

بررسی تأثیر زاویه قرارگیری دو پایه پل نسبت به جهت جریان بر روی عمق تعادل آبستگي در جلو پایه‌ها

سرگل معمار¹، محمد ذونعمت کرمانی^{2*}، مجید رحیم پور³، علی اصغر بهشتی⁴ و آنتون جی اشالیس⁵

1- دانشجوی دکتری سازه‌های آبی، بخش مهندسی آب، دانشگاه شهید باهنر کرمان، کرمان، ایران

2- دانشیار، بخش مهندسی آب، دانشگاه شهید باهنر کرمان، کرمان، ایران

3- دانشیار، بخش مهندسی آب، دانشگاه شهید باهنر کرمان، کرمان، ایران

4- استادیار، گروه مهندسی آب دانشکده کشاورزی دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران

5- استاد، گروه سازه‌های هیدرولیکی، دانشکده مهندسی عمران موسسه پلی تکنیک فدرال لوزان EPFL، لوزان، سوئیس

*zounemat@uk.ac.ir

(دریافت مقاله: 97/8/1؛ پذیرش مقاله: 97/10/24)

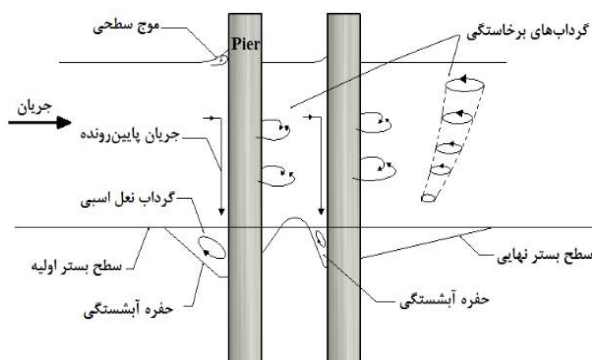
چکیده - در این مطالعه تأثیر زاویه قرارگیری دو پایه پل نسبت به جهت جریان بر روی عمق تعادل آبستگي در جلو پایه‌ها تحت شرایط آبستگي آب زلال بررسی می‌شود. بدین منظور پایه‌ها با 4 زاویه مختلف نسبت به جهت جریان قرار داده می‌شوند. افزون بر این جهت حصول عمق تعادل آبستگي در جلو پایه‌ها، آزمایش‌ها تا رسیدن به زمان تعادل آبستگي انجام می‌گردند. نتایج نشان می‌دهد که افزایش زاویه قرارگیری پایه‌ها، عمق و ترتیب در زوایای 0 و 60 درجه مشاهده می‌شود. با توجه به تجزیه و تحلیل نتایج، بیشینه عمق تعادل آبستگي در جلو پایه‌ها، برای زوایای کوچکتر و مساوی 28 درجه در پایه بالادست حادث می‌گردد، در حالی که برای زوایای بزرگتر از 28 درجه به پایه پایین دست منتقل می‌گردد. در ادامه با بکارگیری روش رگرسیون خطی نیمه لگاریتمی و داده‌های مشاهداتی روابطی برای تخمین عمق آبستگي در جلو پایه‌ها ارائه می‌شوند.

کلیدواژگان: آبستگي، اثر محافظت، الگوی جریان، گرداب نعل اسبی، پایه پل.

1- مقدمه

ارزیابی اهمیت پدیده آبستگي در اطراف پایه‌های پل و آبسکن‌ها در رودخانه‌ها، به منظور جلوگیری از عواقب جبران ناپذیر شکست پل‌ها به خصوص در مواقع سیلابی، همواره به عنوان یک مساله قابل توجه، توسط محققان مختلف، مورد بررسی قرار گرفته است. با وجود اینکه آبستگي به عنوان یک آسیب جدی برای فونداسیون پل‌ها شناخته شده است، اما تأثیر برخی از پارامترها بر روی رفتار آبستگي نیازمند بررسی بیشتر و جامع می‌باشد. زاویه قرارگیری پایه‌ها نسبت به جهت جریان، θ ،

سبب ایجاد الگوهای جریان متفاوتی در اطراف پایه‌ها گشته و آبستگي را تحت تأثیر قرار می‌دهد. بنابراین بررسی این پارامتر جهت طراحی ایمن پل‌ها حائز اهمیت می‌باشد. بررسی منابع نشان می‌دهد که تحقیقات اندکی در رابطه با بررسی تأثیر زاویه بر میزان عمق آبستگي در پایه‌های پشت سر هم (Tandem piers) - در راستای جریان - صورت پذیرفته است (Laursen and Toch (1956), Hannah (1978), Zhao and Sheppard (1999), Arneson et al. (2012) (HEC-18), Sheppard and Renna (2010), Lanca et al. (2013)). در اثر برخورد جریان نزدیک‌شونده به پایه پل، یک جریان



شکل 1 الگوی جریان و حفره‌های آبخستگی در اطراف دو پایه پل در راستای جریان (پایه‌های پشت سر هم)

نتایج نشان داد که برای زوایای در محدوده $0^\circ \leq \theta \leq 10^\circ$ ، بیشینه عمق آبخستگی در پایه بالادست مشاهده می‌گردد. با افزایش زاویه، اثر محافظت پایه بالادست بر روی پایه پایین‌دست کاهش یافت و بیشینه عمق آبخستگی در پایه پایین‌دست حاصل گردید. در مطالعه دیگری به بررسی تأثیر زاویه قرارگیری دو پایه بر روی عمق آبخستگی در مجاور آن‌ها با انجام آزمایش‌های 7 ساعته پرداخته شد (Hannah, 1978). فاصله مرکز به مرکز پایه‌ها 5 برابر قطر تک پایه بود. زاویه قرارگیری پایه‌ها در فاصله $0^\circ \leq \theta \leq 90^\circ$ تغییر داده شد. نتایج نشان داد که بیشینه عمق آبخستگی در پایه بالادست در محدوده $45^\circ \leq \theta \leq 30^\circ$ و در پایه پایین‌دست برای زاویه $\theta = 45^\circ$ حاصل می‌گردد.

Zhao and Sheppard (1999) به بررسی آزمایشگاهی تأثیر زاویه بر روی عمق آبخستگی در گروه پایه‌های پل در محدوده زمانی طولانی مدت (آزمایش‌های 26 ساعت) پرداختند. فاصله بین پایه‌ها 3 برابر قطر پایه پل تکی در نظر گرفته شد. نتایج حاکی از آن بود که برای زوایای $\theta < 20^\circ$ ، گرداب‌های نعل اسبی عامل اصلی در فرایند آبخستگی می‌باشند و بیشینه عمق آبخستگی در پایه بالادست ایجاد می‌گردد. برای زوایای $\theta > 20^\circ$ اثر گرداب‌های برخاستگی‌پایه بالادست بر اثر گرداب‌های نعل اسبی اطراف پایه‌ها غالب می‌گردد و بیشینه عمق آبخستگی در قسمت کناره‌های پایه‌ها که در معرض جریان هستند، مشاهده می‌گردد. افزون بر این بیشینه

عمودی بر روی پایه ایجاد می‌گردد که به دو بخش بالارونده و پایین‌رونده بر روی پایه تقسیم می‌گردد. جریان بالارونده به سمت سطح آب حرکت کرده و سبب ایجاد موج سطحی در جلو پایه می‌گردد. جریان پایین‌رونده¹ بر روی سطح بستر رسوبی عمل کرده و آبخستگی از جلو پایه شروع شده و یک حفره کوچک آبخستگی در اطراف پایه پل شکل می‌گیرد. چرخش جریان در داخل حفره سبب ایجاد یک سیستم گردابه‌ای می‌گردد که به دلیل شباهت آن به نعل اسب گرداب‌های نعل اسبی² نام‌گذاری شده‌اند. به علاوه جدایی جریان نزدیک‌شونده از کناره‌های پایه سبب ایجاد گرداب‌های برخاستگی³ در پشت پایه می‌شود. گرداب‌های برخاستگی مانند گردابه‌های کوچکی عمل کرده و رسوبات را از طریق بار بستر و بار معلق به پایین‌دست منتقل می‌کنند. اثر همزمان گرداب‌های نعل اسبی و برخاستگی نرخ آبخستگی و پتانسیل انتقال رسوب به پایین‌دست را افزایش می‌دهند. برای حالت دو پایه پل در راستای جریان اثر محافظت⁴ و تقویت‌کننده⁵ دو عامل مؤثر دیگری در گسترش حفره‌های آبخستگی در اطراف پایه‌ها هستند. اثر محافظت بدین صورت است که حضور پایه بالادست سبب کاهش سرعت جریان نزدیک شونده به پایه پایین‌دست شده و در نتیجه قدرت جریان پایین‌رونده و گرداب‌های نعل اسبی در اطراف پایه کاهش یافته، بدین ترتیب نرخ آبخستگی کمتر از مقدار آن در پایه بالادست می‌گردد. پایه پایین‌دست ممکن است سبب افزایش عمق آبخستگی در پایه بالادست نسبت به مقدار آن در تک پایه گردد. به طوریکه با ادغام حفره‌های ایجاد شده در اطراف پایه‌ها حرکت رسوبات از بالادست به پایین‌دست سریعتر گشته و عمق آبخستگی اطراف پایه بالادست افزایش می‌یابد (شکل 1) (Guo et al. 2012).

Laursen and Toch (1956) تأثیر زاویه قرارگیری دو پایه پل بر روی عمق آبخستگی در مجاور پایه‌ها را در مدت زمان 3 ساعت بررسی کردند.

