، و)  $Z/T_{pc}=1.5$  و  $T_{pc}/D=1/42$

Figure 2- Temporal variation of maximum scour depth for non-debris and presence of debris at different installation level of pile cap and flow depths, a)  $Z/T_{pc}=0$  and  $T_{pc}/D=0.85$ , b)  $Z/T_{pc}=0$  and  $T_{pc}/D=1.42$ , c)  $Z/T_{pc}=1$  and  $T_{pc}/D=0.85$ , d)  $Z/T_{pc}=1$  and  $T_{pc}/D=1.42$ , e)  $Z/T_{pc}=1.5$  and  $T_{pc}/D=0.85$ , f)  $Z/T_{pc}=1.5$  and  $T_{pc}/D=1.42$ ,

است. از آنجا که با تغییر ضخامت سر شمع، فاصله پایه‌ها از بستر بیشتر می‌شود، بررسی توام این پارامتر با سایر پارامترهای هندسی ممکن نیست. از این‌رو نتایج به تفکیک ضخامت‌های سر شمع ارائه خواهد شد.

در شکل ۶ و جدول ۱، مقایسه مقادیر عمق حداکثر آب‌شستگی در ضخامت نسبی سر شمع ۰/۸۵ آورده شده است. مقایسه مقادیر عمق حداکثر آب‌شستگی برای ضخامت نسبی سر شمع ۰/۸۵ در تراز نسبی  $Z/T_{pc} = 0$  حاکی از آن است که حضور جسم شناور با ضخامت‌های نسبی ۰/۸۵ و ۱/۴۲، آرایش شمع ۲×۲ و قطر نسبی شمع ۰/۵۷ در محدوده عمق‌های مورد بررسی باعث افزایش عمق حداکثر آب‌شستگی به میزان ۱۷ تا ۲۲ درصد شده است. مقایسه نتایج عمق حداکثر آب‌شستگی با حضور جسم شناور حاکی از آن است که افزایش عمق نسبی جریان از ۶/۴۲ به ۷/۸۵ به دلیل فاصله گرفتن جسم شناور از بستر، طول مسیر جریان پایین‌رونده افزایش می‌یابد و از اثر تقویت‌کننده آنها بر گردابه‌های اطراف پایه‌ها کاسته می‌شود. از این‌رو، عمق حداکثر آب‌شستگی به‌طور متوسط ۲ درصد کاهش می‌یابد.

نتایج به‌دست آمده نشان می‌دهد که با تغییر آرایش شمع‌ها از ۲×۲ به ۲×۳ در قطر نسبی شمع ۰/۵۷، مقدار عمق حداکثر آب‌شستگی برای اجسام شناور با ضخامت‌های مورد بررسی به‌طور متوسط ۸ درصد بیشتر و با افزایش عمق نسبی جریان از ۶/۴۲ به ۷/۸۵ در آرایش ۲×۳ و حضور جسم شناور، مقدار عمق حداکثر آب‌شستگی به‌طور متوسط ۲ درصد کمتر می‌شود. نتایج عمق حداکثر آب‌شستگی برای ضخامت نسبی سر شمع ۰/۸۵ در تراز نسبی  $Z/T_{pc} = 1$  نشان می‌دهد که در قطر نسبی شمع ۰/۵۷ با حضور جسم شناور با ضخامت نسبی ۰/۸۵، در آرایش‌های ۲×۲ و ۲×۳ مقدار عمق حداکثر آب‌شستگی به‌طور متوسط ۵

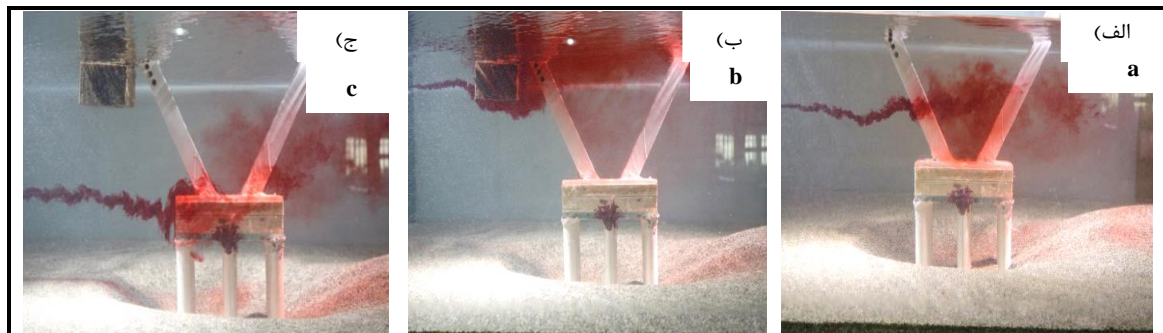
به‌منظور درک بهتر تأثیر اجسام شناور بر الگوی جریان نزدیک‌شونده به پایه‌های پل، از تزریق ماده رنگی برای آشکارسازی جریان استفاده شد که نمونه‌ای از تصویرهای تهیه شده برای عمق نسبی  $Y/D = 6/42$  و  $Y/D = 7/85$  در شکل‌های ۳ و ۴ نشان داده شده است. مشاهدات آزمایشگاهی نشان می‌دهد که با قرارگیری جسم شناور در جلو پایه، بخشی از میدان حرکت جریان توسط جسم شناور مسدود و جریان پس از برخورد به جسم شناور به سمت وجه پایین‌دست آن منحرف می‌شود. به‌عبارت دیگر، حضور جسم شناور موجب می‌شود انحراف خطوط جریان از سطح به عمق از فاصله‌ای دورتر از پایه آغاز و در نتیجه محدوده تغییرات میدان جریان و تنش برشی از فاصله دورتر از پایه آغاز شود. با تداخل خطوط جریان منحرف‌شده به زیر جسم شناور با جریان برخوردی به پایه، قدرت گردابه‌های نعل‌اسبی افزایش می‌یابد و عمق آب‌شستگی در جلو پایه بیشتر می‌شود. در شکل ۵، تأثیر عمق جریان بر الگوی جریان نزدیک‌شونده به گروه پایه مورد بررسی نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که با افزایش عمق جریان و در نتیجه بیشتر شدن فاصله جسم شناور نسبت به بستر، طول مسیر برخورد جریان پایین‌رونده به سمت پایه و بستر افزایش می‌یابد و در نتیجه می‌توان انتظار داشت که از اثر آن بر افزایش قدرت گردابه‌های نعل‌اسبی کاسته می‌شود. پاسخی درگاه و همکاران (Pasokhi-Darghah et al., 2017) نیز به این موضوع اشاره کرده‌اند. علاوه بر این، با افزایش تراز کارگذاری سر شمع امکان عبور جریان از زیر آن و ایفای نقش شمع‌ها از نظر آرایش و قطر مهیا می‌شود.

