

## مطالعه آزمایشگاهی آبشستگی اطراف گروه پایه کج مستقر بر گروه شمع

سیده سمیرا حسینی<sup>۱</sup>، مهدی اسمعیلی ورکی<sup>۲\*</sup>، رامین فضل‌اولی<sup>۳</sup>

تاریخ دریافت: ۹۴/۰۷/۲۸

تاریخ پذیرش: ۹۵/۰۷/۱۷

<sup>۱</sup> دانشجوی کارشناسی، گروه مهندسی آب، دانشگاه منابع طبیعی و کشاورزی ساری

<sup>۲</sup> استادیار گروه مهندسی آب و وابسته پژوهشی گروه مهندسی آب و محیط زیست پژوهشکده حوضه آبی دریای خزر دانشگاه گیلان

<sup>۳</sup> استادیار گروه مهندسی آب دانشگاه منابع طبیعی و کشاورزی ساری

\* مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: esmaeili.varaki@yahoo.com

### چکیده

در تحقیق حاضر تغییرات عمق آبشستگی اطراف گروه پایه کج مستقر بر گروه شمع در شرایط مختلف تراز کارگذاری و ضخامت سرشمع، آرایش و قطر شمع‌ها، به صورت آزمایشگاهی بررسی شد. گروه پایه مورد بررسی متشکل از دو پایه کج مستطیلی بود که با زاویه ۲۸ درجه بر روی سر شمع نصب گردید. آزمایش‌ها روی گروه شمع‌ها با قطرهای نسبی (نسبت قطر شمع به قطر پایه  $d_p / D$ ) ۰/۶ و ۰/۹، در آرایش ۲×۲ و ۲×۳ و برای دو ضخامت نسبی سر شمع ( $T_{PC} / D$ ) ۰/۹ و ۱/۴ و نیز ترازهای نسبی مختلف کارگذاری سر شمع ( $Z / T_p$ ) ۱، ۱/۵، ۱، ۰/۵، صفر و در حالت مدفون ۰/۷- و ۱/۲- انجام شد. مقایسه نتایج بیشینه عمق آبشستگی نشان داد که با تغییر آرایش شمع‌ها از ۲×۲ به ۲×۳ به طور متوسط مقدار بیشینه عمق آبشستگی در قطرهای نسبی شمع ۰/۶ و ۰/۹ به ترتیب ۵۰ و ۶۰ درصد افزایش می‌یابد. در شرایط کارگذاری سرشمع‌ها هم‌تراز بستر و مدفون، تغییر آرایش و قطر شمع‌ها، تأثیر محسوسی بر بیشینه عمق آبشستگی نداشت. بررسی نتایج مربوط به ضخامت سرشمع حاکی از آن است که برای ترازهای نسبی کارگذاری سر شمع بالای بستر، با افزایش ضخامت نسبی سرشمع از ۰/۹ به ۱/۴، مقدار بیشینه عمق آبشستگی برای هندسه و قطرهای مختلف شمع، به طور متوسط ۲۰ درصد افزایش می‌یابد. همچنین با افزایش قطر شمع‌ها از ۰/۶ به ۰/۹ در ترازهای نسبی کارگذاری سرشمع بالای بستر، مقدار بیشینه عمق آبشستگی در آرایش‌های شمع ۲×۲ و ۲×۳، به طور متوسط ۵ و ۱۰ درصد افزایش یافت.

واژه‌های کلیدی: آبشستگی، تراز سرشمع، گروه پایه کج، گروه شمع‌ها، پل

## Experimental Investigation of Scour around Inclined Bridge Piers Group Based on Piles Group

SS Hosseini<sup>1</sup>, M Esmaili Varaki\*<sup>2</sup>, R Fazleola<sup>3</sup>

Received: 20 October 2015

Accepted: 02 October 2016

<sup>1</sup>M.Sc. Student, Water Eng. Dept., Univ. of Agricultural and Natural Resources Science of Sari, Iran

<sup>2</sup>Assist. Prof., Water Eng. Dept and Water Eng. and Enviro. Dept. of CSBRC., Univ. of Guilan, Iran

<sup>3</sup>Assist. Prof., Water Eng. Dept., Univ. of Agricultural and Natural Resources Science of Sari, Iran

\* Corresponding Author, Email: esmaeili.varaki@yahoo.com

### Abstract

In this research, the effects of pile cap thickness and its top level of installation, arrangement and diameter of piles on variation of local scour around the inclined bridge piers group were investigated experimentally. A Physical model of piers group having two inclined rectangular piers with 28 degrees inclination angle was constructed on a pile cap. Experiments were performed on piles group with relative diameters ( $d_p/D$ ) of 0.6 and 0.9, piles arrangement of 2×2 and 2×3, relative pile cap thicknesses ( $T_{pc}/D$ ) of 0.9 and 1.4 and the pile cap relative installation levels ( $Z/T_p$ ) of 1.5, 1, 0.5, 0 and also its buried condition at the level of -0.7 and -1.2. Comparison of the maximum scour depth indicated that the change of pile arrangement from 2×2 to 2×3 caused 50 and 60 percent increases in the scour depth related to the ratio of  $d_p/D$  with the amount of 0.6 and 0.9, respectively. However, changes of the pile diameter and arrangement did not have any effect on the maximum scour depth as pile cap installed in the same level of bed or lower than it i.e. in buried condition. Comparison of the results showed that changes of the pile cap thickness from 0.9 to 1.4 times the pier width, caused the maximum scour depth for all pile geometry and top level installation of the pile cap to be increased 20 percent approximately. Furthermore, as pile diameter increased from 0.6 to 0.9 bridge pier width, the maximum scour depth for installation of the pile cap above the bed increased 5 and 10 percent approximately for pile arrangement of 2×2 and 2×3, respectively.

**Keywords:** Bridge, Inclined bridge piers group, Level of pile cap, Piles group, Scour

### مقدمه

پل را به دنبال خواهد داشت. دو عامل برخورد جریان به پایه و جدا شدن جریان از پایه پل، باعث ایجاد چنین گردابه‌هایی می‌شود. برخورد جریان به پایه پل گردابه نعل اسبی را شکل داده و جدایی جریان از پایه سبب به وجود آمدن گردابه‌های برخاستگی می‌شود. در صورت کاربرد گروه پایه، مکانیزم‌های دیگری نیز در مقدار آبشستگی موثر هستند. مکانیزم‌های مؤثر در آبشستگی گروه پایه اثر تقویت کردن، اثر محافظت یا پناه دادن، گردابه‌های جاری و به هم فشردگی گردابه نعل اسبی می‌باشند (بروسرز و رادکیوی ۱۹۹۱). اثر تقویت کردن باعث افزایش عمق آبشستگی در پایه جلویی می‌شود. به علت وجود پایه پشتی، حفره‌های

بحث آبشستگی قدمتی طولانی در علم هیدرولیک داشته و به دلیل شرایط و پیچیدگی‌های خاص آن و همچنین به جهت نبودن رابطه‌ای مناسب که بتواند پاسخگوی تمامی شرایط باشد، همچنان مورد توجه خاص محققان علم هیدرولیک و مهندسی رودخانه می‌باشد.

با استقرار پایه‌های پل در مسیر جریان در رودخانه‌ها، گردابه‌ایی پیچیده‌ای در اطراف پایه‌ها به وجود می‌آید که باعث حفر گودالی در اطراف پایه‌ها شده که حفره آبشستگی نامیده می‌شود. توسعه این گودال در اطراف پایه‌ها و نفوذ به زیر پی سازه، تخریب

پایه‌ها بر روی فونداسیونی که در زیر بستر و بالاتر از بیشینه عمق آبشستگی به‌ازای تک‌پایه قرار دارد، مقدار بیشینه عمق آبشستگی کاهش می‌یابد (اسمعیلی ورکی و همکاران ۱۳۹۲).