¹ Downflow

² Horseshoe vortices

³ Wake vortices

⁴ Sheltering effect

⁵ Reinforcement effect

معادل، D_H^* ، جایگزین قطر تک‌پایه پل شود. همچنین ضریب ارتفاع گروه پایه K_h در رابطه (1) ضرب می‌گردد. جهت بدست آوردن عرض مؤثر معادل از رابطه (3) استفاده می‌شود:

$$D_H^* = a_{proj} * K_{sp} * K_m \quad (3)$$

که a_{proj} مجموع عرض‌های تصویر شده غیر همپوشانی شده پایه‌ها، K_{sp} ضریب فاصله پایه‌ها و K_m ضریب تعداد ردیف‌های هم راستا می‌باشد و m معرف تعداد ردیف‌ها در جهت جریان است (در صورتی که تعداد ردیف‌ها بیشتر از 6 باشد، مقدار این ضریب برای تمامی فواصل بین پایه‌ها ثابت در نظر گرفته می‌شود) همچنین برای پایه‌های با آرایش اریب و نامنظم مقدار ضریب برابر 1 است.

1-1-2- معادله شپارد و همکاران (FDOT)

این معادله توسط Sheppard et al. (2005) در راهنمای آبخستگی پل‌ها¹ برای تخمین بیشینه عمق آبخستگی در تک‌پایه پل (تحت شرایط آبخستگی آب زلال) به صورت روابط (4) تا (7) تهیه گردیده است:

$$\frac{d_{SF}}{D} = 2.5 f_1 \left(\frac{h}{D}\right) f_2 \left(\frac{V}{V_c}\right) f_3 \left(\frac{D}{d_{50}}\right) \quad (4)$$

$$f_1 \left(\frac{h}{D}\right) = \tanh \left[\left(\frac{h}{D}\right)^{0.4} \right] \quad (5)$$

$$f_2 \left(\frac{V}{V_c}\right) = 1 - 1.75 \left[\ln \left(\frac{V}{V_c}\right) \right]^2 \quad (6)$$

$$f_3 \left(\frac{D}{d_{50}}\right) = \left[\frac{\left(\frac{D}{d_{50}}\right)}{0.4 \left(\frac{D}{d_{50}}\right)^{1.2} + 10.6 \left(\frac{D}{d_{50}}\right)^{-0.13}} \right] \quad (7)$$

برای محاسبه عمق آبخستگی در گروه‌پایه‌های پل، عرض مؤثر معادل، D_F^* ، به جای عرض تک‌پایه پل (D)، در معادلات مذکور قرار داده می‌شود (Sheppard and Renna, 2010).

$$D_F^* = K_{sp} K_h K_m K_{sh} D_p \quad (8)$$

که در معادله (8)، K_{sp} ضریب تصحیح برای فاصله پایه‌ها، K_h ضریب ارتفاع گروه پایه، K_m ضریب تصحیح تعداد ردیف‌های هم راستا با جریان می‌باشد، K_{sh} ضریب شکل و D_p عرض تصویر شده پایه‌ها می‌باشد. مقادیر D_p و K_{sp} مانند روش HEC-18 بدست می‌آیند.

عمق آبخستگی در زاویه قرارگیری 25 درجه مشاهده شد. (Ataie-Ashtiani and Beheshti, 2006) به بررسی آزمایشگاهی آبخستگی در اطراف گروه پایه‌های پل پرداختند و یک فاکتور تصحیح جهت تخمین بیشینه عمق آبخستگی در گروه پایه ارائه کردند. آرایش پایه‌ها، فاصله مرکز به مرکز پایه‌ها، نرخ جریان و اندازه دانه‌های رسوبی پارامترهای متغیر در نظر گرفته شدند. Lanca et al. (2013) به بررسی تأثیر زمان، زاویه قرارگیری پایه‌ها نسبت به جهت جریان، فاصله مرکز به مرکز پایه‌ها و تعداد ردیف‌های هم راستا با جریان، بر روی عمق آبخستگی در گروه پایه‌های پل پرداختند.

جهت تخمین عمق آبخستگی در گروه پایه‌های پل معادلاتی توسط اداره بزرگراه‌های آمریکا در نشریه (HEC-18) (Arneson et al., 2012) و (Sheppard and Renna, 2010) معرفی شده‌اند.

1-1-1- معادلات تخمین بیشینه عمق آبخستگی در

اطراف گروه پایه‌های پل

1-1-1- معادله (HEC-18)

این معادله توسط اداره بزرگراه‌های آمریکا (FHWA)، برای تخمین بیشینه عمق آبخستگی، d_{SH} ، در اطراف تک‌پایه پیشنهاد شده است، که در معادله (1) نشان داده شده است (Arneson et al., 2012).

$$\frac{d_{SH}}{h} = 2 K_1 K_2 K_3 \left(\frac{D}{h}\right)^{0.65} F_r^{0.43} \quad (1)$$

در این رابطه، K_1 ضریب تصحیح اثر شکل دماغه پایه، K_2 ضریب تصحیح اثر زاویه برخورد جریان و K_3 ضریب تصحیح برای شرایط بستر است. h عمق آب دقیقاً در بالادست پایه، D عرض یا قطر پایه و $F_r = V/(gh)^{0.5}$ عدد فرود جریان در بالادست پایه می‌باشد. V سرعت جریان در بالادست پایه و g شتاب ثقل می‌باشد. ضریب K_2 برای اثر زاویه برخورد جریان به صورت معادله (2) نیز محاسبه می‌گردد:

$$K_2 = \left(\cos \theta + \frac{L}{D} \sin \theta \right)^{0.65} \quad (2)$$

که θ زاویه برخورد جریان با پایه و L طول پایه می‌باشد. برای تخمین عمق آبخستگی در گروه پایه‌های پل با استفاده از رابطه HEC-18، لازم است تا عرض مؤثر

¹ Bridge scour manual

در بیشتر مطالعات قبلی با توجه به اینکه آزمایش‌ها در زمان کوتاه و قبل از رسیدن به زمان تعادل آبشستگی متوقف شده‌اند (با توجه به معیارهای ارائه شده برای تعیین زمان تعادل آبشستگی در پایه‌های پل توسط محققان مختلف که از جمله مهمترین آن‌ها می‌توان به معیار Melville and Chiew (1999) و Grimaldi (2005) اشاره کرد؛ بنابراین بر این اساس می‌توان ادعا نمود که مقدار عمق تعادل آبشستگی در اطراف پایه‌ها حاصل نگردیده است. از آنجایی شناسایی بحرانی‌ترین و بهترین زاویه قرارگیری دو پایه پل جهت احداث پل جدید در بالادست یا پایین‌دست پل قدیمی، می‌تواند سودمند واقع گردد، ضرورت دانسته شد که تأثیر زاویه قرارگیری دو پایه پایه پل نسبت به جهت جریان، بر روی عمق تعادل آبشستگی که تا کنون بررسی نشده است، مورد مطالعه قرار گیرد. از این رو در این مطالعه پایه‌ها با 4 زاویه مختلف 0، 30، 60 و 90 درجه در کانال قرار داده شدند و تأثیر زاویه بر روی زمان و عمق تعادل آبشستگی در پایه‌ها بررسی گردید.

جریان نزدیک شونده، U_c سرعت بحرانی، σ_g انحراف معیار هندسی، B عرض کانال، ρ چگالی آب، ρ_s چگالی شناور رسوب، g شتاب ثقل، θ لزوجت کینماتیکی و s فاصله مرکز به مرکز پایه‌ها می‌باشد. همچنین $F_r = \frac{U}{\sqrt{gD}}$ عدد فرود پایه و $R_p = \frac{UD}{g}$ عدد رینولدز پایه می‌باشد. تأثیر پارامترهای بی‌بعد در معادله 9 توسط محققان در گذشته مورد بررسی قرار گرفته است. جهت اعمال نتایج آزمایش‌ها به مدل واقعی لازم می‌گردد که اثر پارامترهای مختلف بر فرایند آبشستگی از بین برود. بدین ترتیب تأثیر پارامترهای عرض کانال (اثر دیواره¹)، عمق جریان (اثر آب کم عمق²)، اندازه ذرات رسوبی و ویسکوزیته حذف می‌گردد. بنابراین برای رسیدن به بیشینه عمق آبشستگی در شرایط آبشستگی آب زلال، لازم است تا ملاحظات زیر در نظر گرفته شوند. که از آن جمله می‌توان به محدوده شدت جریان $1 \leq \frac{U}{U_c} \leq 0.9$ اشاره داشت. همچنین اگر $\frac{B}{D} \geq 10$ باشد، اثر دیواره (اثر انسداد) بر روی عمق آبشستگی به علت حضور پایه‌ها در کانال از بین می‌رود (Melville and Chiew, 1999). برای اینکه تأثیر اندازه رسوبات بر روی عمق آبشستگی حذف گردد، مقدار بی‌بعد $\frac{D}{d_{50}}$ باید بزرگتر و مساوی 25 در نظر گرفته شود. با تنظیم عمق جریان در محدوده $\frac{h}{D} \geq 2.5$ عمق جریان در فرایند آبشستگی بی‌تأثیر خواهد بود (Melville and Sutherland, 1988). در این راستا، رسوبات یکنواخت ($\sigma_g < 1.4$) برای انجام آزمایش‌ها در نظر گرفته شدند (Dey et al., 1995). بر اساس نتایج Franzetti et al. (1994) در صورتی که $R_p \geq 7000$ باشد، تأثیر ویسکوزیته بر فرایند آبشستگی از بین می‌رود. بر اساس مطالعات Khaple et al. (2017) و Ataie-Ashtiani and Beheshti (2006) در دو پایه پل با زاویه 0 درجه نسبت به جهت جریان، بیشینه عمق آبشستگی در فاصله مرکز به مرکز پایه‌ها 3 برابر قطر پایه پل می‌تواند حاصل گردد. بر این اساس فاصله مرکز به مرکز پایه‌ها در مطالعه حاضر 3 برابر قطر پایه پل در نظر گرفته شد. مقدار $\Delta = \frac{\rho_s}{\rho}$ ثابت و برابر 1/65 در نظر گرفته شد. (Tafarjnorouz et al. (2012)). در زمان تعادل آبشستگی تغییرات عمق آبشستگی ناچیز است و ابعاد