### مقایسه نتایج عمق حداکثر آب‌شستگی

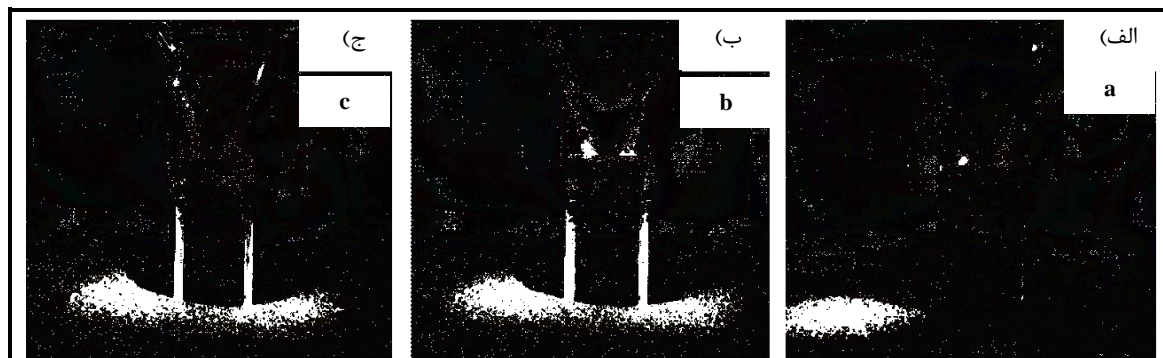
یکی از متغیرهای هندسی مورد بررسی در تحقیق حاضر، تأثیر ضخامت سر شمع

درصد افزایش می‌یابد و با افزایش ضخامت نسبی جسم شناور به ۱/۴۲، مقدار افزایش عمق حداکثر آب‌شستگی نسبت به حالت بدون جسم شناور به‌طور متوسط به ۹ درصد می‌رسد. علاوه‌براین، با افزایش عمق نسبی جریان به ۷/۸۵، عمق حداکثر آب‌شستگی در آرایش‌های مختلف با حضور جسم شناور با ضخامت نسبی ۰/۸۵ و ۱/۴۲ به‌طور متوسط ۲/۷ و ۳/۷ درصد به‌ترتیب در عمق‌های نسبی جریان ۶/۴۲ و ۷/۸۵ افزایش می‌یابد.

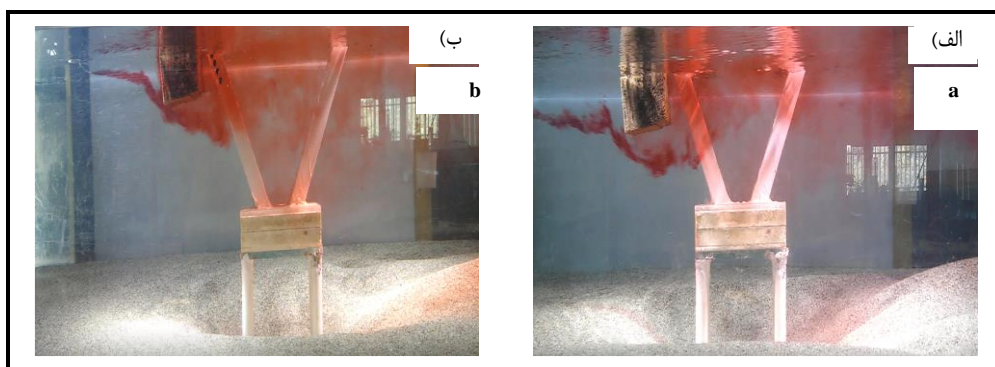
درصد افزایش می‌یابد و با افزایش ضخامت نسبی جسم شناور به ۱/۴۲، مقدار افزایش عمق حداکثر آب‌شستگی نسبت به حالت بدون جسم شناور به‌طور متوسط به ۹ درصد می‌رسد. علاوه‌براین، با افزایش عمق نسبی جریان به ۷/۸۵، عمق حداکثر آب‌شستگی در آرایش‌های مختلف با حضور جسم شناور با ضخامت نسبی ۰/۸۵ و ۱/۴۲ به‌طور متوسط



شکل ۳- نمایی از آشکارسازی جریان نزدیک‌شونده به گروه‌پایه کج در  $Y/D=6.42$  و  $Z/T_{pc}=1.5$  a) بدون جسم شناور، b) تزریق هم‌تراز جسم شناور و c) تزریق در تراز سر شمع  
Figure 3- View of approaching flow visualization at  $Y/D=6.42$  and  $Z/T_{pc}=1.5$  a) No-debris, b) Dye injection at same level of debris and c) Dye injection at same level of pile cap



شکل ۴- نمایی از آشکارسازی جریان نزدیک‌شونده به گروه‌پایه کج در  $Y/D=7.85$  و  $Z/T_{pc}=1.5$  a) بدون جسم شناور، b) تزریق هم‌تراز جسم شناور و c) تزریق در تراز سر شمع  
Figure 4- View of approaching flow visualization at  $Y/D=7.85$  and  $Z/T_{pc}=1.5$  a) No-debris, b) Dye injection at same level of debris and c) Dye injection at same level of pile cap



شکل ۵- آشکارسازی جریان برای اعماق مختلف جریان در حضور جسم شناور با ضخامت نسبی ۱/۴۲