در کنار مطالعه آبشستگی ناشی از پایه‌های پل، تأثیر آرایش شمع‌های مستقر در زیر فونداسیون نیز از اهمیت به‌سزائی برخوردار می‌باشد. شفرود و همکاران (۲۰۱۴) بر اساس مفهوم قطر مؤثر پایه، رابطه‌ای را برای تخمین عمق آبشستگی گروه پایه‌ها ارائه نمودند. عطائی آشتیانی و همکاران (۲۰۱۰)، روش‌های ارائه شده توسط HEC-18 و کولمن (۲۰۰۵) در تخمین عمق آبشستگی اطراف گروه شمع‌ها مورد بررسی قرار داده و رابطه اصلاحی برای این منظور ارائه دادند.

عبدالداائم و همکاران (۲۰۱۱) به مقایسه اثر گروه شمع در آبشستگی موضعی در اطراف پایه‌های پل، با تغییر تعداد و فاصله شمع در آرایش مربعی شکل در دو جهت طولی و عرضی جریان پرداختند. تجربه و تحلیل نتایج نشان داد که برای گروه شمعی که در یک ردیف در جهت جریان قرار داده شود، در صورتی که نسبت فاصله شمع مساوی یا بزرگتر از  $6/5$  برابر قطر شمع باشد، آبشستگی برای هر شمع به‌صورت منفرد عمل می‌نماید. همچنین زمانی که گروه شمع‌ها در چند ستون و ردیف مرتب شوند با افزایش فاصله بین شمع‌ها عمق آبشستگی کاهش می‌یابد. امینی و همکاران (۲۰۱۲)، با مطالعه آزمایشگاهی آبشستگی تحت شرایط مختلف فاصله بین شمع و تراز کارگذاری فونداسیون رابطه‌ای برای تخمین عمق آبشستگی برای شرایط ارائه دادند.

با توجه به این‌که تاکنون تحقیقی در خصوص بررسی آبشستگی اطراف گروه پایه کج مستقر بر گروه شمع صورت نگرفته است، هدف از انجام این تحقیق، تأثیر هندسه شمع‌ها از نظر قطر، فاصله طولی، تراز کارگذاری سرشمع و ضخامت آن بر مقدار بیشینه عمق آبشستگی در اطراف گروه پایه کج می‌باشد.

آبشستگی دو پایه ممکن است روی هم‌قرارگرفته و تراز بستر در پشت پایه جلویی پایین افتد. در نتیجه جریان به راحتی ذرات را از چاله آبشستگی پایه جلویی حرکت داده و عمق آبشستگی در جلو پایه عمیق‌تر می‌گردد (ملویل و ساترلند ۱۹۸۸).

به جهت اهمیت مسأله آبشستگی اطراف پایه‌های پل، تاکنون تحقیقات زیادی در رابطه با پارامترهای اثرگذار بر آبشستگی انجام شده است. نتایج تحقیقات انجام‌شده در رابطه با تأثیر پارامترهای هندسی پایه نظیر قطر پایه و یکنواختی سطح مقطع نشان داد که برای پایه با سطح مقطع یکنواخت، بیشینه عمق آبشستگی تا  $2/4$  برابر قطر پایه خواهد رسید (ملویل و ساترلند ۱۹۸۸). در شرایطی که سطح مقطع متفاوت باشد، نظیر شرایطی که پایه بر روی فونداسیون قرار گرفته است، بسته به تراز کارگذاری فونداسیون مقدار آبشستگی متفاوت می‌باشد (ملویل و ساترلند ۱۹۸۸). نتایج تحقیقات صورت‌گرفته حاکی از آن است برای شرایطی که فونداسیون در عمقی کمتر از بیشینه آبشستگی برای تک‌پایه قرار گیرد، بیشینه عمق آبشستگی کاهش می‌یابد. علت این موضوع به کاهش سطح آبشستگی در عمق و در نتیجه عدم توانایی جریان برای تعریض چاله آبشستگی و تعمیق بیشتر وقتی که به فونداسیون می‌رسد، نسبت داده شد (پارولا و همکاران ۱۹۹۶). همچنین در شرایطی که تراز کارگذاری فونداسیون بالاتر از بستر است، عمق آبشستگی نسبت به تک پایه افزایش می‌یابد (جونز و همکاران ۱۹۹۵). مطالعات انجام شده نشان داد که با کج‌شدگی پایه در صفحه موازی با جریان و به‌سمت بالادست، بر مقدار بیشینه آبشستگی افزوده خواهد شد (اسمعیلی ورکی و همکاران ۱۳۹۱، ملویل و رادکیوی ۱۹۹۶). مقایسه‌های انجام شده در خصوص تأثیر کج‌شدگی پایه بر تغییرات آبشستگی اطراف گروه پایه کج حاکی از آن است که مقدار آبشستگی در گروه پایه کج از حالت تک‌پایه بیشتر بوده که این موضوع به دلیل تأثیر توأم دو پایه و نیز کج‌شدگی آن به‌سمت بالادست می‌باشد. همچنین بررسی‌های انجام شده نشان داد در شرایط نصب

## مواد و روش‌ها

## الف) تحلیل ابعادی

مقدار آبشستگی اطراف پایه‌های پل به پارامترهای متعددی بستگی دارد که هر کدام تأثیری خاص و متفاوت بر مکانیزم آبشستگی داشته و باعث افزایش یا کاهش مقدار فرسایش بستر در اطراف پایه‌ها می‌گردد. پارامترهای مؤثر بر آبشستگی اطراف پایه‌های پل مجموعه‌ای از پارامترهای توصیف کننده مشخصات نوع سیال و رسوب بستر، هندسه پایه پل و شرایط هیدرولیکی جریان را شامل می‌گردد که آن‌ها را می‌توان به صورت رابطه زیر نوشت:

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

در این رابطه  $y$  عمق جریان،  $d_s$  عمق آبشستگی،  $D$  عرض پایه پل،  $D_{pc}$  عرض سرشمع،  $T_{pc}$  ضخامت سر شمع،  $d_p$  قطر شمع،  $l_m$  فاصله شمع‌ها در یک ردیف،  $l_n$  فاصله شمع‌ها در یک ستون،  $D_{50}$  قطری که ۵۰ درصد ذرات از آن کوچکتر است،  $Z$  تراز کارگذاری سرشمع،  $U$  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،  $t$  زمان از شروع آبشستگی و  $t_e$  زمان تعادل آبشستگی می‌باشد (شکل ۱- الف و ب).