در بیشتر مطالعات قبلی با توجه به اینکه آزمایش‌ها در زمان کوتاه و قبل از رسیدن به زمان تعادل آبشستگی متوقف شده‌اند (با توجه به معیارهای ارائه شده برای تعیین زمان تعادل آبشستگی در پایه‌های پل توسط محققان مختلف که از جمله مهمترین آن‌ها می‌توان به معیار Melville and Chiew (1999) و Grimaldi (2005) اشاره کرد؛ بنابراین بر این اساس می‌توان ادعا نمود که مقدار عمق تعادل آبشستگی در اطراف پایه‌ها حاصل نگردیده است. از آنجایی شناسایی بحرانی‌ترین و بهترین زاویه قرارگیری دو پایه پل جهت احداث پل جدید در بالادست یا پایین‌دست پل قدیمی، می‌تواند سودمند واقع گردد، ضرورت دانسته شد که تأثیر زاویه قرارگیری دو پایه پایه پل نسبت به جهت جریان، بر روی عمق تعادل آبشستگی که تا کنون بررسی نشده است، مورد مطالعه قرار گیرد. از این رو در این مطالعه پایه‌ها با 4 زاویه مختلف 0، 30، 60 و 90 درجه در کانال قرار داده شدند و تأثیر زاویه بر روی زمان و عمق تعادل آبشستگی در پایه‌ها بررسی گردید.

2- مواد و روش‌ها

2-1- آنالیز ابعادی

آبشستگی یک پدیده پیچیده می‌باشد و پارامترهای متعددی بر آن تأثیرگذار هستند. با توجه به اینکه لحاظ کردن تمام پارامترها در آبشستگی امری مشکل می‌باشد، بنابراین با انجام آنالیز ابعادی و بی‌بعد کردن پارامترها، تعداد آن‌ها کاهش می‌یابد. با در نظر گرفتن شرایط جریان یکنواخت و آبشستگی آب زلال و بکار بردن رسوبات یکنواخت با اندازه میانگین d_{50} ، برای دو پایه پل به قطر D ، با زاویه θ نسبت به جهت جریان، که در یک کانال مستطیلی قرار گرفته‌اند، بیشینه عمق آبشستگی در جلو پایه‌ها d_s ، در زمان t ، در حالت بی‌بعد بر اساس تئوری باکینگهام می‌تواند به صورت رابطه ذیل بیان گردد:

$$\frac{d_s}{D} = \varphi \left(\frac{U}{U_c}, \frac{\rho_s}{\rho}, \frac{s}{D}, \frac{h}{D}, \frac{B}{D}, \frac{Ut}{D}, \frac{D}{d_{50}}, \sigma_g, \frac{U}{\sqrt{gD}}, \frac{UD}{g}, \theta \right) \quad (9)$$

که در این رابطه φ تابع نامعلوم، h عمق جریان، U سرعت

¹ Wall effect (blockage effect)

² Shallowness effect

یکنواخت از جنس سنگ کوارتز و با قطر میانگین 1/78 میلی‌متر پر شد (بستر رسوبی). ابتدای بستر رسوبی در فاصله 4 متری از ابتدای کانال قرار داشت. پایه‌های پل از لوله‌های پی وی سی شفاف تهیه گردیده و در فاصله 7 متری از ابتدای کانال قرار داده شدند، تا از ایجاد جریان توسعه یافته در منطقه انجام آزمایش‌ها اطمینان حاصل شود. جهت آرام نمودن جریان و کاهش نوسانات سطح آب در کانال، در داخل مخزن ابتدایی یک توری با فیلتر اسفنجی متصل به آن جاسازی شد و به علاوه از یک فوم عایق اکس پی اس (XPS)، در ورودی کانال به طور شناور بر روی سطح آب استفاده شد. قبل از آغاز آزمایش‌ها بستر رسوبی توسط یک صفحه چوبی (ماله) کاملاً مسطح و تراز می‌گردید و یک صفحه نازک پی وی سی شفاف، جهت جلوگیری از آبشستگی غیرکنترل شده در ابتدای آزمایش، در اطراف پایه‌ها قرار داده می‌شد. دبی جریان ورودی توسط یک سیستم اتوماتیک پمپ و دبی‌سنج تنظیم می‌گردید. برای برقراری جریان با دبی مد نظر در کانال (81 لیتر بر ثانیه)، ابتدا جریان با دبی کم حدود 5 لیتر بر ثانیه وارد کانال می‌شد تا بستر رسوبی دچار فروپاشی نگردد، سپس مقدار دبی به تدریج افزایش داده می‌شد تا مقدار دبی طراحی شده در کانال برقرار گردد. عمق جریان توسط دریچه یکطرفه واقع در انتهای کانال کنترل و مقدار آن توسط سطح سنج با دقت 0/1 میلی‌متر اندازه‌گیری شد. پس از تنظیم دبی و عمق جریان و برقراری سرعت جریان مورد نظر طراحی شده در کانال، صفحه نازک پی وی سی شفاف مجاور پایه‌ها حذف می‌شد و زمان لحظه شروع آزمایش‌ها ثبت می‌شد. پس از آن تغییرات عمق آبشستگی با توجه به بازه‌های زمانی از پیش تعیین شده برداشت می‌گردید. بدین منظور دوربین مدل GO Pro در زمان‌های مشخص شده در نزدیکی پایه‌ها در داخل آب قرار می‌گرفت و با توجه به اینکه دوربین قابل اتصال به کامپیوتر است، مقدار عمق آبشستگی از روی کاغذ میلی‌متری چسبیده شده به جلو پایه‌ها برداشت می‌شد. در انتهای آزمایش پروفیل آبشستگی آزمایش‌ها با استفاده از دستگاه لیزر سه‌بعدی مدل (Baumer, OADM 13I7480/S35A) برداشت شدند. در جدول 1 مشخصات

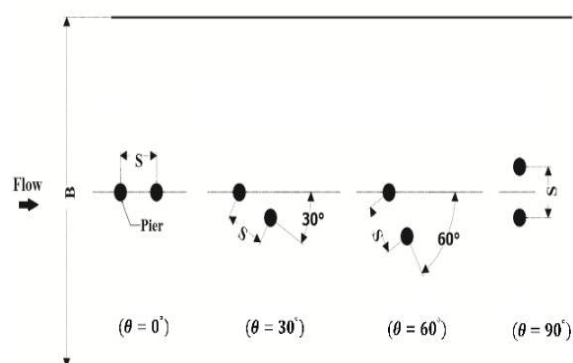
حفره آبشستگی ثابت باقی می‌ماند، بنابراین زمان بی بعد آبشستگی $\frac{Ut}{D}$ در فرایند آبشستگی بی تأثیر است. با توجه به موارد ذکر شده در بالا و دبی جریان ثابت، معادله 9 به صورت ذیل خلاصه می‌گردد:

$$\frac{d_{se}}{D} = \varphi(\theta) \quad (10)$$

جایی که d_{se} عمق تعادل آبشستگی است. مطالعه حاضر با هدف بررسی تأثیر زاویه بر روی عمق تعادل آبشستگی در دو پایه پل انجام شد. بدین منظور پایه‌ها با 4 زاویه مختلف 0، 30، 60 و 90 درجه نسبت به جهت جریان قرار داده شدند (شکل 2). آزمایش‌ها تا رسیدن به عمق تعادل آبشستگی در اطراف پایه‌ها (به طور متوسط 5 روز) ادامه پیدا کردند.

2-2- روش انجام آزمایش

مطالعه حاضر در آزمایشگاه سازه‌های هیدرولیکی موسسه پلی تکنیک فدرال لوزان سوییس (LCH-EPFL)، در راستای مستقیم (به طول 9 متر) یک کانال آزمایشگاهی منحنی، از جنس پی وی سی به عرض 1/3 متر و ارتفاع 0/9 متر انجام شد. کانال آزمایشگاهی مجهز به مخازن ابتدایی و انتهایی بود و دریچه یکطرفه در انتهای کانال قبل از مخزن انتهایی قرار گرفته بود.