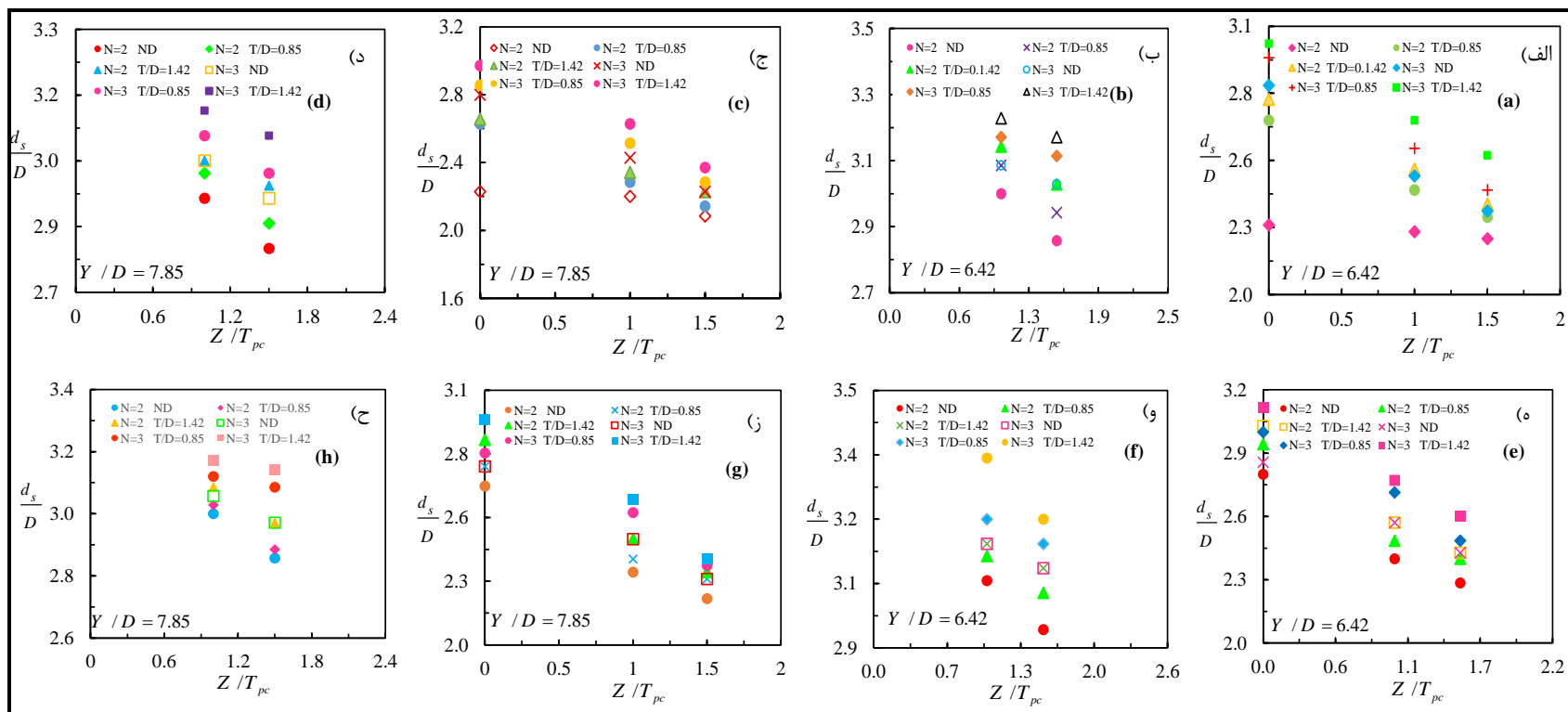
الف)  $Y/D=6.42$  و ب)  $Y/D=7.85$

Figure 5- Flow visualization for different flow depth in presence of debris with relative thickness of 1.42  
a)  $Y/D=6.42$  and b)  $Y/D=7.85$

جدول ۱- مقایسه تأثیر پارامترهای هندسی و هیدرولیکی بر عمق حداکثر آب‌شستگی در ضخامت نسبی سر شمع ۰/۸۵

Table 1. Comparison of geometric and hydraulic parameters effect on for relative thickness of pile cap of 0.85

درصد افزایش عمق		ضخامت نسبی		تراز کارگذاری سر شمع		
آب‌شستگی در	آب‌شستگی در	سر شمع	قطر نسبی شمع	آرایش شمع‌ها	جسم شناور	شمع
$Y/D=7.85$	$Y/D=6.42$	Relative thickness of pile cap $T_{pc}/D$	Relative pile diameter $d_p/D$	Pile arrangement	Relative thickness of debris $(T_d/D)$	Installation level of pile cap
17	18	0.85	0.57	2×2	0.85	$Z/T_{pc}=0$
2	4	0.85	0.57	2×3		
19	22	0.85	0.57	2×2	1.42	
6	7	0.85	0.57	2×3		
3.5	4.5	0.85	0.57	2×2	0.85	
3.8	5	0.85	0.57	2×3		
1.9	2.8	0.85	0.85	2×2		
2	2.9	0.85	0.85	2×3		
6.4	8.6	0.85	0.57	2×2	1.42	$Z/T_{pc}=1$
8.2	9	0.85	0.57	2×3		
3	3.8	0.85	0.85	2×2		
3.8	4.8	0.85	0.85	2×3		
2.7	3.8	0.85	0.57	2×2	0.85	
2.5	3.6	0.85	0.57	2×3		
2	3	0.85	0.85	2×2		
2	2.8	0.85	0.85	2×3		
6	6.4	0.85	0.57	2×2	1.42	$Z/T_{pc}=1.5$
6.4	9	0.85	0.57	2×3		
5	6	0.85	0.85	2×2		
4	4.7	0.85	0.85	2×3		



شکل ۶- مقایسه عمق حداکثر نهایی آب‌شستگی در شرایط با و بدون جسم شناور در ترازهای کارگذاری نسبی سر شمع مختلف و ضخامت نسبی سر شمع ۰/۸۵ و ۰/۵۷ (الف)  $Y/D=6.42$  و  $d_p/D=0.57$  (ب)  $Y/D=6.42$  و  $d_p/D=0.85$  (ج)  $Y/D=7.85$  و  $d_p/D=0.57$  (د)  $Y/D=7.85$  و  $d_p/D=0.85$  و ضخامت نسبی سر شمع ۰/۴۲، ۰/۵۷ (ه)  $Y/D=6.42$  و  $d_p/D=0.57$  (و)  $Y/D=6.42$  و  $d_p/D=0.85$  (ز)  $Y/D=7.85$  و  $d_p/D=0.57$  (ح)  $Y/D=7.85$  و  $d_p/D=0.85$