با به‌کارگیری نظریه باکینگهام در تحلیل ابعادی، رابطه (۱) را می‌توان به صورت رابطه بی بعد زیر نوشت:

$$f_2\left(\frac{y}{D}, \frac{d_s}{D}, \frac{D_{50}}{D}, \frac{D}{D_{pc}}, \frac{Z}{D}, \frac{d_p}{D_{pc}}, \frac{d_p}{T_{pc}}, \frac{Z}{T_{pc}}, \frac{l_m}{d_p}, \frac{l_n}{d_p}, \frac{t}{t_e}, Re, Fr, \sigma_g, \alpha, \beta\right) = 0 \quad [2]$$

که در آن  $Fr$  عدد فرود و  $Re$  عدد رینولدز می‌باشد. با توجه به شرایط آزمایشگاهی در تحقیق حاضر، از میان پارامترهای مؤثر بر آبشستگی پایه پل، پارامتر انحراف معیار هندسی ذرات رسوبی به جهت

یکنواختی رسوبات انتخاب شده و زاویه‌های پایه‌های پل در صفحه جریان و قائم ثابت در نظر گرفته شد. همچنین به جهت اینکه عدد رینولدز در تمام آزمایش‌ها از مقدار ۹۱۰۰ بیشتر بود، از تأثیر این پارامتر صرف نظر شده و رابطه ۲ به صورت رابطه زیر اصلاح گردید.

$$\frac{d_s}{D} = f_3\left(\frac{y}{D}, Fr, \frac{Z}{D}, \frac{d_p}{D_{pc}}, \frac{d_p}{T_{pc}}, \frac{Z}{T_{pc}}, \frac{l_m}{d_p}, \frac{l_n}{d_p}, \frac{t}{t_e}\right) \quad [3]$$

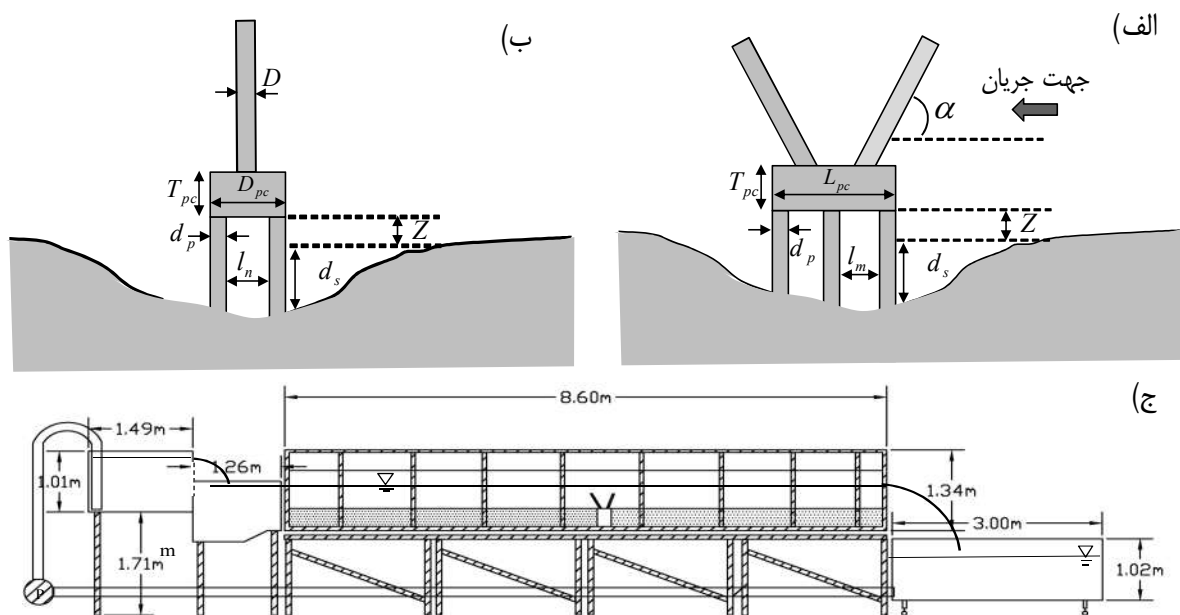
در این تحقیق رابطه ۳، به عنوان یک رابطه نهایی برای انجام آزمایش‌ها مورد استفاده قرار گرفت.

## ب) تجهیزات آزمایشگاهی

آزمایش‌ها در آزمایشگاه هیدرولیک گروه مهندسی آب دانشگاه گیلان و در کانال آزمایشگاهی با سیستم بازچرخانی و به طول ۸/۶ متر، عرض ۰/۹۲ و عمق ۱ متر که دارای دیواره‌هایی از جنس شیشه و کف پلکسی‌گلاس بود، انجام شد. به منظور تأمین دبی جریان از پمپ سانتریفیوژ که قادر بود دبی سیستم را تا ۷۰ لیتر بر ثانیه تأمین نماید، استفاده گردید (شکل ۱- ج). جریان ورودی توسط پمپ وارد مخزن اندازه‌گیری بالادست شده که در انتهای آن سرریز مثلی جهت اندازه‌گیری دبی جریان نصب شد. سپس جریان با عبور از سرریز وارد مخزن آرام‌کننده پایین دست شده و در ادامه وارد کانال می‌گردید. جهت کاهش تلاطم جریان ورودی به کانال و ممانعت از شکل‌گیری جریان‌های عرضی در ورودی کانال، از مستقیم‌سازنده جریان در ابتدای کانال استفاده شد. برای تنظیم عمق جریان در کانال از دریچه پروانه‌ای که در انتهای کانال نصب شده بود، استفاده گردید. 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 کمترین اتلاف وقت میسر شد. جهت اطمینان از توسعه‌یافتگی جریان قبل از رسیدن به پایه پل، محل نصب آن ۵ متر بعد از ورودی انتخاب گردید.

دیواره‌های فلوم تأثیری بر مقدار آبستگي نخواهند داشت. سر شمع به صورت مکعبی و از جنس ارتالون (پلاستیک فشرده) در دو ضخامت سر شمع ۳ و ۵ سانتی‌متر ساخته شد. شمع‌ها از لوله‌هایی با جنس پلی-اتیلن در قطرهای ۲ و ۳ سانتی‌متر تهیه و در قالب آرایش‌های ۲×۲ و ۲×۳ در زیر سر شمع نصب گردیدند. در شکل ۲ نمایی از پایه پل مستقر بر گروه شمع نشان داده شد.

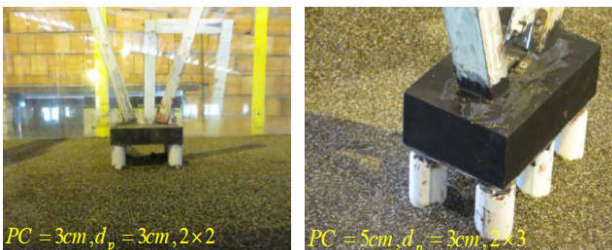
گروه پایه کج مورد بررسی در این تحقیق از دو پایه مستطیلی شکل به طول و عرض ۲/۵ و ۳/۵ سانتی‌متر که با زاویه ۲۸ درجه بر روی سرشمع مستطیلی شکل به طول و عرض ۱۶ و ۱۰ سانتی‌متر نصب شده بودند، تشکیل شد. ابعاد پایه نمونه به مقیاس ۱/۱۹۰ از پل هشتم اهواز می‌باشد. در انتخاب مقیاس سعی شد که ابعاد نهایی پایه به گونه‌ای باشد که دیواره‌ها بر روی آبستگي تأثیری نداشته باشند. طبق نظر رادکیوی و اتما (۱۹۸۳) اگر نسبت عرض فلوم به عرض پایه از ۶/۲۵ بیشتر باشد،



شکل ۱- الف) و ب) تعریف پارامترهای هندسی در جهت و مقابل با جریان، ج) طرح کلی فلوم آزمایشگاهی.

توجه به بیشینه عمق آبستگي، ۳۰ سانتی‌متر انتخاب گردید. جهت شبیه‌سازی بهتر بستر رسوبی کانال، بالادست و پایین‌دست بازه مورد مطالعه از رسوبات درشت‌دانه که در مرحله الک‌کردن باقی‌مانده بود، استفاده گردید.

اندازه ذره رسوب یکی از عوامل مؤثر بر عمق آبستگي است. برای حذف اثر اندازه رسوب بر عمق آبستگي موضعی، طبق تحقیق ملویل و ساترلند (۱۹۸۸)، نسبت عرض پایه به قطر ذرات رسوبی باید از ۲۰-۲۵ بیشتر باشد. همچنین رادکیوی و اتما (۱۹۸۳) اظهار داشتند که جهت ممانعت از تشکیل شکنج در سرعت‌های نزدیک به آستانه حرکت، قطر رسوبات باید از ۰/۷ میلی‌متر بیشتر باشد. رسوبات مورد استفاده در این تحقیق دارای قطر ۰/۷ میلی‌متر بود که از مصالح رودخانه‌ای تهیه و بعد از الک کردن در بازه‌ای بطول ۱/۵ متر از کانال آزمایشگاهی که محدوده مورد مطالعه برای آبستگي بود، قرار داده شد. ضخامت مواد بستر با



شکل ۲- آرایش کارگذاری شمع‌ها در حالت‌های مختلف در تراز کارگذاری سر شمع  $Z/T_{pc} = 1$ .