شکل 2 آرایش قرار گرفتن پایه‌ها با زوایای مختلف نسبت به جهت جریان

برای انجام آزمایش‌ها در بالادست و پایین‌دست قسمت مستقیم جعبه‌های چوبی به عنوان کف‌های کاذب نصب گردید. فضای بین کف‌های کاذب از رسوبات با دانه‌بندی

شکل 4 تصویر قسمت مستقیم کانال آزمایشگاهی از نمای رو به رو را نشان می‌دهد. افزون بر این در شکل 5 پروفیل آبشستگی در مجاورت پایه‌ها در انتهای آزمایش برای زاویه 30 درجه نشان داده شده است.

$$\frac{U_c}{\sqrt{g d_{50}}} = 1.47 \left(\frac{h}{d_{50}} \right)^{\frac{1}{6}} \quad (11)$$

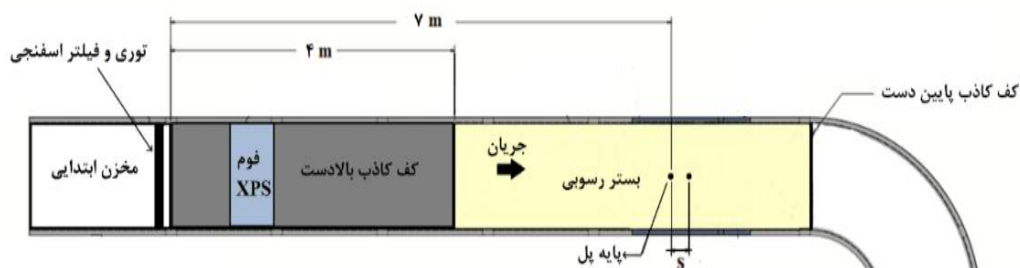
3-2- زمان انجام آزمایش‌ها

برای دستیابی به عمق تعادل آبشستگی در اطراف پایه‌های پل، لازم است آزمایش‌ها در مدت زمان نسبتاً طولانی انجام گردند، به طوری‌که تغییرات عمق آبشستگی در زمان ناچیز گردد و شیب نمودار توسعه زمانی آبشستگی به سمت صفر متمایل گردد (Cardoso and Bettess, 1999).

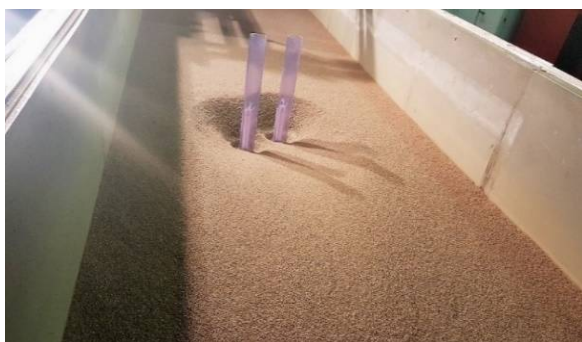
آزمایش‌ها و مقدار پارامترهای بی‌بعد نشان داده شده‌اند. طراحی آزمایش‌ها با توجه به حذف تأثیر اندازه رسوبات، انقباض جریان (اثر دیواره)، ویسکوزیته و آب کم‌عمق بر روی عمق آبشستگی (توضیحات بیشتر در بخش آنالیز ابعادی) برای رسیدن به بیشینه عمق آبشستگی انجام شد. جهت بدست آوردن مقادیر سرعت بحرانی U_c و سرعت برشی بحرانی u_c^* از دیگرام شیلدز و روابط ارائه شده توسط محققان مختلف (Chamov (Dey (2014), Melville and Sutherland (1988) و Sheppard et al. (2013) استفاده شد. سپس آزمایش‌هایی بدون قرار دادن پایه‌ها در کانال انجام شدند. نتایج آزمایشگاهی مقادیر نزدیک به مقادیر محاسبه شده با معادله Chamov (Dey (2014)، معادله (11)، داشتند. در شکل 3 پلان کانال آزمایشگاهی برای راستای مستقیم نشان داده شده است.

جدول 1 مشخصات آزمایش‌ها و مقادیر پارامترهای بی‌بعد

دبی (lit/s)	h (m)	U (m/s)	U/U_c	u_c^*	D (m)	σ_g	h/D	B/D	D/d_{50}	θ (°)	s/D
81	0/165	0/378	0/95	۰/۰۳۳	0/063	1/41	2/54	10/32	35/4	90, 60, 30, 0	3



شکل 3 پلان راستای مستقیم کانال آزمایشگاهی (پایه‌ها با زاویه 0 درجه نسبت به جهت جریان قرار داده شده‌اند)



شکل 5 پروفیل آبشستگی در مجاورت پایه‌های پل برای زاویه 30 درجه



شکل 4 تصویر کانال آزمایشگاهی و منطقه انجام آزمایش

هدف دستیابی به عمق تعادل آبخستگی در مجاور پایه‌ها، d_{se} و زمان متناسب با آن (زمان تعادل آبخستگی)، t_e انجام شدند. تأثیر زاویه پایه‌ها نسبت به جهت جریان، بر روی عمق تعادل آبخستگی، مورد بررسی قرار گرفت. در جدول 2 آزمایش‌ها و مقادیر عمق تعادل آبخستگی، d_{se} و زمان تعادل آبخستگی، t_e نشان داده شده است. در شکل 6، نمودارهای بی بعد توسعه زمانی آبخستگی برای هر 4 زاویه نشان داده شده است (قسمت الف). P_1 و P_2 به ترتیب معرف پایه‌های بالادست و پایین‌دست هستند. با در نظر داشتن زاویه 0 درجه (آزمایش 1)، مشاهده شد که بیشینه عمق آبخستگی، d_s در تمام مدت زمان آزمایش در پایه بالادست بیشتر از بیشینه عمق آبخستگی در پایه پایین‌دست است. زیرا که حضور پایه بالادست سبب کاهش سرعت جریان نزدیک شونده به پایه پایین‌دست و کاهش قدرت گرداب‌های پایین‌رونده و نعل اسبی در اطراف آن می‌شود (اثر محافظت پایه بالادست بر روی پایه پایین‌دست). در نتیجه عمق حفره آبخستگی در جلوی پایه پایین‌دست کمتر از مقدار مشابه آن در پایه بالادست می‌باشد، به گونه‌ای که عمق تعادل آبخستگی، d_{se} در پایه پایین‌دست 76 درصد عمق تعادل آبخستگی در پایه بالادست است. زمان تعادل آبخستگی در این آزمایش 120 ساعت بدست آمد.

با توجه به شکل 7، مشاهدات مربوط به آزمایش‌ها برای حالت زاویه 30 درجه (آزمایش 2)، بیانگر آنست که آبخستگی از جلو پایه‌ها شروع شده (قسمت های 1 در بخش الف) و به سمت پایین‌دست توسعه می‌یابد (قسمت های 2 در بخش الف) و حفره‌های کوچکی در اطراف پایه‌ها شکل می‌گیرند.

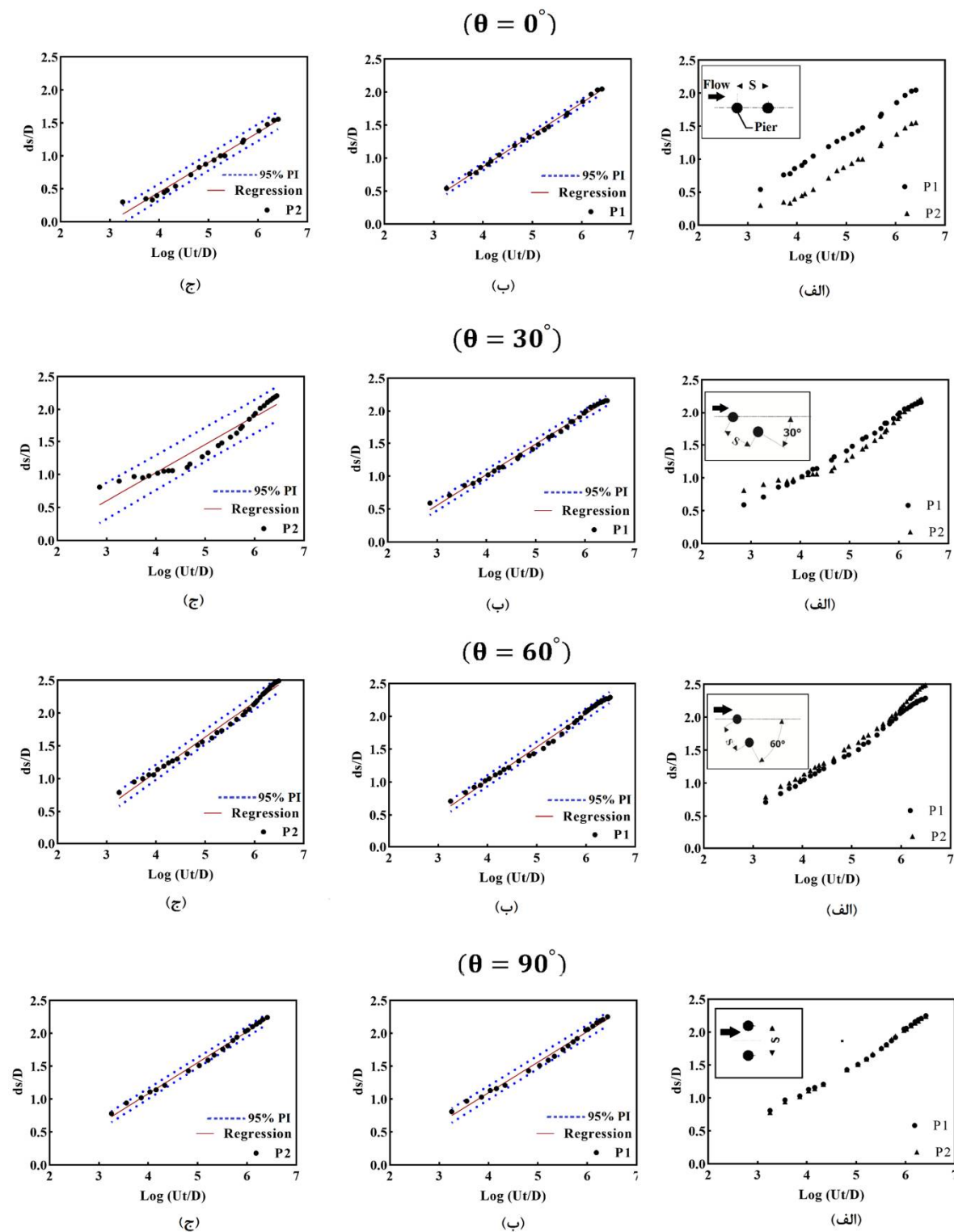
معیارهای مختلفی جهت تعیین زمان تعادل آبخستگی توسط محققان معرفی شده‌اند. (1980) Ettema اعلام نمود در صورتی که تغییرات عمق آبخستگی در فاصله زمانی 4 ساعت کمتر از 1 میلی‌متر باشد، عمق تعادل آبخستگی در مجاور پایه‌های پل حاصل گردیده است. بر اساس مطالعات (Melville and Chiew (1999)، زمان تعادل آبخستگی، زمانی است که تغییرات عمق آبخستگی در دوره زمانی 24 ساعت کمتر و مساوی 5 درصد قطر پایه پل باشد. (2005) Grimaldi معیاری با قابلیت اطمینان بالاتر را برای تعیین زمان تعادل آبخستگی در اطراف پایه‌های پل معرفی نمود به طوری‌که اگر تغییرات عمق آبخستگی در مدت 24 ساعت کمتر و مساوی 1/67 درصد قطر پایه پل باشد، عمق تعادل آبخستگی ایجاد شده است. در مطالعه حاضر از معیار گریمالدی (2005) Grimaldi استفاده شده است و بر اساس این معیار مدت زمان انجام آزمایش‌ها معین گردید. به طوری‌که که اگر تغییرات عمق آبخستگی در مجاور پایه‌ها در فاصله زمانی 24 ساعت کمتر و مساوی 1/05 میلی‌متر باشد (قطر پایه‌ها 63 میلی‌متر است)، عمق تعادل آبخستگی حاصل گشته، بنابراین آزمایش متوقف می‌گردد. در این مطالعه زمان تعادل آبخستگی (t_e) به طور متوسط 5 روز بدست آمد. نتایج حاکی از آن بود که با افزایش زاویه قرارگیری پایه‌ها، زمان تعادل آبخستگی افزایش می‌یابد. برای زاویه 90 درجه زمان تعادل آبخستگی نسبت به زاویه 60 درجه کمتر است (جدول 2).