Figure 6- Comparison of maximum scour depth at non-debris and presence of debris at different installation level of pile cap and relative thickness of pile cap of 0.85, a)  $Y/D=6.42$  and  $d_p/D=0.57$ , b)  $Y/D=6.42$  and  $d_p/D=0.85$ , c)  $Y/D=7.85$  and  $d_p/D=0.57$ , d)  $Y/D=7.85$  and  $d_p/D=0.85$ , and relative thickness of pile cap of 1.42 e)  $Y/D=6.42$  and  $d_p/D=0.57$ , f)  $Y/D=6.42$  and  $d_p/D=0.85$ , g)  $Y/D=7.85$  and  $d_p/D=0.57$ , h)  $Y/D=7.85$  and  $d_p/D=0.85$ ,

۶ درصد بیشتر می‌کند و افزایش عمق نسبی جریان از ۶/۴۲ به ۷/۸۵ در شرایط حضور جسم شناور، مقدار عمق حداکثر آبشستگی را به‌طور متوسط ۱/۵ درصد کاهش می‌دهد. در تراز نسبی کارگذاری سر شمع  $Z/T_{pc}=1$  و ضخامت نسبی سر شمع به ۰/۸۵، حضور جسم شناور با ضخامت نسبی ۰/۸۵ منجر شده است که عمق حداکثر آبشستگی برای قطر نسبی شمع ۰/۵۷ در آرایش‌های  $2 \times 2$  و  $2 \times 3$ ، به‌ترتیب ۳/۵ و ۵ درصد افزایش یابد و با افزایش ضخامت نسبی جسم شناور به ۱/۴۲، میزان افزایش عمق حداکثر آبشستگی به‌طور متوسط به ۷ درصد برسد.

تجزیه و تحلیل نتایج نشان می‌دهد که با افزایش عمق نسبی جریان از ۶/۴۲ به ۷/۸۵ در شرایط حضور جسم شناور، عمق حداکثر آبشستگی به‌طور متوسط ۴/۶ درصد کاهش می‌یابد. همچنین با افزایش قطر نسبی شمع به ۰/۸۵، عمق حداکثر آبشستگی در حضور جسم شناور با ضخامت‌های نسبی ۰/۸۵ و ۱/۴۲ به‌طور متوسط ۳/۲ درصد در آرایش‌های  $2 \times 2$  و  $2 \times 3$  افزایش می‌یابد.

برای ضخامت نسبی سر شمع به ۱/۴۲، با افزایش تراز نسبی کارگذاری سر شمع به  $Z/T_{pc}=1/5$  حضور جسم شناور با ضخامت‌های نسبی ۰/۸۵ و ۱/۴۲ در محدوده عمق‌های جریان مورد بررسی، عمق حداکثر آبشستگی را به‌طور متوسط ۵/۶ درصد در آرایش  $2 \times 2$  و قطر نسبی شمع ۰/۵۷ افزایش می‌دهد. افزایش عمق نسبی جریان از ۶/۴۲ به ۷/۸۵ موجب کاهش آبشستگی به‌میزان ۱/۲ درصد شده است.

تجزیه و تحلیل نتایج نشان می‌دهد که با افزایش تعداد شمع‌ها از  $2 \times 2$  به  $2 \times 3$  در قطر نسبی شمع ۰/۵۷، عمق حداکثر آبشستگی برای اجسام شناور با ضخامت‌های مورد بررسی به‌طور متوسط ۵ درصد نسبت به آرایش  $2 \times 2$

با افزایش تراز نسبی کارگذاری سر شمع با ضخامت نسبی ۰/۸۵ به  $Z/T_{pc}=1/5$ ، امکان عبور بیشتر جریان از زیر سر شمع فراهم می‌شود. در نتیجه، میزان انسداد فضای مذکور توسط شمع‌ها تأثیر زیادی بر مکانیزم‌های اثرگذار بر آبشستگی دارد. نتایج به‌دست آمده همچنین نشان می‌دهد که با حضور جسم شناور با ضخامت‌های مختلف، عمق حداکثر آبشستگی در شرایط مذکور به‌طور متوسط ۵/۱ درصد در آرایش  $2 \times 2$  و قطر نسبی شمع ۰/۵۷ افزایش می‌یابد. مقایسه نتایج حاکی از آن است که در شرایط حضور جسم شناور، با افزایش عمق نسبی جریان از ۶/۴۲ به ۷/۸۵، عمق آبشستگی به‌میزان ۲ درصد کاهش می‌یابد. تجزیه و تحلیل نتایج نشان می‌دهد که با افزایش تعداد شمع‌ها از  $2 \times 2$  به  $2 \times 3$  در قطر نسبی شمع ۰/۵۷، مقدار عمق حداکثر آبشستگی برای اجسام شناور با ضخامت‌های مورد بررسی به‌طور متوسط ۶/۷ درصد نسبت به آرایش  $2 \times 2$  افزایش می‌یابد. با افزایش قطر نسبی شمع‌ها به ۰/۸۵ و در نتیجه افزایش میزان انسداد در محدوده زیر تراز سر شمع، حضور جسم شناور با ضخامت‌های نسبی ۰/۸۵ و ۱/۴۲ در آرایش‌های  $2 \times 2$  و  $2 \times 3$ ، میزان عمق حداکثر آبشستگی را نسبت به حالت بدون جسم شناور به‌طور متوسط ۴ درصد افزایش می‌دهد. روند کاهش عمق حداکثر آبشستگی در شرایط افزایش عمق جریان توأم با حضور جسم شناور مشابه با هندسه‌های قبل است و به‌طور متوسط ۱ درصد مقدار آبشستگی را کاهش می‌دهد.