## ج) روش انجام آزمایش‌ها

قبل از شروع آزمایش‌ها لازم بود که سرعت آستانه حرکت برای قطر رسوبات مورد استفاده مشخص گردد. از این رو برای شرایط مختلف عمق و دبی، وضعیت آستانه حرکت به صورت مشاهده‌ای بررسی و در نهایت مقدار متوسط سرعت جریان برای آستانه حرکت  $0/22$  متر بر ثانیه تعیین گردید. مقایسه سرعت برشی بدست آمده برای شرایط آستانه حرکت از طریق رابطه لگاریتمی سرعت با دیاگرام شیلدز و روابط تجربی مطابقت مطلوبی را با اختلاف نسبی کمتر از ۵ درصد نشان داد. در هر آزمایش، ابتدا با تعیین دبی جریان برای سرعت و عمق مورد نظر، آب بتدریج و به آرامی وارد کانال شده و سپس بعد از تنظیم دبی، عمق مورد نظر در کانال با مانور دریچه انتهایی برقرار گردید. لازم به ذکر است که در کلیه آزمایش‌ها، عمق جریان ثابت و برابر با  $12/5$  سانتی‌متر در نظر گرفته شد.

پدیده آبشستگی در اطراف پایه‌های پل فرآیندی زمان‌بر بوده و تعیین زمان تعادل در مطالعه مربوط به آن از اهمیت ویژه‌ای برخوردار می‌باشد. محققان معیارهای مختلفی را جهت تعیین زمان تعادل پیشنهاد نموده‌اند. ملویل و چیو (۱۹۹۹) اشاره نمودند زمان تعادل، زمانی است که میزان آبشستگی در طی دوره زمانی ۲۴ ساعته کمتر از ۵ درصد قطر پایه باشد. رادکیوی و اتما (۱۹۸۳)، 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 (۱۹۹۹) جهت تعیین زمان تعادل استفاده شد. برای این منظور، ابتدا آزمایشی به مدت ۷۲ 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 ۲۴ ساعت از شروع آزمایش، تغییرات عمق آبشستگی کمتر از ۵ درصد قطر پایه می‌گردد. بنابراین زمان تعادل برای کل آزمایش‌ها ۲۴ ساعت در نظر گرفته شد.

لازم به ذکر است به جهت عدم امکان اندازه‌گیری مستمر عمق آبشستگی در طول زمان ۲۴ ساعت، در کلیه آزمایش‌ها تغییرات آبشستگی به مدت ۷ ساعت که تقریباً ۸۵ درصد آبشستگی رخ داد، بصورت پیوسته اندازه‌گیری شده و سپس بیشینه عمق آبشستگی بعد از قطع آزمایش در زمان ۲۴ ساعت اندازه‌گیری شد. در این تحقیق در مجموع برای بررسی شرایط مختلف هندسه شمع‌ها و تراز کارگذاری سر شمع، ۴۰ آزمایش شامل قطر شمع‌های ۲ و ۳ سانتی‌متر ( $d_p / D$ ،  $0/6$  و  $0/9$ )، آرایش شمع‌های  $2 \times 2$  و  $2 \times 3$ ، ضخامت سر شمع ۳ و ۵ سانتی‌متر ( $T_{pc} / D$ ،  $0/9$  و  $1/4$ ) و تراز کارگذاری سر شمع

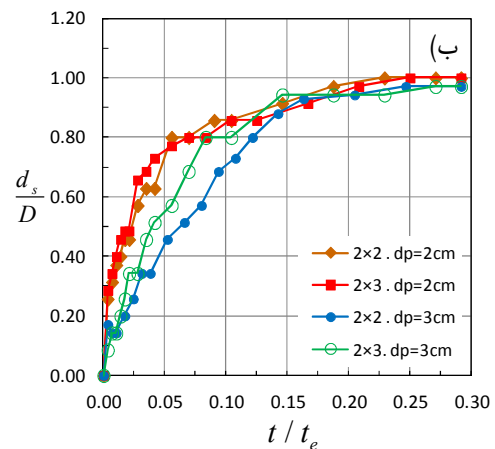
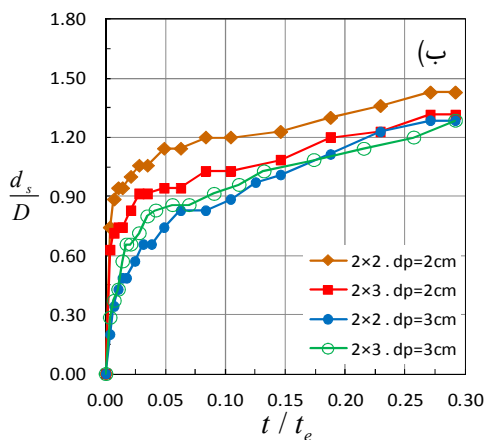
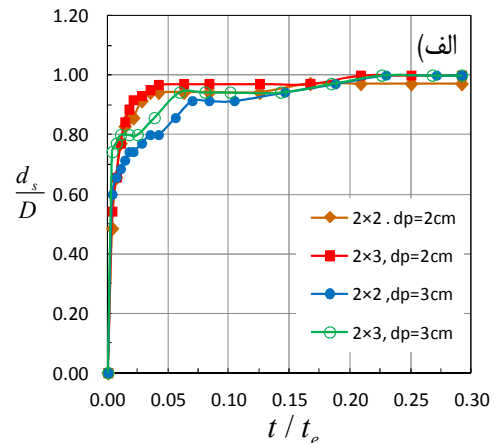
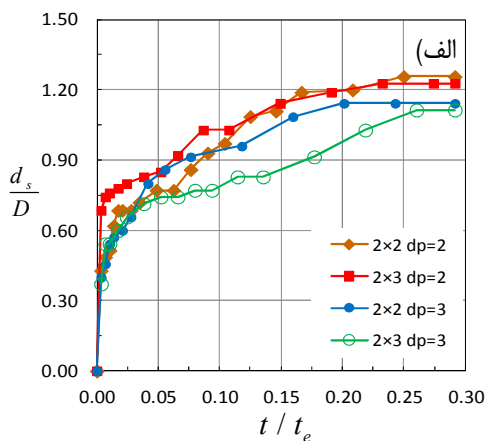
$(Z / T_{pc})$ ،  $1/5$ ،  $0/5$ ، صفر و در حالت مدفون  $0/7$  - انجام شد.

## تحلیل نتایج

الف) توسعه زمانی آبشستگی تحت شرایط مختلف تراز کارگذاری سرشمع

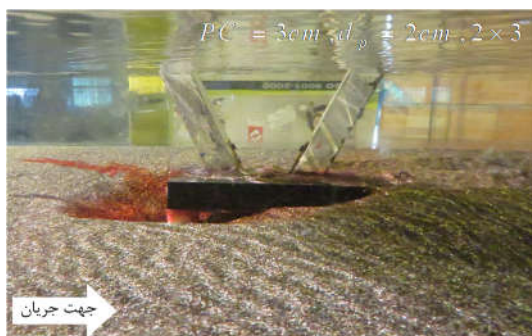
تغییرات توسعه زمانی عمق آبشستگی اطراف گروه شمع با آرایش و قطرهای مختلف برای تراز نسبی کارگذاری سرشمع  $Z / T_{pc}$ ،  $0/7$  - و  $1/2$  - ( $3/5$  سانتی‌متر زیر بستر) در شکل ۳ نشان داده شد. مشاهدات آزمایشگاهی حاکی از آن است که در این تراز کارگذاری سر شمع، چاله آبشستگی در مدت زمان کمتر از ۱۰ درصد زمان تعادل (۴۰ دقیقه ابتدایی) به روی سر شمع رسیده و بعد از آن به دلیل عدم امکان توسعه چاله آبشستگی به زیر سر شمع، مقدار آن ثابت می‌گردد.