3- نتایج و بحث

در این مطالعه دو پایه پل با 4 زاویه مختلف 0، 30، 60 و 90 درجه نسبت به جهت جریان قرار داده شدند. آزمایش‌ها در زمان طولانی (به طور متوسط 5 روز) و با

جدول 2 مقادیر عمق تعادل آبخستگی اندازه‌گیری شده در اطراف پایه‌ها، d_{se} ، عمق آبخستگی محاسبه شده به روش HEC-18، d_{sH} ، عمق آبخستگی محاسبه شده به روش FDOT، d_{sF} ، زمان تعادل آبخستگی، t_e ، قطر معادل گروه پایه، D^* .

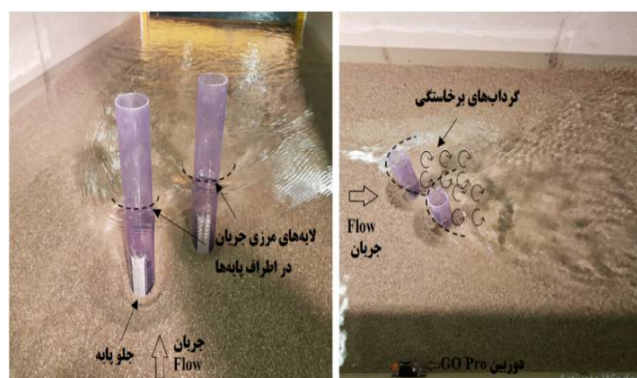
شماره آزمایش	زاویه	d_{se1} (cm)	d_{se2} (cm)	t_e (hr)	a_{proj} (cm)	D_H^* (cm)	d_{sH} (cm)	D_F^* (cm)	d_{sF} (cm)	$(\Delta d_s)_H$ (%)	$(\Delta d_s)_F$ (%)
1	0	12/9	9/6	120	6/3	6/9	12/92	6/6	14/66	0/15	13/64
2	30	13/6	13/9	130	12/6	9/4	14/94	8/6	18/51	7/48	33/16
3	60	14/3	15/7	144	12/6	9/4	14/94	8/6	18/51	-4/8	17/89
4	90	14/2	14/1	120	12/6	9/4	14/94	8/6	18/51	5/2	30/35



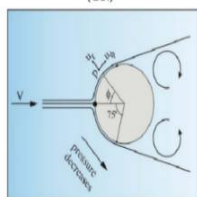
شکل 6 الف- توسعه زمانی آبستنگی در جلو دو پایه برای زوایای مختلف (در حالت بی بعد)، ب- تحلیل رگرسیونی برای پایه بالادست، ج- تحلیل رگرسیونی برای پایه پایین دست

اثر محافظت پایه بالادست بر روی پایه پایین دست کاهش یافته و اثر متقابل گرداب های برخاستگی در پشت پایه ها و

در این حالت با افزایش زاویه از 0 به 30 درجه، پایه پایین دست در معرض کامل جریان قرار می گیرد، در نتیجه



(الف)



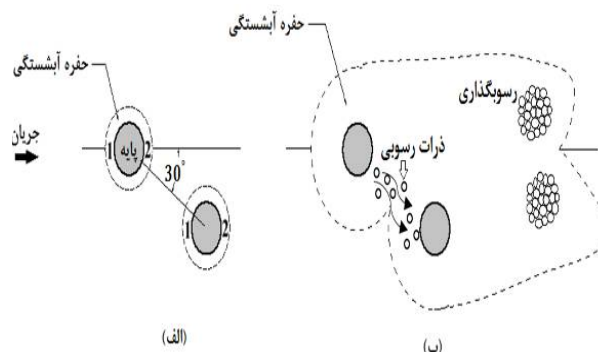
(ب)

شکل 8 الف- تداخل گرداب‌های برخاستگی پایه بالادست و لایه‌های مرزی جریان شکل گرفته در راستای پیرامون بالادست پایه‌ها ب- شکل‌گیری لایه‌های مرزی جریان در پیرامون بالادست پایه پل در اثر عبور از آن (برگرفته از نشریه اداره بزرگراه‌های آمریکا شماره 022-12 (FHWA-HRT-12-022)).

در شکل 7- ب شکل شماتیک پروفیل آبخستگی در اطراف پایه‌ها در زمان حدود 15 ساعت پس از شروع آزمایش نشان داده شده است. با گذشت زمان حفره‌های آبخستگی ایجاد شده در اطراف پایه‌ها توسعه یافته و حفره‌ها در فاصله بین پایه‌ها ادغام می‌گردند. در اثر گرداب‌های برخاستگی در پایین‌دست پایه‌ها رسوبگذاری به صورت تپه‌های کوچک شکل می‌گیرند. این موضوع همچنین در شکل 9 که از نمای کناری پایه‌ها در زیر آب تهیه گردیده است، نمایان می‌باشد.

نتایج نشان داد که در آزمایش با زاویه 60 درجه (آزمایش 3)، بیشینه عمق آبخستگی در تمام زمان آزمایش در پایه پایین‌دست بیشتر از مقدار آن در پایه بالادست است. در این حالت اثر متقابل گرداب‌های برخاستگی در پشت پایه‌ها و لایه‌های مرزی جریان شکل گرفته در راستای پیرامون بالادست پایه‌ها، سبب ایجاد شدت جریان‌های بالاتر شده و عمق آبخستگی در اطراف پایه پایین‌دست نسبت به آزمایش‌های 1 و 2 بیشتر می‌شود.

خطوط لایه‌های مرزی جریان شکل گرفته در راستای پیرامون بالادست پایه‌ها - که در اثر برخورد و عبور جریان از پایه‌ها ایجاد می‌گردند - (اداره بزرگراه‌های آمریکا گزارش شماره 022-12 (FHWA-HRT-12-022)) (شکل 8)، سبب افزایش سرعت جریان در فاصله بین پایه‌ها می‌گردد و در نتیجه عمق آبخستگی در پایه پایین‌دست نسبت به آزمایش اول با زاویه 0 درجه، در ابتدای آزمایش افزایش می‌گردد. در این شرایط اثر متقابل گردابه‌ها غالب بر اثر انتقال رسوب می‌باشد. از زمان شروع آزمایش تا دقیقه 30 (شکل 6- الف) برای زاویه 30 درجه، $\log(Ut/D) = 4.03$ ، بیشینه عمق آبخستگی در پایه پایین‌دست بیشتر از مقدار آن در پایه بالادست ثبت شد. پس از آن، لبه حفره‌های آبخستگی توسعه یافته در اطراف پایه‌ها به یکدیگر نزدیک شدند و رسوبات حفره پایه بالادست به حفره پایه پایین‌دست منتقل شدند (شکل 7- ب). از اینرو شرایط آبخستگی بستر زنده در پایه پایین‌دست ایجاد شد و در نتیجه بروز این فرایند، نرخ آبخستگی در حفره آبخستگی پایین‌دست کاهش یافت، به نحوی که بیشینه عمق آبخستگی در پایه پایین‌دست از زمان 30 تا 4320 دقیقه (72 ساعت) کمتر از مقدار آن در پایه بالادست مشاهده شد. بنابراین می‌توان گفت اثر انتقال رسوب بر اثر متقابل گردابه‌ها غالب گشته است. پس از آن و با گذشت زمان و کاهش نرخ آبخستگی در اطراف پایه‌ها، مجدداً بیشینه عمق آبخستگی در پایه پایین‌دست مشاهده شد. زمان تعادل آبخستگی در این آزمایش نسبت به آزمایش 1 افزایش یافت و 130 ساعت به طول انجامید.