با افزایش ضخامت نسبی سر شمع به ۱/۴۲، میزان انسداد جریان بر اثر اجزای گروه پایه کج بیشتر می‌شود. جدول ۲ نشان می‌دهد که در قطر نسبی شمع ۰/۵۷ و تراز نسبی کارگذاری سر شمع  $Z/T_{pc}=0$  حضور جسم شناور با ضخامت‌های نسبی ۰/۸۵ و ۱/۴۲، عمق حداکثر آبشستگی را به‌میزان

بدون جسم شناور به طور متوسط ۳/۵ درصد افزایش می دهد. روند کاهش عمق حداکثر آبشستگی در شرایط افزایش عمق جریان مشابه با هندسه های قبل است و به طور متوسط ۱ تا ۲ درصد مقدار آبشستگی را کاهش می دهد.

افزایش می یابد. با افزایش قطر نسبی شمع ها به ۰/۸۵ و در نتیجه افزایش میزان انسداد در محدوده زیر تراز سر شمع، حضور جسم شناور با ضخامت های نسبی ۰/۸۵ و ۱/۴۲ در آرایش های ۲×۲ و ۲×۳، میزان عمق حداکثر آبشستگی را نسبت به حالت

جدول ۲- مقایسه تأثیر پارامترهای هندسی و هیدرولیکی بر عمق حداکثر آبشستگی در ضخامت نسبی سر شمع ۱/۴۲

Table. 2- Comparison of geometric and hydraulic parameters effect on for relative thickness of pile cap of 1.42

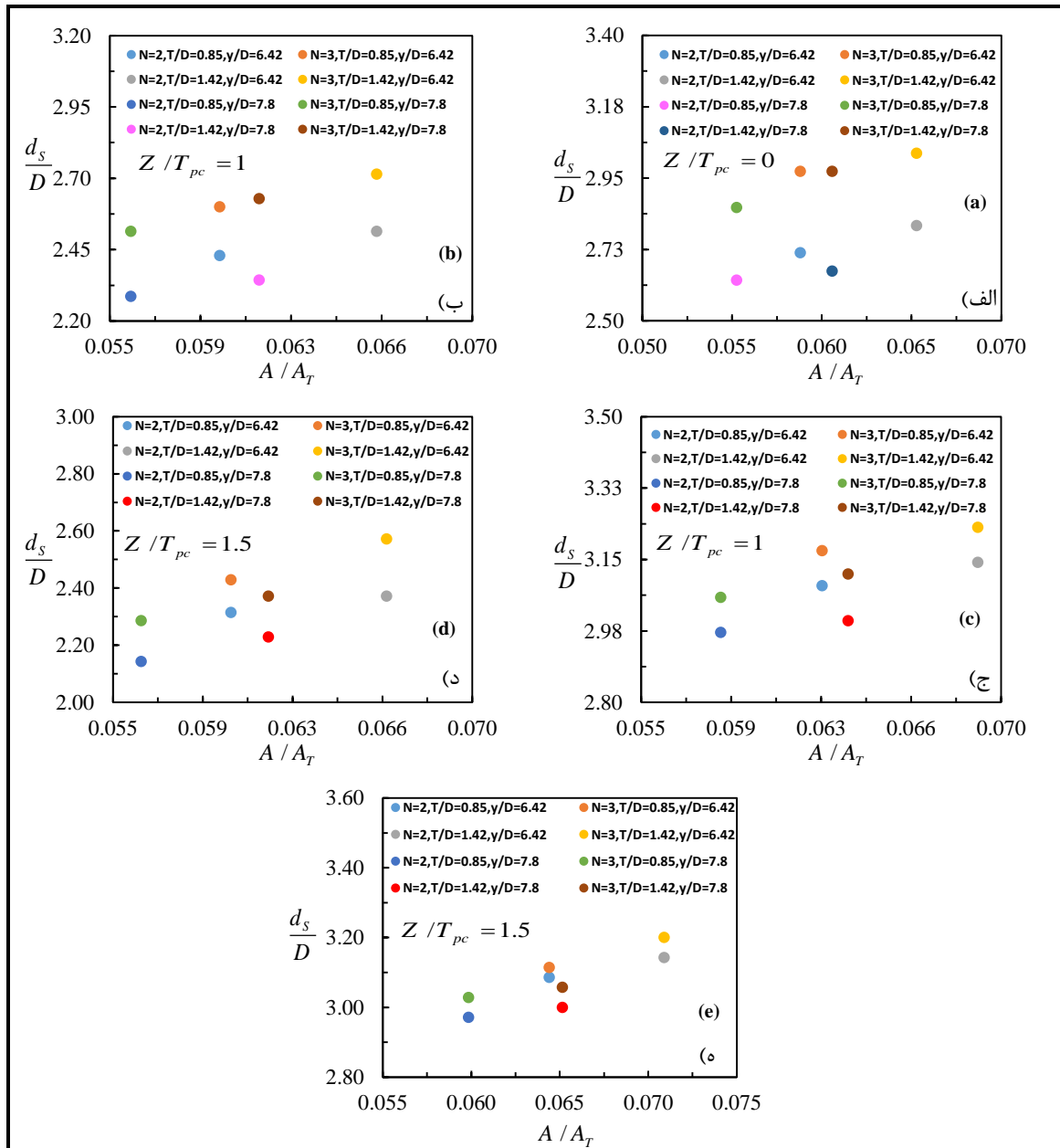
درصد افزایش عمق در صد افزایش عمق		ضخامت نسبی	قطر نسبی شمع	آرایش شمع ها	ضخامت نسبی	تراز کارگذاری سر شمع
آبشستگی در	آبشستگی در	سر شمع	Relative pile diameter	Pile arrangement	جسم شناور	Installation level of pile cap
Y/D=۷/۸۵	Y/D=۶/۴۲	Relative thickness of pile cap	d <sub>p</sub> /D		Relative thickness of debris	
Rate of increase of scour depth for Y/D=7.85	Rate of increase of scour depth for Y/D=6.42	T <sub>pc</sub> /D			(T <sub>a</sub> /D)	
2.1	5.1	1.42	0.57	2×2	0.85	Z/T <sub>pc</sub> =۰
2	3.9	1.42	0.57	2×3		
6.3	8	1.42	0.57	2×2		
6	7.8	1.42	0.57	2×3		
2.4	3.5	1.42	0.57	2×2	0.85	Z/T <sub>pc</sub> =۱
4	5	1.42	0.57	2×3		
1	2	1.42	0.85	2×2		
1.5	3	1.42	0.85	2×3		
6	7.1	1.42	0.57	2×2	1.42	Z/T <sub>pc</sub> =۱/۵
6	7	1.42	0.57	2×3		
2	3	1.42	0.85	2×2		
3.7	6.5	1.42	0.85	2×3		
3.8	5	1.42	0.57	2×2	0.85	Z/T <sub>pc</sub> =۱/۵
2	2.5	1.42	0.57	2×3		
1	2.9	1.42	0.85	2×2		
2	2.8	1.42	0.85	2×3		
5	6.3	1.42	0.57	2×2	1.42	Z/T <sub>pc</sub> =۱/۵
3	7	1.42	0.57	2×3		
4	4.8	1.42	0.85	2×2		
3	3.7	1.42	0.85	2×3		