در شکل ۴ تغییرات توسعه زمانی آبشستگی گروه شمع با آرایش و قطرهای مختلف برای تراز نسبی کارگذاری سرشمع  $Z / T_{pc}$ ،  $0/5$  - نشان داده شد. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، مقدار لحظه‌ای آبشستگی با افزایش قطر شمع کاهش می‌یابد. همچنین در هر دو قطر شمع‌های مورد آزمایش، با افزایش تعداد شمع‌ها در راستای جریان از ۲ به ۳ شمع، مقدار عمق لحظه‌ای آبشستگی کاهش یافت.



شکل ۴- توسعه زمانی آبخستگی در آرایش و قطرهای مختلف در تراز نسبی کارگذاری سرشمع ۰/۵-  
(الف)  $T_{PC} / D = 0/9$  و (ب)  $T_{PC} / D = 1/4$ .

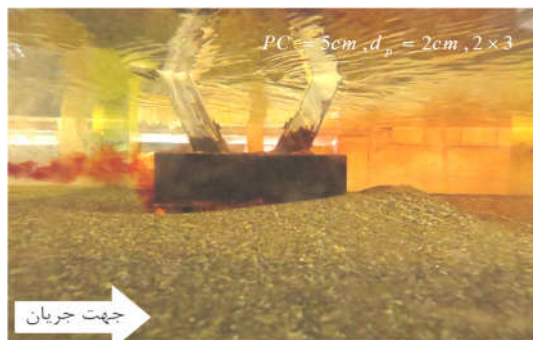
شکل ۳- توسعه زمانی آبخستگی برای آرایش و قطرهای مختلف شمع در ترازهای نسبی کارگذاری سرشمع ۱/۲- و ۰/۷- (الف)  $T_{PC} / D = 0/9$  و (ب)  $T_{PC} / D = 1/4$ .



شکل ۵- آشکارسازی الگوی جریان در تراز نسبی کارگذاری سرشمع ۰/۵-.

به منظور فهم مناسب از الگوی جریان نزدیک- شونده به پایه‌ها، آشکارسازی با تزریق مواد رنگی صورت گرفت که نمایی از آن در شکل ۵ نشان داده شد. مشاهدات آزمایشگاهی حاکی از آن بود که در این شرایط هم گروه پایه و هم سر شمع بر الگوی جریان تأثیر می- گذارند. مشاهده‌های صورت گرفته نشان داد که بخشی از جریان که به سر شمع برخورد می‌کند، با انحراف به سمت پایین، وارد فضای زیرین سر شمع می‌گردد. بنابراین هرچه ضخامت سر شمع بیشتر باشد، مقدار جریان انحراف یافته به فضای زیرین سر شمع بیشتر می‌شود. از طرف دیگر در این تراز کارگذاری، پایه‌های میانی به گونه‌ای نقش نگه‌دارنده رسوبات زیر سر شمع را ایفا نموده و در نتیجه مانع از توسعه جریان انحراف- یافته به زیر سر شمع می‌گردند.

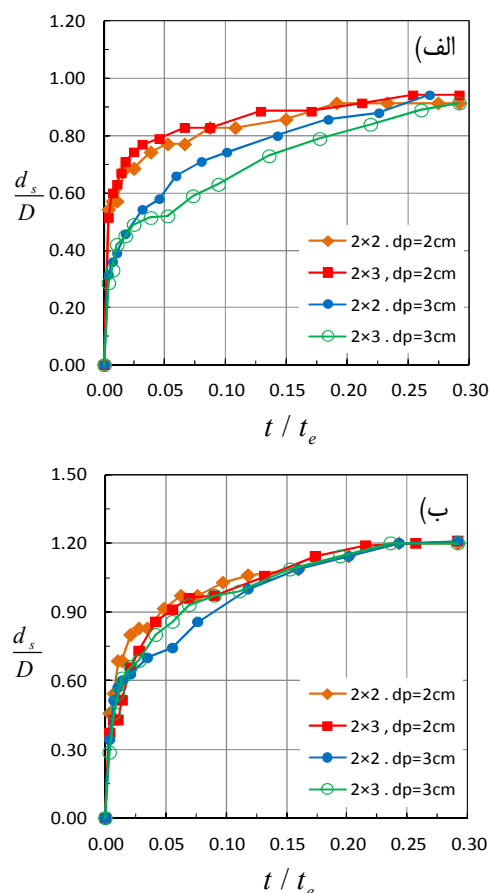
نیز حفاظت از رسوبات در زیر سر شمع ایفا می‌کنند. در نتیجه مقدار عمق آبشستگی در این شرایط هندسی کاهش می‌یابد.



شکل ۷- آشکارسازی الگوی جریان در تراز نسبی کارگذاری سرشمع صفر.

در شکل ۸ تغییرات توسعه زمانی آبشستگی اطراف گروه شمع با آرایش و قطرهای مختلف در تراز نسبی کارگذاری سرشمع ۱ نشان داده شد. مقایسه نتایج نشان داد که در مراحل اولیه آبشستگی، عمق لحظه‌ای آبشستگی در آرایش و قطر شمع‌های مختلف برابر یا اختلاف کمی نسبت به هم داشته‌اند، ولی با گذشت زمان تأثیر قطر و آرایش گروه شمع‌ها بر روی عمق آبشستگی لحظه‌ای محسوس می‌گردد.

در شکل ۹ نمایی از آشکارسازی جریان در این شرایط از تراز کارگذاری سرشمع نشان داده شد. همان‌طور که مشاهده می‌گردد با قرارگیری سر شمع در بالای بستر، فضای بیشتر برای توسعه جریان به زیر آن فراهم می‌گردد. در این شرایط هندسه شمع‌ها از نظر قطر و تعداد تأثیر بیشتری بر مقدار آبشستگی دارد. هر چه قطر شمع‌ها بیشتر و یا تعداد آن‌ها افزایش یابد، گردابه‌های شکل گرفته در زیر شمع‌ها دارای ساختار پیچیده‌تر و نیز قدرت بالاتری می‌گردند. بنابراین انتظار می‌رود بر خلاف ترازهای قبلی سر شمع که امکان عبور کامل جریان از زیر آن فراهم نبود، در این تراز، آبشستگی به طور کامل در زیر سر شمع توسعه یافته و در نتیجه مقدار عمق آبشستگی با افزایش قطر و تعداد شمع‌ها، افزایش می‌یابد.