(الف)

(ب)

شکل 7 شماتیک پروفیل آبخستگی: الف- در دقایق اولیه آزمایش، ب- بعد از گذشت 15 ساعت از شروع آزمایش

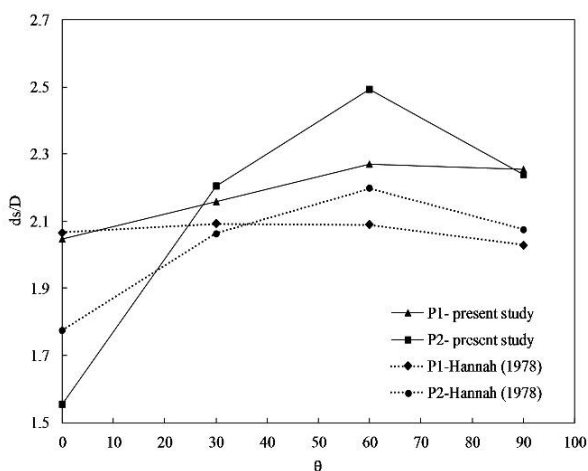
$$R^2 = 0.99 \quad (12)$$

$$\frac{d_{se2}}{D} = -4E - 0.5\theta^2 + 0.0056\theta + 2.04$$

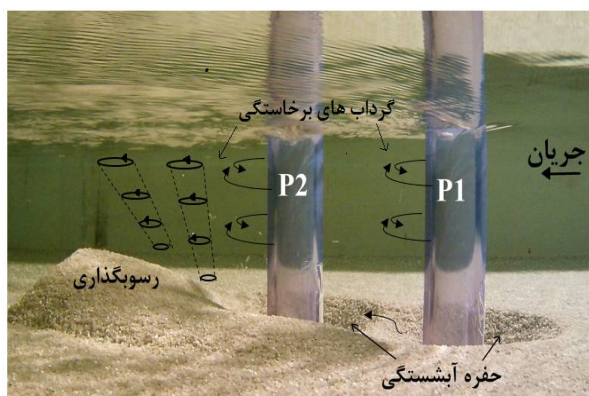
$$R^2 = 0.97 \quad (13)$$

که مقادیر d_{se1} و d_{se2} به ترتیب عمق تعادل آبشستگی در جلو پایه اول و دوم هستند و D قطر پایه پل می‌باشد. نتایج تحقیق حاضر با مطالعه Hannah (1978) برای زوایای مشابه مقایسه گردید. نتایج نشان داد که در هر دو تحقیق با افزایش زاویه عمق آبشستگی در پایه بالادست به مقدار کمی تغییر می‌کند اما تغییرات عمق در پایه پایین-دست قابل ملاحظه می‌باشد. مقادیر عمق آبشستگی در این تحقیق حدود دو برابر عمق آبشستگی بدست آمده در مطالعه Hannah (1978) می‌باشد. علت این موضوع زمان کوتاه انجام آزمایش‌ها (آزمایش‌های 7 ساعته) در تحقیق Hannah (1978) می‌باشد. به طوریکه در مطالعه حاضر تنها حدود 65 درصد عمق تعادل آبشستگی در مدت زمان حدود 6 ساعت رخ داد. در هر دو مطالعه با افزایش زاویه عمق آبشستگی در پایه پایین‌دست افزایش می‌یابد و در زاویه 60 درجه بیشینه مقدار را نشان می‌دهد. همچنین حداقل عمق آبشستگی مربوط به زاویه 0 درجه است (شکل 10).

در جدول 3 مقادیر نسبت بیشینه عمق آبشستگی در زمان‌های مختلف به عمق تعادل آبشستگی در انتهای آزمایش نشان داده شده است.



شکل 10 مقایسه تأثیر زاویه بر روی عمق تعادل آبشستگی در اطراف دو پایه پل



شکل 9 پروفیل آبشستگی از نمای کناری (زیر آب)

عمق تعادل آبشستگی در پایه پایین دست 93 درصد مقدار آن در پایه بالادست است. بنابراین در این زاویه اثر متقابل گردابه‌ها قوی‌تر از اثر انتقال رسوب عمل کرده است. در این آزمایش زمان تعادل آبشستگی 144 ساعت می‌باشد و بیشترین مقدار را نسبت به آزمایش‌های دیگر دارد (جدول 2). در حالت انجام آزمایش با زاویه 90 درجه (آزمایش 4)، بیشینه عمق آبشستگی در اطراف پایه‌ها روند مشابه داشتند و اعماق تعادل آبشستگی تقریباً مقادیر یکسان را در بردارند. با این حال مقدار عمق و زمان تعادل آبشستگی در این حالت نسبت به زاویه 60 درجه کاهش یافته است. به طور کلی با افزایش زاویه پایه‌ها نسبت به جهت جریان، عمق تعادل آبشستگی در جلو پایه‌ها و زمان تعادل آبشستگی افزایش می‌یابند. با توجه به تحلیل نتایج حاصل از مشاهدات و در یک نتیجه‌گیری کلی می‌توان ادعان نمود که بیشینه و کمینه عمق‌های تعادل آبشستگی برای هر دو پایه به ترتیب برای زوایای 0 و 60 درجه مشاهده شد. بیشینه عمق تعادل آبشستگی از زاویه $\theta \geq 28^\circ$ در پایه پایین‌دست مشاهده می‌گردد (شکل 10). افزون بر این با افزایش زاویه زمان تعادل آبشستگی افزایش می‌یابد و بیشترین زمان تعادل آبشستگی مربوط به زاویه 60 درجه می‌باشد (جدول 2). همچنین با توجه به شکل 10 با داشتن زوایای انتخابی، معادلات درجه دوم جهت تخمین عمق تعادل آبشستگی در اطراف هر دو پایه، بر اساس زاویه قرارگیری آن‌ها (θ) به صورت روابط (12) و (13) ارائه شدند.

$$\frac{d_{se1}}{D} = 0.0003\theta^2 + 0.0304\theta + 1.54$$

جدول 3 مقایسه نسبت بیشینه عمق آبخستگی در زمان‌های مختلف به عمق تعادل آبخستگی

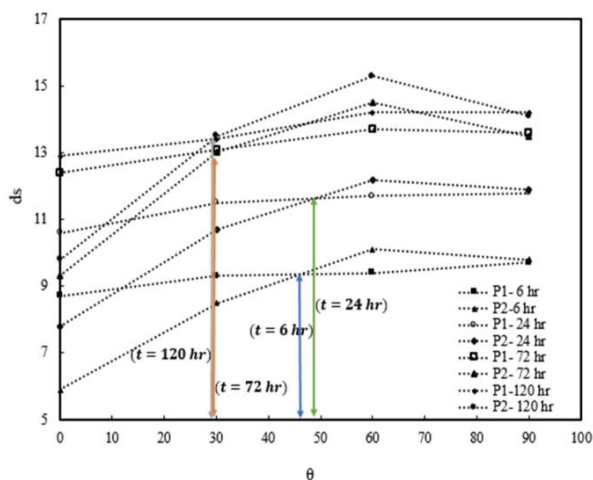
زاویه	d_{s1}/d_{se1}				d_{s2}/d_{se2}			
	$t = 6hr$	$t = 24hr$	$t = 48hr$	$t = 96hr$	$t = 6hr$	$t = 24hr$	$t = 48hr$	$t = 96hr$
0	0/67	0/82	0/9	0/99	0/6	0/8	0/89	0/99
30	0/71	0/84	0/92	0/98	0/6	0/77	0/88	0/97
60	0/65	0/82	0/9	0/98	0/64	0/77	0/86	0/96
90	0/65	0/82	0/91	0/96	0/65	0/83	0/91	0/98

3-1- مدل رگرسیون خطی

مدل‌های رگرسیونی، در واقع یک نگاشت خطی یا غیرخطی از یک متغیر وابسته و یک یا چند متغیر مستقل ایجاد می‌کنند. با معلوم بودن مقادیر متغیرهای مستقل توسط یک رابطه رگرسیونی می‌توان مقدار متغیر وابسته را تخمین زد (رسول زاده و بزرگ حداد، 1387). در این مطالعه با استفاده از نرم‌افزار Minitab 18 رگرسیون خطی برای نمودارهای بی‌بعد آبخستگی هر پایه برآزش داده شد. بیشینه عمق آبخستگی (d_s) متغیر وابسته و مقدار لگاریتمی زمان بی‌بعد ($\frac{Ut}{D}$) متغیر مستقل می‌باشد. برای مقایسه دقت پیش‌بینی‌ها از معیارهای ضریب تعیین $R - Sq (R^2)$ (رابطه 14) و خطای استاندارد رگرسیون (S) (رابطه 15) استفاده شد. ضریب تعیین $(R - Sq)$ ، اندازه‌گیری آماری نزدیکی داده‌ها به خط رگرسیون برآزش داده شده می‌باشد و مقدار آن بین صفر تا 100 درصد بدست می‌آید. هر چه این مقدار به 100 نزدیکتر باشد، مدل از دقت بالاتری برخوردار است. خطای استاندارد رگرسیون (S) فاصله میانگین داده‌ها نسبت به خط رگرسیون است. هر چه مقدار آن کمتر باشد مقدار خطا کمتر و دقت مدل بیشتر است. با توجه به اینکه مقدار ضریب تعیین $(R - Sq)$ در همه مدل‌ها نزدیک به 100 بود و حداکثر مقدار خطای استاندارد (S) کمتر از 0/2 درصد (99/8 درصد دقت) بدست آمد، در نتیجه با توجه به معیارهای ارزیابی فوق دقت مدل‌های رگرسیونی ارائه شده جهت تخمین بیشینه عمق آبخستگی در جلو پایه‌ها (d_s) در هر زمان t قابل قبول است.