افزایش تراز نسبی کارگذاری سر شمع به ۱/۵، محدوده تغییرات عمق نسبی حداکثر آبشستگی به ۲/۱-۲/۵ تغییر می یابد. نتایج نشان می دهد در قطر نسبی شمع ۰/۸۵ با تغییر تراز نسبی کارگذاری سر شمع از ۱ به ۱/۵ و افزایش مساحت مقطع عبوری جریان از زیر سر شمع، تغییرات عمق حداکثر آبشستگی از محدوده ۳-۳/۳ به ۲/۹-۳/۲ کاهش

در شکل های ۷ و ۸ میزان تأثیر درصد انسداد بر عمق حداکثر آبشستگی نسبی برای اجسام شناور مختلف نشان داده شده است. برای ضخامت نسبی سر شمع ۰/۸۵ و قطر نسبی شمع ۰/۵۷ با تغییر تراز نسبی کارگذاری سر شمع از ۰ به ۱ تغییرات عمق نسبی حداکثر آبشستگی از محدوده ۲/۶۰-۳/۰۲ به محدوده ۲/۲-۲/۷ کاهش می یابد و با

می‌یابد. برای ضخامت نسبی سر شمع ۱/۴۲ و قطر نسبی شمع ۰/۵۷ با تغییر تراز نسبی کارگذاری سر شمع از ۰ به ۱، تغییرات عمق حداکثر نسبی آبشستگی از محدوده ۲/۷-۳/۱ به محدوده ۲/۳-۲/۷ کاهش می‌یابد. با افزایش تراز نسبی به ۱/۵

محدوده تغییرات عمق حداکثر آبشستگی به ۲/۲-۲/۶ کاهش می‌یابد. برای قطر نسبی شمع ۰/۸۵ با تغییر تراز نسبی کارگذاری سر شمع از ۱ به ۱/۵، محدوده تغییرات عمق حداکثر آبشستگی از محدوده ۳-۳/۳ به ۲/۹-۳/۲ تغییر می‌یابد.



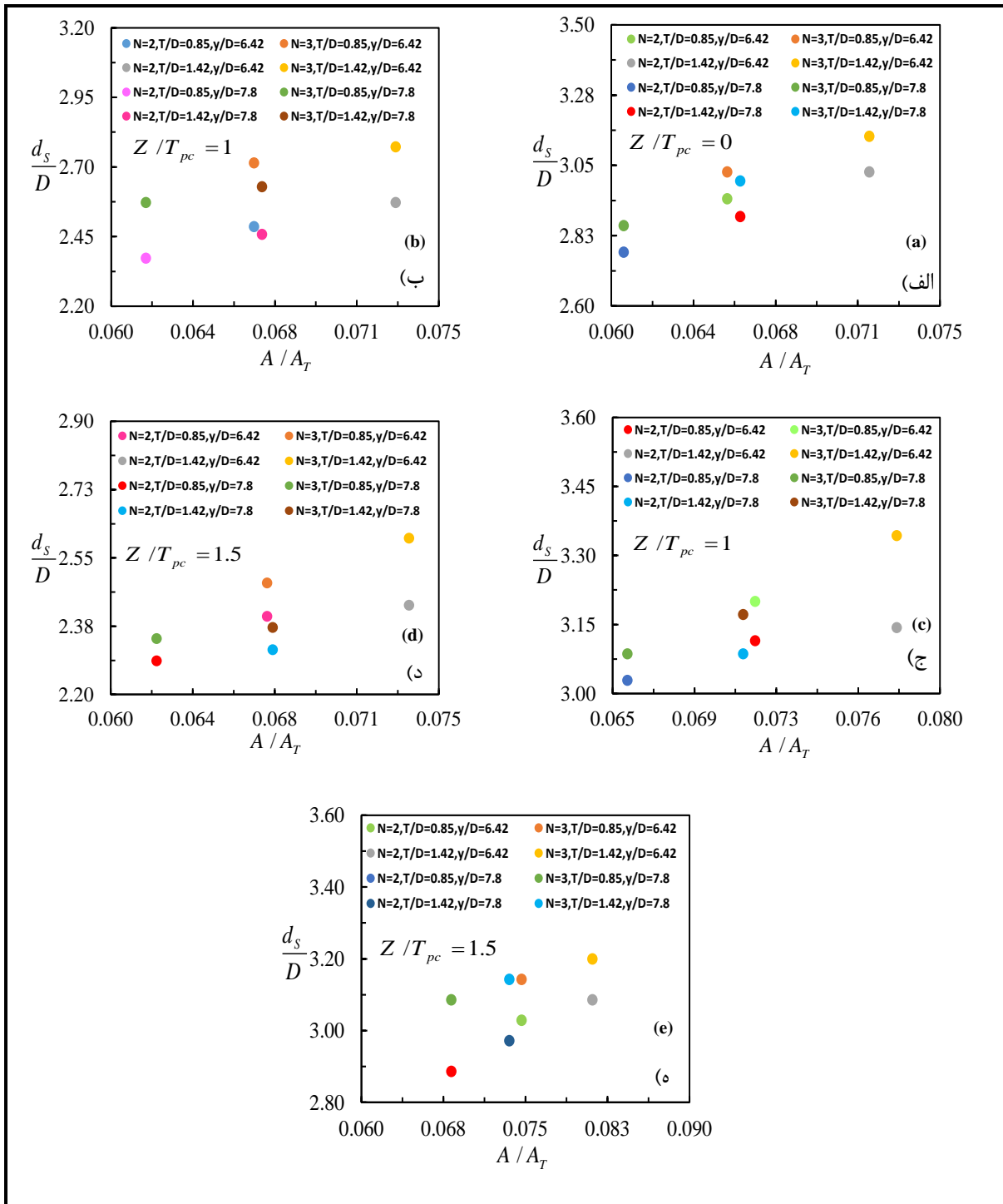
شکل ۷- تأثیر درصد انسداد بر عمق حداکثر آبشستگی برای ضخامت نسبی سر شمع  $T_{pc}/D=0.85$