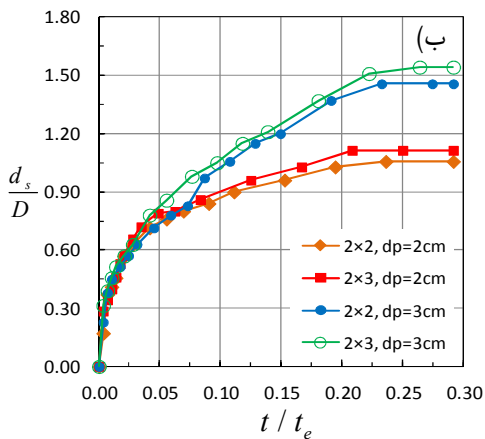
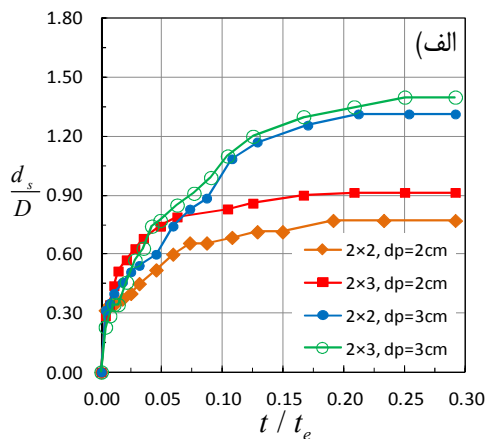
شکل ۶- توسعه زمانی آبشستگی در آرایش و قطرهای مختلف در تراز نسبی کارگذاری سرشمع صفر، (الف)  $T_{PC}/D = 0/9$  و (ب)  $T_{PC}/D = 1/4$ .

تغییرات توسعه زمانی آبشستگی گروه شمع با آرایش و قطرهای مختلف برای تراز نسبی کارگذاری صفر در شکل ۶ نشان داده شد. همان‌طور که ملاحظه می‌شود در این شرایط نیز همانند تراز نسبی ۰/۵، مقدار لحظه‌ای آبشستگی با افزایش قطر و تعداد شمع‌ها اندکی کاهش می‌یابد ولی به تدریج با گذشت زمان از شروع آزمایش از تأثیر هندسه شمع‌ها بر عمق لحظه‌ای آبشستگی کاسته می‌شود.

مشاهدات آزمایشگاهی که نمایی از آن در شکل (۷) نشان داده شد، حاکی از آن است که به تدریج با خالی شدن فضای زیر سر شمع، بخشی از جریان به این بخش نفوذ می‌کند. در این شرایط حضور شمع‌های میانی نقش مهمی در مقاومت در مقابل جریان ورودی و

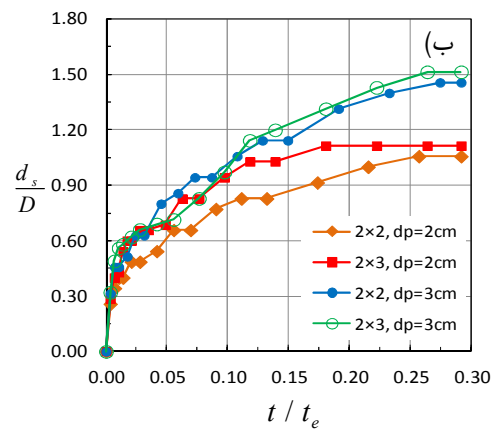
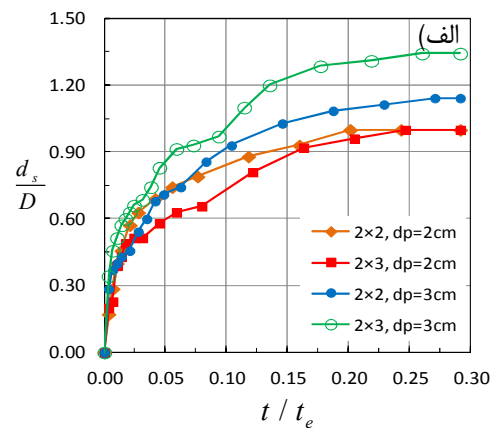


سرعت موضعی جریان و به تبع آن گردابه‌های شکل گرفته در محدوده سرشمع و پایه‌ها افزایش کمتری یافته و در نتیجه مقدار عمق آبخستگی لحظه‌ای در مقایسه با تراز نسبی کارگذاری ۱، کاهش می‌یابد. عطائی آشتیانی و همکاران (۲۰۱۰) نیز این روند را در آزمایش‌های خود گزارش نمودند.

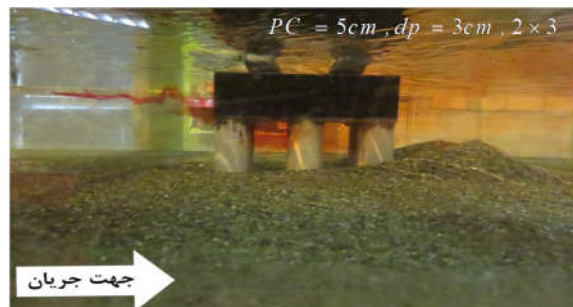


شکل ۱۰- توسعه زمانی آبخستگی در آرایش و قطرهای مختلف در تراز نسبی کارگذاری سرشمع ۱/۵ (الف) ضخامت نسبی ۰/۹ و (ب) ضخامت نسبی ۱/۴.

در شکل ۱۱، نمایی از تصاویر حاصل از آشکارسازی جریان نشان داده شد. همان‌طورکه ملاحظه می‌شود، جریان پس از برخورد به سر شمع به سمت پایین متمایل و به دلیل فضای کافی عبوری از زیر سر شمع با سرعت کمتر از مجاورت شمع‌ها عبور می‌نماید. در نتیجه، آن بخش از جریان که به مجموعه



شکل ۸- توسعه زمانی آبخستگی در آرایش و قطرهای مختلف در تراز نسبی کارگذاری سرشمع ۱ (الف)  $T_{PC} / D = 0/9$  و (ب)  $T_{PC} / D = 1/4$ .



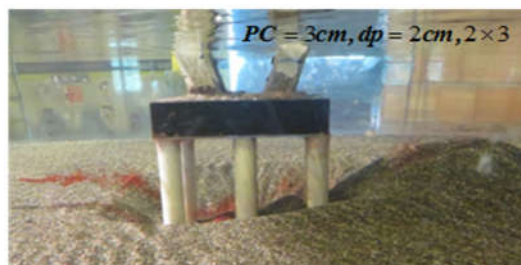
شکل ۹- آشکارسازی الگوی جریان در تراز نسبی کارگذاری سرشمع ۱.

در شکل ۱۰ تغییرات توسعه زمانی آبخستگی گروه شمع با آرایش و قطرهای مختلف برای تراز نسبی کارگذاری فونداسیون ۱/۵ نشان داده شد. مقایسه نتایج نشان داد که در این تراز کارگذاری سرشمع به دلیل افزایش مساحت مقطع عبوری جریان در زیر سر شمع،

به  $2 \times 3$  برای هر دو ضخامت نسبی سرشمع  $0/9$  و  $1/4$ ، مقدار عمق آبشستگی به ترتیب  $46$  و  $53$  درصد و در قطر نسبی شمع  $0/9$ ، با تغییر آرایش از  $2 \times 2$  به  $2 \times 3$  مقدار بیشینه عمق آبشستگی برای ضخامت‌های سرشمع یادشده، به ترتیب  $62$  و  $67$  درصد افزایش یافت. با افزایش قطر نسبی شمع از  $0/6$  به  $0/9$  در آرایش  $2 \times 2$  مقدار بیشینه عمق آبشستگی در ضخامت‌های نسبی سرشمع  $0/9$  و  $1/4$  تغییر محسوسی نداشت ولی در آرایش  $2 \times 3$  مقدار بیشینه عمق آبشستگی  $5$  و  $8$  درصد افزایش یافت.