$$R^2 = \frac{[\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(\hat{x}_i - \bar{\hat{x}})]^2}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^n (\hat{x}_i - \bar{\hat{x}})^2} \quad (14)$$

نتایج حاکی از آن است که حدود 65 تا 70 درصد عمق تعادل آبخستگی در مدت زمان حدود 6 ساعت اولیه آزمایش اتفاق می‌افتد و به طور متوسط 80 و 90 درصد عمق تعادل آبخستگی در اطراف پایه‌ها پس از 24 و 48 ساعت مشاهده گردید. همچنین با توجه به شکل 11، تحلیل نتایج نشان می‌دهد که در زمان‌های مختلف، زاویه‌ای که در آن بیشینه عمق آبخستگی از پایه بالادست به پایه پایین‌دست منتقل می‌شود تغییر می‌کند و در زمان تعادل آبخستگی کمترین مقدار را به خود اختصاص می‌دهد. همچنین با توجه به توضیحات مربوط به فرایند آبخستگی در قسمت قبل مربوط به زاویه 30 درجه، عیان می‌گردد که بیشینه عمق آبخستگی تا 72 ساعت در پایه بالادست اتفاق افتاده و پس از این زمان به پایه پایین‌دست منتقل شده است. مشاهده و بررسی این فرایند نیازمند آزمایش طولانی مدت است.



شکل 11 تأثیر زاویه بر روی عمق آبخستگی در اطراف پایه‌ها در زمان‌های مختلف

$$S = 0.12 \quad R - Sq = 93.3\% \quad (19)$$

برای زاویه 60 درجه:

$$\frac{d_{s1}}{D} = 0.51 \log\left(\frac{Ut}{D}\right) - 1.026$$

$$S = 0.04 \quad R - Sq = 99.4\% \quad (20)$$

$$\frac{d_{s2}}{D} = 0.53 \log\left(\frac{Ut}{D}\right) - 1.036$$

$$S = 0.054 \quad R - Sq = 99\% \quad (21)$$

برای زاویه 90 درجه:

$$\frac{d_{s1}}{D} = 0.47 \log\left(\frac{Ut}{D}\right) - 0.77$$

$$S = 0.047 \quad R - Sq = 99\% \quad (22)$$

$$\frac{d_{s2}}{D} = 0.47 \log\left(\frac{Ut}{D}\right) - 0.037$$

$$S = 0.036 \quad R - Sq = 99.4\% \quad (23)$$

در جدول 2، مقادیر عمق تعادل آبشستگی اندازه‌گیری شده در انتهای آزمایش d_{se1} و d_{se2} به ترتیب در پایه‌های بالادست و پایین‌دست و همچنین زمان تعادل آبشستگی (t_e) برای زوایای های مختلف θ نشان داده شده است.

عمق آبشستگی معادل گروه پایه توسط معادلات (HEC-18) (d_{sH}) و شپارد و همکاران (d_{sF}) با جایگزینی عرض مؤثر (D^*) به جای قطر پایه پل تکی در معادلات (1) و (4) برای زوایای مختلف محاسبه شدند. نتایج نشان داد که با توجه به اینکه مقادیر مجموع عرض‌های تصویر شده (a_{proj}) و در نتیجه مقادیر عرض مؤثر (D^*) با توجه به معادلات 3 و 8 برای زوایای 30، 60 و 90 درجه یکسان بدست آمده است، بنابراین عمق آبشستگی معادل گروه پایه برای هر سه زاویه (توسط هر دو معادله) برابر بدست می‌آیند.

در جدول 2 مقدار $(\Delta d_s)_H$ و $(\Delta d_s)_F$ به ترتیب معرف درصد خطای نسبی مقادیر عمق آبشستگی محاسبه شده توسط معادلات (HEC-18) و شپارد و همکاران نسبت به بیشینه عمق تعادل آبشستگی مشاهداتی در اطراف پایه‌ها (به عنوان مثال برای زاویه 60 درجه بیشینه عمق آبشستگی در جلو پایه دوم است) می‌باشند. نتایج حاکی از آن است که حداکثر خطای نسبی با استفاده از معادله HEC-18 حدود 7/5 درصد می‌باشد در حالیکه این مقدار توسط معادله شپارد و همکاران 33 درصد برآورد شده است.

$$S = \frac{\sigma}{\sqrt{n}} \quad (15)$$

در روابط فوق، x_i مقادیر مشاهداتی، \hat{x}_i مقادیر تخمین زده شده و \bar{x} میانگین مقادیر مشاهداتی و $\bar{\hat{x}}$ میانگین مقادیر تخمین زده شده، n تعداد کل داده‌ها و σ انحراف معیار داده‌ها می‌باشد. در شکل 6، قسمت‌های ب و ج حدود بازه‌های اطمینان پیش بینی 95 درصد (PI) به ترتیب برای پایه‌های بالادست و پایین‌دست نشان داده شده است. با عنایت به اینکه در تمام نمودارها، داده‌ها در داخل بازه‌های اطمینان پیش‌بینی قرار گرفته‌اند، بنابراین صحت داده‌های مشاهداتی این تحقیق به منظور ارائه نتایج در قالب روابط رگرسیونی در بازه اطمینان 95% مورد تایید است. معادلات رگرسیون خطی برای زوایای مختلف در اطراف هر دو پایه به صورت روابط (16) تا (23) ارائه می‌گردند. عبارات d_{s1} و d_{s2} به ترتیب معرف حداکثر عمق آبشستگی در جلو پایه‌های بالادست و پایین‌دست هستند. معادلات رگرسیون برای زاویه صفر درجه با استفاده از داده‌های تحقیق (Khaple et al. 2014) اعتبارسنجی شدند. نتایج نشان داد معادلات تحقیق حاضر برای زوایای صفر درجه با درصد خطای کمی قادر به تخمین حداکثر عمق آبشستگی در اطراف پایه‌ها هستند. برای زوایای 30، 60 و 90 درجه معادلات رگرسیون خطی توسط داده‌های مطالعه (Hannah 1978) اعتبارسنجی شدند و به طور متوسط حدود 15 درصد خطا در مقدار نتایج مشاهده گردید. لازم به ذکر است که مطالعه (Hannah 1978) در فاصله مرکز به مرکز 5 برابر قطر پایه پل انجام شدند.

برای زاویه 0 درجه:

$$\frac{d_{s1}}{D} = 0.48 \log\left(\frac{Ut}{D}\right) - 1.06$$

$$S = 0.026 \quad R - Sq = 99.7\% \quad (16)$$

$$\frac{d_{s2}}{D} = 0.45 \log\left(\frac{Ut}{D}\right) - 1.36$$

$$S = 0.057 \quad R - Sq = 98.3\% \quad (17)$$

برای زاویه 30 درجه:

$$\frac{d_{s1}}{D} = 0.47 \log\left(\frac{Ut}{D}\right) - 0.84$$

$$S = 0.036 \quad R - Sq = 99.5\% \quad (18)$$

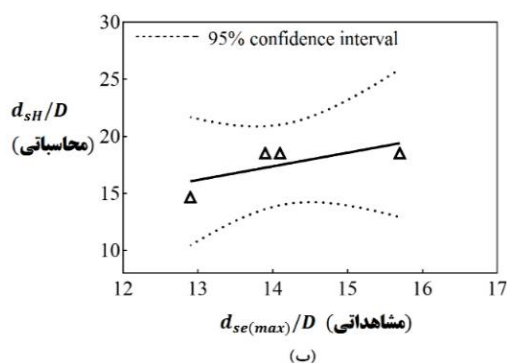
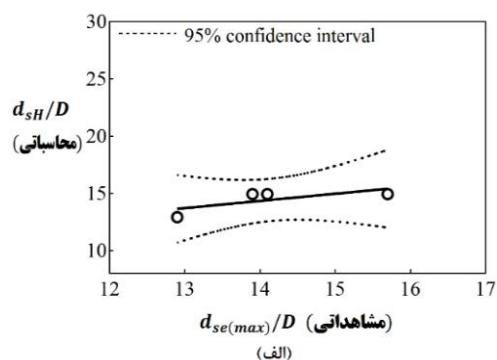
$$\frac{d_{s2}}{D} = 0.43 \log\left(\frac{Ut}{D}\right) - 0.68$$

30، 60 و 90 درجه نسبت به جهت جریان قرار داده شدند. افزون بر این جهت حصول عمق تعادل آبشستگی در جلو پایه‌ها، آزمایش‌ها تا زمان تعادل آبشستگی انجام شدند. نتایج نشان می‌دهد که با افزایش زاویه قرارگیری، اثر محافظت پایه بالادست بر روی پایه پایین دست کاهش می‌یابد و اثر متقابل گرداب‌های برخاستگی در پشت پایه‌ها و لایه‌های مرزی جریان شکل گرفته در راستای پیرامون بالادست پایه‌ها، سبب افزایش عمق و زمان تعادل آبشستگی در پایه‌ها می‌گردد. کمینه و بیشینه عمق تعادل آبشستگی برای هر دو پایه به ترتیب در زوایای 0 و 60 درجه مشاهده شد. نتایج تحلیل‌ها حاکی از آن است که برای زوایای در محدوده $0 \leq \theta \leq 28^\circ$ بیشینه عمق تعادل آبشستگی در جلو پایه بالادست حادث می‌گردد، در حالیکه برای زوایای $\theta > 28^\circ$ بیشینه عمق تعادل آبشستگی در جلو پایه پایین دست مشاهده می‌گردد (شکل 10). روابط ارائه شده جهت تخمین عمق آبشستگی در جلو پایه‌ها توسط روش رگرسیون خطی نیمه لگاریتمی و داده‌های مشاهداتی با توجه به مقادیر بدست آمده برای معیارهای ارزیابی ضریب تعیین $R - Sq (R^2)$ و خطای استاندارد رگرسیون (S)، قابل قبول می‌باشند.