(الف)  $Z/T_{pc}=0, dp/D=0.57$  (ب)  $Z/T_{pc}=1, dp/D=0.57$  (ج)  $Z/T_{pc}=1, dp/D=0.85$  (د)  $Z/T_{pc}=1.5, dp/D=0.57$

(ه)  $Z/T_{pc}=1.5, dp/D=0.85$

Figure 7- Effect of blockage percentage on the maximum scour depth at relative thickness of pile cap of  $T_{pc}/D=0.85$ , a)  $Z/T_{pc}=0$  and  $d_p/D=0.57$ , b)  $Z/T_{pc}=1$  and  $d_p/D=0.57$ , c)  $Z/T_{pc}=1$  and  $d_p/D=0.85$ , d)  $Z/T_{pc}=1.5$  and  $d_p/D=0.57$ , and e)  $Z/T_{pc}=1.5$  and  $d_p/D=0.85$





شکل ۸- تأثیر درصد انسداد بر عمق حداکثر آب‌شستگی برای ضخامت نسبی سر شمع  $T_{pc}/D=1/42$  (الف)،  $Z/T_{pc}=0$ ،  $d_p/D=0.57$  (الف)،  $Z/T_{pc}=1$ ،  $d_p/D=0.57$  (ب)،  $Z/T_{pc}=1$ ،  $d_p/D=0.85$  (ج)،  $Z/T_{pc}=1.5$ ،  $d_p/D=0.57$  (د)،  $Z/T_{pc}=1.5$ ،  $d_p/D=0.85$  (ه)

Figure 8- Effect of blockage percentage on the maximum scour depth at relative thickness of pile cap of  $T_{pc}/D=1.42$ , a)  $Z/T_{pc}=0$  and  $d_p/D=0.57$ , b)  $Z/T_{pc}=1$  and  $d_p/D=0.57$ , c)  $Z/T_{pc}=1$  and  $d_p/D=0.85$ , d)  $Z/T_{pc}=1.5$  and  $d_p/D=0.57$ , and e)  $Z/T_{pc}=1.5$  and  $d_p/D=0.85$

**نتیجه‌گیری**

آب‌شستگی در محدوده ۲/۵۵ تا ۲/۶۷ می‌شود. با افزایش ضخامت نسبی سر شمع به ۱/۴۲، حضور جسم شناور در تراز کارگذاری سر شمع  $Z/T_{pc}=0$  تغییر عمق نسبی حداکثر آب‌شستگی از ۳/۰۴ به ۳/۲ را در پی خواهد داشت. با تغییر تراز نسبی کارگذاری سر شمع به ۱، مقدار عمق نسبی حداکثر آب‌شستگی در حضور جسم شناور به‌طور متوسط از ۲/۷۴ به ۲/۸۵ تغییر می‌یابد. در تراز نسبی کارگذاری سر شمع  $Z/T_{pc}=1/5$  حضور جسم شناور به‌طور متوسط موجب تغییر عمق حداکثر آب‌شستگی از ۲/۶۲ به ۲/۷۳ می‌شود.

به‌عنوان جمع‌بندی کلی، محدوده تغییرات عمق نسبی حداکثر آب‌شستگی تا  $d_s/D$  ۳/۲ در شرایط مختلف هندسی و هیدرولیکی مورد بررسی حاصل شد. از نظر طراحی، انتخاب این نسبت اگرچه محافظه‌کارانه است ولی به دلیل آنکه بسیاری از رودخانه‌ها در معرض افت تراز بستر در اثر عوامل مختلف طبیعی و انسانی هستند، می‌تواند به‌عنوان عاملی پیش‌گیرانه برای جلوگیری از تخریب پل‌ها عمل کند.

در تحقیق حاضر تأثیر حضور جسم شناور بر عمق حداکثر آب‌شستگی اطراف گروه‌پایه کج مستقر روی سر شمع و گروه شمع، بررسی شده است. نتایج حاصل از آزمایش‌ها حاکی از آن است که برای عمق‌های کمتر جریان، میزان تأثیر جسم شناور بر آب‌شستگی پایه پل بیشتر است و با افزایش عمق جریان و فاصله گرفتن جسم شناور از بستر، از تأثیر آن بر عمق آب‌شستگی اطراف گروه‌پایه کاسته می‌شود. مقایسه نتایج عمق حداکثر آب‌شستگی برای ضخامت نسبی سر شمع ۰/۸۵ در تراز نسبی کارگذاری سر شمع  $Z/T_{pc}=0$  نشان می‌دهد که حضور جسم شناور به‌طور متوسط موجب تغییر عمق نسبی حداکثر آب‌شستگی ( $d_s/D$ ) از ۲/۵۲ به ۲/۸۲ می‌شود. با افزایش تراز نسبی کارگذاری سر شمع به ۱، مقدار عمق نسبی حداکثر آب‌شستگی در حضور جسم شناور به‌طور متوسط از ۲/۶۷ به ۲/۸ افزایش می‌یابد. مقایسه نتایج عمق حداکثر آب‌شستگی در  $Z/T_{pc}=1/5$  نشان می‌دهد که حضور جسم شناور به‌طور متوسط موجب تغییر عمق نسبی حداکثر