بررسی مقادیر بیشینه عمق آبشستگی در تراز نسبی کارگذاری صفر، حاکی از آن است که در قطر نسبی شمع  $0/6$  با تغییر آرایش از  $2 \times 2$  به  $2 \times 3$  برای هر دو ضخامت نسبی سرشمع  $0/9$  و  $1/4$ ، مقدار عمق آبشستگی به طور متوسط  $7$  درصد و در قطر نسبی شمع  $0/9$ ، با تغییر آرایش از  $2 \times 2$  به  $2 \times 3$  مقدار بیشینه عمق آبشستگی برای ضخامت سرشمع  $0/9$  تغییر محسوسی نداشت. همچنین با افزایش قطر نسبی شمع از  $0/6$  به  $0/9$  در آرایش  $2 \times 2$  مقدار بیشینه عمق آبشستگی در ضخامت‌های نسبی سرشمع  $0/9$  و  $1/4$  تغییر محسوسی نداشت ولی در آرایش  $2 \times 3$  مقدار عمق آبشستگی به طور متوسط  $6$  درصد کاهش یافت. مقایسه نتایج بیشینه عمق آبشستگی در تراز نسبی کارگذاری  $0/5$  - نشان داد که تغییر قطر و آرایش شمع‌ها تأثیری بر بیشینه عمق آبشستگی نداشت و تنها با افزایش ضخامت نسبی سرشمع از  $0/9$  به  $1/4$ ، مقدار بیشینه عمق آبشستگی به طور متوسط  $20$  درصد افزایش یافت. همچنین با کاهش تراز کارگذاری سرشمع به  $0/7$  - و  $1/2$  - به دلیل عدم امکان تعمیق عمق آبشستگی با رسیدن بر روی سرشمع، مقدار عمق نهایی آبشستگی برای همه گزینه‌های مورد بررسی تقریباً ثابت می‌ماند.

پایه، سرشمع و شمع‌ها برخورد می‌نماید، دچار انسدادهای موضعی کمتر و به تبع آن افزایش سرعت موضعی پایین‌تری می‌شود.



شکل ۱۱- آشکارسازی الکوی جریان در تراز نسبی کارگذاری سرشمع  $0/5$ .

ب) مقایسه بیشینه عمق آبشستگی در شرایط مختلف تراز کارگذاری سرشمع و هندسه گروه شمع

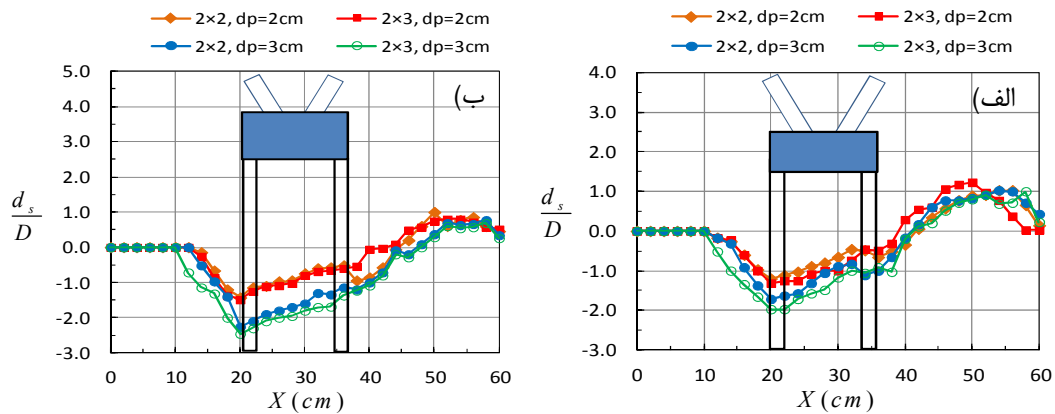
در شکل‌های ۱۲ تا ۱۴ و جدول ۱، مقایسه نیم‌رخ طولی نهایی و بیشینه آبشستگی در ترازهای نسبی کارگذاری سرشمع مورد بررسی، نشان داده شد.

مقایسه نتایج بیشینه عمق آبشستگی در تراز نسبی کارگذاری سرشمع  $1/5$  حاکی از آن است که در قطر نسبی شمع  $0/6$  با تغییر آرایش از  $2 \times 2$  به  $2 \times 3$  برای هر دو ضخامت نسبی سرشمع  $0/9$  و  $1/4$ ، مقدار عمق آبشستگی به ترتیب  $42$  و  $57$  درصد و در قطر نسبی شمع  $0/9$ ، با تغییر آرایش از  $2 \times 2$  به  $2 \times 3$  مقدار بیشینه عمق آبشستگی برای ضخامت‌های سرشمع یادشده، به ترتیب  $54$  و  $60$  درصد افزایش یافت. همچنین با افزایش قطر نسبی شمع از  $0/6$  به  $0/9$  در آرایش  $2 \times 2$  مقدار بیشینه عمق آبشستگی در ضخامت‌های نسبی سرشمع  $0/9$  و  $1/4$  به ترتیب  $8$  و  $7$  درصد و در آرایش  $2 \times 3$  مقدار عمق آبشستگی  $17$  و  $9$  درصد افزایش یافت.

مقایسه نتایج بیشینه عمق آبشستگی در تراز نسبی کارگذاری سرشمع  $1$  نشان داد که در قطر نسبی شمع  $(d_p / D)$ ،  $0/6$  با تغییر آرایش شمع‌ها از  $2 \times 2$

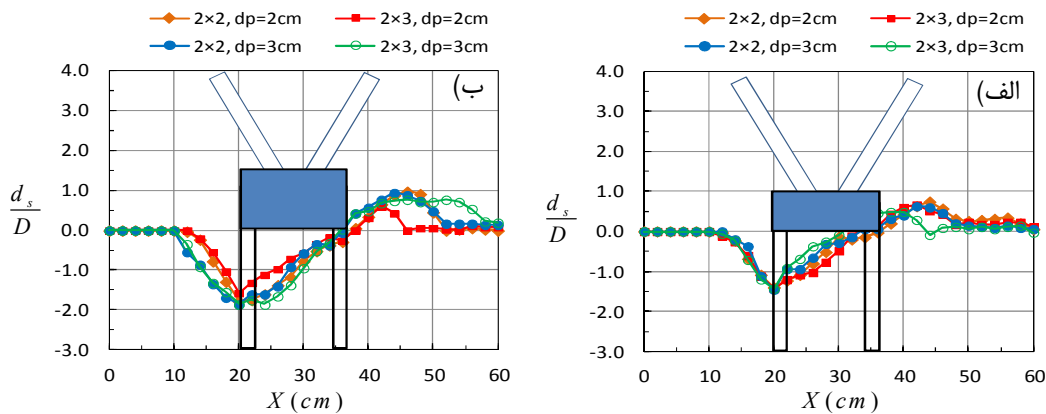
جدول ۱- مقایسه مقادیر بیشینه عمق آبستگي برای شرایط مختلف تراز نسبی کارگذاری سرشمع، قطر و آرایش شمع‌ها.

درصد افزایش	$d_p / D = 0.9$				$d_p / D = 0.6$				$T_{PC} / D$	$Z / T_{PC}$
	$d_s / D$ در آرایش	درصد افزایش	$d_s / D$ در آرایش	درصد افزایش	$d_s / D$ در آرایش	درصد افزایش	$d_s / D$ در آرایش	درصد افزایش		
۲۰	۲	۱۵	۱/۳	۲۹	۱/۷	۱۷	۱/۲	-۰/۹	۱/۵	
	۲/۴		۱/۵		۲/۲		۱/۴			
۱۹	۲/۱	۱۵	۱/۳	۲۱	۱/۹	۱۵	۱/۳	-۰/۹	۱	
	۲/۵		۱/۵		۲/۳		۱/۵			
۲۹	۱/۴	۲۹	۱/۴	۲۷	۱/۴	۲۹	۱/۴	-۰/۹	.	
	۱/۸		۱/۸		۱/۹		۱/۸			
۲۰	۱/۵	۲۰	۱/۵	۲۰	۱/۵	۲۰	۱/۵	-۰/۹	-۰/۵	
	۱/۸		۱/۸		۱/۸		۱/۸			
.	۱	.	۱	.	۱	.	۱	-۰/۹	-۱/۲	
	۱		۱		۱		۱			