5- فهرست علائم

B	عرض کانال
D	پایه پل به قطر
$\frac{U}{\sqrt{gD}} = F_r$	عدد فرود پایه
d_s	بیشینه عمق آبشستگی در جلو پایه‌ها
d_{se}	عمق تعادل آبشستگی در جلو پایه‌ها
d_{50}	اندازه میانگین رسوبات
g	شتاب ثقل
h	عمق جریان
$\frac{UD}{g} = R_p$	عدد رینولدز پایه
s	فاصله مرکز به مرکز پایه‌ها
t	زمان
t_e	زمان تعادل آبشستگی
U	سرعت جریان نزدیک شونده
U_c	سرعت بحرانی
θ	زاویه قرارگیری پایه‌ها نسبت به جهت جریان

همچنین مقادیر بیشینه عمق تعادل آبشستگی اندازه‌گیری شده در انتهای آزمایش با مقادیر تخمین زده شده توسط معادلات HEC-18 (شکل 12- الف) و FDOT (شکل 12- ب) مقایسه شدند. با توجه به مقایسه حدود بازه‌های اطمینان محاسبه شده مربوط به نتایج روش‌های تخمین عمق آبشستگی HEC-18 و FDOT عیان می‌گردد که نتایج پیش‌بینی حاصل از روش HEC-18 (با توجه به کمتر بودن میانگین بازه اطمینان حدود 4 سانتی‌متر در برابر 7 سانتی‌متر) قابلیت اطمینان پیش‌بینی بالاتری نسبت به نتایج روش FDOT را دارا می‌باشد.



شکل 12 مقایسه عمق تعادل آبشستگی اندازه‌گیری شده (مشاهداتی) در انتهای آزمایش در مقابل مقادیر بدست آمده (محاسباتی) با معادلات: الف - HEC-18، ب - FDOT

4- نتیجه‌گیری

در این مطالعه به بررسی طولانی مدت تأثیر زاویه قرارگیری دو پایه پل نسبت به جهت جریان بر روی عمق تعادل آبشستگی در جلو پایه‌ها، در شرایط آبشستگی آب زلال، پرداخته می‌شود. بدین منظور پایه‌ها با 4 زاویه مختلف 0،

(2012). "Pier scour in clear-water conditions with non-uniform bed materials" (No. FHWA-HRT-12-022).

Hannah, C.R. (1978). "Scour at pile groups". Report No. 78-3, M.S. Thesis, Canterbury University, Canterbury, New Zealand.

Khaple, S. K., Hanmaiahgari, P. R., and Dey, S. (2014). "Studies on the effect of an upstream pier as a scour protection measure of a downstream bridge pier", River flow, Lausanne, Switzerland.

Khaple, S., Hanmaiahgari, P.R., Gaudio, R., and Dey, S. (2017). "Interference of an upstream pier on local scour at downstream piers". Acta Geophys. 65(1), pp. 29–46.

Lanca, R., Fael, C., Maia, R., Pego, J.P., and Cardoso, A.H. (2013). "Clear-Water Scour at Pile Groups". J. Hydraulic Eng. 139, pp.1089–1098.

Laursen, E.M. and Toch, A. (1956). "Scour Around Bridge Piers And Abutments". Bulletin No.4. Iowa Highways Research Board. Ames. IA.

Melville, B.W. and Sutherland, A.J. (1988). "Design Method for Local Scour at Bridge Piers". J. Hydraulic Eng. 114(10), pp.1210–1226.

Melville, B.W. and Chiew, Y.M. (1999). "Time scale for local scour at bridge piers". J. Hydraulic Eng. 125(1), pp.59-65.

Sheppard, D.M. and Renna, R. (2005). "Bridge scour manual". Florida Department of Transportation, 605.

Sheppard, D. M. and Renna, R. (2010). "Florida Bridge Scour Manual". Florida Department of Transportation, Tallahassee, FL.

Sheppard, D.M., Melville, B., and Demir, H. (2013). "Evaluation of Existing Equations for Local Scour at Bridge Piers". J. Hydraulic Eng. 140(1), pp.14–23.

Tafarojnoruz, A., Gaudio, R., and Calomino, F. (2012). "Evaluation of Flow-Altering Countermeasures against Bridge Pier Scour". J. Hydraulic Eng. 138(3), pp. 297–305.

Zhao, G. and Sheppard, D. M. (1999). "The effect of flow skew angle on sediment scour near pile groups". Stream Stability and Scour at Highway Bridges. Compilation of Conference Papers. ASCE. Reston. VA, 377–391.

ρ	چگالی آب
ρ_s	چگالی شن و رسوب
θ	لزوجت کینماتیکی
σ_g	انحراف معیار هندسی رسوبات
φ	تابع نامعلوم

6- منابع

رسولزاده، س. و بزرگ حداد، ا. (1387). "مقایسه شبکه عصبی مصنوعی و رگرسیون خطی چند متغیره در پیشبینی میزان آبدهی مخزن سد کرج". سومین کنفرانس مدیریت منابع آب ایران، دانشگاه تبریز، تبریز.

Arneson, P.F., Zevenbergen, L.A., and Lagasse, L. W. (2012). "Evaluating Scour at Bridges". *Hydraulic Engineering Circular No. 18 (HEC-18)*. Rep. No. FHWA NHI 01-001. Federal Highway Administration. Washington. DC.

Ataie-Ashtiani, B. and Beheshti, A.A. (2006). "Experimental investigation of clear-water local scour at pile groups". J. Hydraulic Eng. 132(10), pp. 1100–1104.

Cardoso, A.H. and Bettess, R. (1999). "Effects of time and channel geometry on scour at bridge abutments". J. Hydraulic Eng. 125(4), pp. 388-399.

Dey, S., Bose, S.K. and Sastry, G.L.N. (1995). "Clear Water Scour at Circular Piers: a model". J. Hydraulic Eng. 121(12), pp. 869–876.

Dey, S. (2014). *Fluvial Hydrodynamics: Hydrodynamic and Sediment Transport Phenomena*, Springer, Berlin.

Ettema, R. (1980). "Scour at bridge piers". Rep. No. 216, University of Auckland, Auckland, New Zealand.

Franzetti, S., Malavasi, S., and Piccinin, C. (1994). sull'erosione alla base pile di ponte in acquechiare. Proc., XXIV Convegno di Idraulica e Costruzioni Idrauliche, vol. 2, T4 13-24 (in italian).

Grimaldi, C. (2005). "Non-conventional countermeasures against local scouring at bridge piers", PhD Thesis, University of Calabria, Cosenza, Italy.

Guo, J., Suaznabar, O., Shan, H., and Shen, J.

An investigation on the impacts of the skew angle on two bridge piers with respect to the flow direction on the equilibrium scour depth at the piers front

Sargol Memar¹, Mohammad Zounemat-Kermani^{2*}, Majid Rahimpour³, Ali-Asghar Beheshti⁴ and Anton J. Schleiss⁵

1- Ph.D. candidate, Water Engineering Department, Shahid Bahonar University of Kerman, Kerman, Iran

2- Associate Professor, Water Engineering Department, Shahid Bahonar University of Kerman, Kerman, Iran

3- Associate Professor, Water Engineering Department, Shahid Bahonar University of Kerman, Kerman, Iran

4- Assistant Professor, Water Resources Engineering Department, Ferdowsi University of Mashhad, Iran

5- Professor, Laboratory of Hydraulic Constructions (LCH), Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL), Station 18, 1015 Lausanne, Switzerland.

* zounemat@uk.ac.ir

Abstract

In this study, the impacts of skew angle of two bridge piers with respect to the flow direction on the equilibrium scour depth in front of the piers under clear water condition is investigated. For this purpose, the piers are aligned with four different skew angles with respect to the flow direction. Additionally, to obtain the equilibrium scour depth in front of the piers, the experiments are performed until reaching the equilibrium time. The results show that increasing the skew-angle increases the equilibrium scour depth and time. The minimum and maximum equilibrium scour depths at both piers occur at the skew-angles of 0 and 60 degree, respectively. Regarding the analysis of the results, the maximum equilibrium scour depths in front of the piers, for the skew angles less than 28 degree occur at the upstream pier while for the skew angles greater than 28 degree is shifted to the downstream pier. In the following, formula are provided to estimate the scour depths in front of the piers, utilizing the Semi-logarithmic linear regression method and observed data.

Keywords: Scour, Sheltering effect, Flow pattern, Horseshoe vortex, Bridge pier.