**مراجع**

- Abdeldayem, A. W., Elsaed, G. H. and Ghareeb, A. A. 2011. The effect of pile group arrangements on local scour using numerical models. *Adv. Nat. Appl. Sci.* 5(2): 141-146.
- Ataie-Ashtiani, B. and Beheshti, A. A. 2006. Experimental investigation of clear-water local scour at pile groups. *J. Hydraul. Eng.*, 132(10): 1100-1104.
- Breusers, N. H. C. and Raudkivi, A. J. 1991. *Hydraulic Structure Design Manual: Scouring*. Vol. 2. Balkema, Rotterdam, Netherlands.
- Coleman, S. E. 2005. Clearwater local scour at complex piers. *J. Hydraul. Eng.* 131(4): 330-334.
- Esmaili-Varaki, M. Mosapoor, S. and Hatam Jafari, M. 2013. Experimental study the effect of geometric factors on local scour characteristics around inclined bridge pier groups with foundation. *Iranian Water Res. J.* 7(13): 141-151. (in Persian)
- Esmaili-Varaki, M. and Saadati-Pacheh-Kenari, S. S. 2015. Investigating experimentally the effect of installation of piers group on foundation on scour depth around bridge piers. *J. Water Soil.* 25(4.2): 27-39. (in Persian)
- Ferraro, D., Tafarjnoruz, 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.* 139 (5): 482-491.
- Hannah, C. R. 1978. *Scour at Pile Group*. Civil Engineering Research Report No.78. University of Canterbury.

- Hoseini, S., Esmaeili-Varaki, M. and Fazleola, R. 2016. Experimental investigation of scour around inclined bridge piers group based on piles group. *J. Water Soil.* 26(4.2): 135-147. (in Persian).
- Jones, J. S., Kilgore, R. T. and Mistichelli, M. P. 1992. Effect of footing Location on bridge pier scour. *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. Third Ed. Vol. 2. Publication No. FHWA-NHI-09-111. Hydraulic Engineering Circular No. 23. U. S. Department of Transportation, Federal Highway Administration.
- Lagasse, P. F., Zevenbergen, L. W and Clipper, P. E. 2010. Impacts of debris on bridge pier scour. International Conference on Scour and Erosion (ICSE-5) Scour and Erosion. Nov. 7-10. San Francisco, California.
- 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. Report No. FHWA/IN/JTRP/10. West Lafayette, IN 47906.
- Melville, B. W. and Chiew, Y. M. 1999. Time scale for local scour at bridge piers. *J. Hydraul. Eng.* 125(1): 59-65.
- Melville, B. W. and Dongol, D. M. 1992. Bridge pier scour with debris accumulation. *J. Hydraul. Eng.* 118(9): 1306-1310.
- Melville, B. W. and Sutherland, A. J. 1988. Design method for local scour at bridge piers. *J. Hydraul. Eng.* 114(10): 1210-1226.
- Moreno, M., Maia, R. and Couto, L. 2016. Prediction of equilibrium local scour depth at complex bridge piers. *J. Hydraul. Eng.* 142(11): doi.org/10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.0001153.
- Moshashaei, S. M., Asadi-Aghbalagi, M. and Samadi-Brojeni, H. 2015. Study the effect of accumulation of wood floating in front of the circle pier with pile. *J. Water Soil.* 25(2): 141-153. (in Persian)
- Pagliara, S. and Carnacina, I. 2010. Scour and dune morphology in presence of large wood debris accumulation at bridge pier. Proceedings of the International Conference on Fluvial Hydraulics. Sep. 8-10. Braunschweig, Germany.
- Pagliara, S. and Carnacina, L. 2011. Influence of wood debris accumulation on bridge pier scour. *J. Hydraul. Eng.* 137(2): 254-261.
- Pasokhi-Dargah. Z., Esmaeili-Varaki, M. and Shafiei-Sabet, B. 2017. Experimental study of local scour around inclined bridge pier groups in presence of debris accumulation under various hydraulic conditions and installation of foundation level. *Iranian J. Hydraul.* 12(1): 59-75.
- Raudkivi, A. J. and Ettema, R. 1983. Clear-water scour at cylindrical piers. *J. Hydraul. Eng.* 109(3): 339-350.
- Sheppard, D. M., Odeh, M. and Glasser, T. 2004. Large-scale clear-water local pier scour experiments. *J. Hydraul. Eng.* 130(10): 957-963.

## **Experimental Study of Local Scour around Inclined Bridge Pier Groups Based on Capped Piles in Presence of Debris Accumulation**

**A. Zare-Ganjaroodi, M. Masoudian and M. Esmaili-Varaki\***

\*Corresponding Author: Associate Professor, Department of Water Engineering, Faculty of Agricultural Science, Department of water and Environmental Engineering, Caspian Sea Basin Research Center, Rasht, Iran.  
Email: esmaeili.varaki@yahoo.com, esmaeili@guilan.ac.ir.  
Received: 27 June 2018, Accepted: 24 September 2018

### **Abstract**

Rivers during floods carry branches, leaves and trunks of trees that their accumulation in front of bridges, change the flow pattern and accelerate the scouring process around bridge piers by blocking the entire or part of the bridge span. In this case, intensification in scour depth and development of scour hole beneath lead collapsing the bridges with shallow foundation. In this paper, the effects of debris dimensions, pile cape thickness and installation levels, array and diameter piles on the maximum scour depth around inclined bridge pier groups were investigated experimentally. The bridge pier, consisting of two rectangular piers were used with 2.5 and 3.5 cm dimensions mounting at an angle of 28 degrees on a pile cap with 10 cm width, 16 cm length, 3 and 5cm thickness which placed on an array of  $2 \times 2$  and  $2 \times 3$  piles with different diameters. The experiments were performed for relative flow depth ( $y/D$ ) 6.42, 7.85, relative pile cap levels ( $Z/T_{pc}$ ) 0, 1, 1.5, relative debris width and 2.85 and length 2, the relative thickness 0.85 and 1.42, in clear water condition. Comparison of results proved that the increasing flow depth had no significant effect on maximum scour depth. Results also showed that in presence of the debris for pile cap relative level  $Z/T_{pc}=0$ , the maximum scour depth increased about 8.5%, comparing with no debris. For pile cap relative level  $Z/T_{pc}=1$ , presence of the debris increased the maximum scour depth up to 4.5% compared to no debris. By increasing the pile cap relative level to 1.5, presence of the debris caused an increase in the maximum scour depth about 4%, comparing with no debris.

**Keyword:** Diameter Piles, Pile Arrangement, Pile Cap Level, Pile Cape Thickness