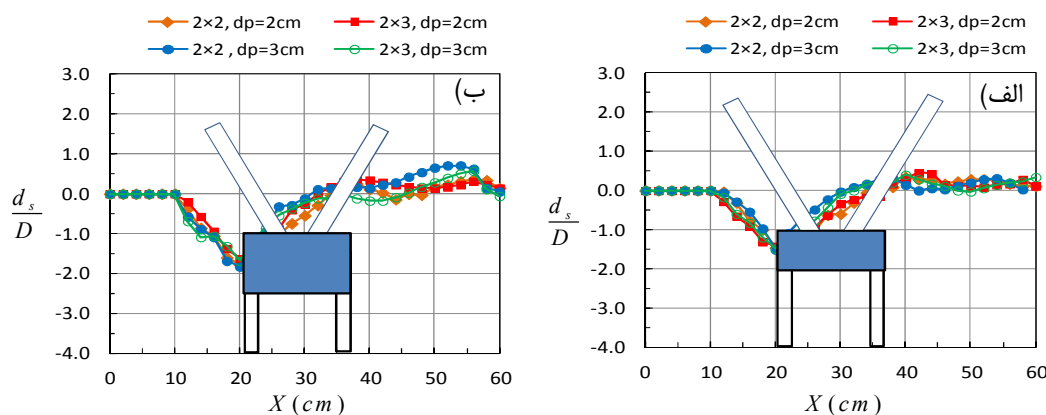
شکل ۱۱- نیمرخ نهایی و بیشینه مقدار عمق آبستگي برای آرایش و قطرهای مختلف در تراز نسبی کارگذاری سرشمع

$Z / T_{pc} = 1.5$  (الف) ،  $T_{PC} / D = 0.9$  (ب)  $T_{PC} / D = 1.4$



شکل ۱۲- نیمرخ نهایی و بیشینه مقدار عمق آبستگي برای آرایش و قطرهای مختلف در تراز نسبی کارگذاری سرشمع

$Z / T_{pc} = 0$  (الف) ،  $T_{PC} / D = 0.9$  (ب)  $T_{PC} / D = 1.4$



شکل ۱۴- نیمرخ نهایی و بیشینه مقدار عمق آبشستگی برای آرایش و قطرهای مختلف در تراز نسبی کارگذاری سرشمع  
 $T_{PC} / D = 1.4$  (ب) و  $T_{PC} / D = 0.9$  (الف) و  $Z / T_{PC} = -0.7$  و  $-1.2$

### نتیجه‌گیری کلی

بر بیشینه عمق آبشستگی نشان داد که برای ترازهای کارگذاری سرشمع بالای بستر، با تغییر قطر نسبی شمع‌ها از  $0/6$  به  $0/9$  در آرایش‌های  $2 \times 2$  و  $2 \times 3$ ، بیشینه عمق آبشستگی به‌طور متوسط به ترتیب ۵ و ۱۰ درصد افزایش می‌یابد. همچنین در شرایط کارگذاری سرشمع هم‌تراز بستر یا زیر آن، با افزایش قطر شمع‌ها، عمق آبشستگی تغییر معنی‌داری پیدا نکرد. بررسی نتایج تأثیر افزایش ضخامت نسبی سرشمع از  $0/9$  به  $1/4$ ، در کلیه ترازهای نسبی کارگذاری سرشمع بالاتر از  $-0/5$ ، مقدار بیشینه عمق آبشستگی به‌طور متوسط ۲۲ درصد افزایش می‌یابد. مقایسه نتایج افزایش تعداد شمع‌ها از  $2 \times 2$  به  $2 \times 3$ ، نشان داد که در ترازهای کارگذاری سرشمع بالای بستر، با افزایش شمع‌ها، بیشینه عمق آبشستگی به‌طور متوسط ۵۵ درصد افزایش می‌یابد.

در این تحقیق تغییرات آبشستگی اطراف گروه پایه کج مستقر بر روی سر شمع با ترازهای مختلف کارگذاری و نیز هندسه‌های مختلف شمع‌ها مورد بررسی قرار گرفت. مقایسه نتایج تأثیر تراز کارگذاری سرشمع در آرایش  $2 \times 2$ ، ضخامت‌های نسبی  $(T_{PC} / D)$   $0/9$  و  $1/4$  و قطرهای نسبی شمع  $0/6$  و  $0/9$  نشان داد که بیشینه عمق آبشستگی در تراز نسبی کارگذاری سرشمع  $(Z / T_{PC})$   $-0/5$  و کمینه در تراز نسبی کارگذاری  $-0/7$  و  $-1/2$  رخ می‌دهد. با تغییر آرایش شمع‌ها به  $2 \times 3$ ، مقدار بیشینه عمق آبشستگی در تراز نسبی کارگذاری سرشمع ۱ و کمینه در تراز نسبی کارگذاری سرشمع  $-0/7$  و  $-1/2$  شکل گرفت. مقایسه نتایج تأثیر تغییر قطر شمع‌ها

### منابع مورد استفاده

اسمعیلی ورکی م، موسی پور س، و حاتم جعفری م، ۱۳۹۲. بررسی آزمایشگاهی تأثیر شرایط هندسی و هیدرولیکی بر مشخصات آبشستگی اطراف گروه پایه کج با فونداسیون. مجله پژوهش آب ایران، سال هفتم، شماره سیزده، صفحه

۱۴۱-۱۵۱.

Abdeldayem AW, Gamal H, Elsaed A, and Ghareeb A, 2011. The Effect of pile group arrangements on local scour using numerical models. *Advances in Natural and Applied Science* 5(2): 141-146.

Amini A, Bruce W, Melville M, Thamer M, Abdul H, and Ghazali A, 2012. Clear- water local scour around pile groups in shallow-water flow. *J. Hydraul. Eng, ASCE* 138(2): 177-185.

Ataie-Ashtiani B, Baratian-Ghorghi Z, and Beheshti AA, 2010. Experimental investigation of clear-water local scour of compound piers. *J. Hydraul. Eng, ASCE* 136 (6): 343-351.

Breusers HNC, and Raudkivi AJ, 1991. IAHR, Hydraulic Structure Design Manual: Scouring, Vol. 2, Balkema, Rotterdam, Netherlands.

- Coleman S, 2005. Clear water local scour at complex piers. *J. Hydraul. Eng.*, ASCE 131(4): 330–334.
- Jones JS, Bertoldi D, and Stein, S, 1995. Alternative scour countermeasures. *Proc. of 1st Conf. on Water Resources*, ASCE Pp. 1814–1823. San Antonio, Texas.
- Melville BW, and Sutherland AJ, 1988. Design method for local Scour at Bridge Piers . *J. Hydraul. Eng.*, ASCE 114(10): 1210-1226.
- Melville BW, and Raudkivi AJ, 1996. Effect of foundation geometry on bridge pier scour. *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, 122(4): 203–209.
- Melville BW, and Chiew YM, 1999. Time scale for local scour at bridge piers. *Journal J. Hydraul. Eng.*, ASCE 125(1): 59–65.
- Parola AC, Mahavadi SK, Brown BM, and El-Khoury A, 1996. Effects of rectangular foundation geometry on local pier scour. *J. Hydraul. Eng.*, ASCE 122 (1): 35–40.
- Raudkivi A, and Ettema R, 1983. Clear water scour at cylindrical piers. *J. Hydraul. Eng.*, ASCE 109 (3): 338–350.
- Sheppard DM, Melville B, and Demir H, 2014. Evaluation of existing equations for local scour at bridge piers. *J. Hydraul. Eng.*, ASCE 140 (1): 14–23.