

بررسی آزمایشگاهی اثر آرایش گروه شمع‌ها بر عمق آب‌شستگی در پایه‌های پل

عطا امینی^{۱*} و افشین اقبال‌زاده^۲

چکیده

آب‌شستگی پایه‌های پل اصلی‌ترین عامل تخریب پل‌ها محسوب می‌شود. پیچیدگی مکانیسم آب‌شستگی در اطراف پایه‌های پل باعث شده که علی‌رغم پژوهش‌های گسترده‌ای که انجام شده، هنوز معادله مناسبی برای پیش‌بینی عمق آب‌شستگی در دست نمی‌باشد. این مکانیسم در گروه شمع‌ها، پیچیده‌تر است. در این تحقیق از مدل فیزیکی برای مطالعه آب‌شستگی در اطراف گروه شمع‌ها در شرایط آب زلال و بیشترین سرعت جریان در کانال آزمایشگاهی استفاده شده است. کانال آزمایشگاهی مورد استفاده طول ۴۶ متر، عرض ۱/۵۲ متر و عمق ۱/۹ متر دارد. بستر کانال از رسوبات یکنواخت با اندازه متوسط ۰/۸ میلی‌متر پوشیده شده است. مدل‌های مختلفی از گروه شمع‌ها، با آرایش‌های متفاوت، آزمایش شد. نتایج نشان می‌دهد که آرایش پایه‌ها در گروه شمع‌ها، مقدار عمق آب‌شستگی موضعی را تحت تأثیر قرار می‌دهد. همچنین با افزایش تعداد ردیف شمع‌ها تا ۵ ردیف در جهت جریان، عمق آب‌شستگی افزایش می‌یابد. با استفاده از داده‌های به دست آمده، رابطه‌ای جدید برای تخمین اثر آرایش شمع‌ها بر عمق آب‌شستگی موضعی در اطراف گروه شمع‌ها ارائه شده که می‌تواند در تعیین عمق آب‌شستگی در گروه شمع‌ها استفاده شود.

واژه‌های کلیدی: آب‌شستگی، آرایش شمع‌ها، انتقال رسوب، پایه‌های پل، گروه شمع‌ها، مدل فیزیکی.

ارجاع: امینی ع. و اقبال‌زاده ا. ۱۳۹۱. بررسی آزمایشگاهی اثر آرایش گروه شمع‌ها بر عمق آب‌شستگی در پایه‌های پل. مجله پژوهش آب ایران. ۱۱(۶):۹۵-۱۰۳.

۱- دکترای مهندسی عمران- منابع آب، مرکز تحقیقات کشاورزی و منابع طبیعی کردستان.

۲- استادیار گروه مهندسی عمران، دانشگاه رازی کرمانشاه، پژوهشکده تحقیقات پیشرفته آب و فاضلاب، دانشگاه رازی کردستان.

* نویسنده مسئول: ata_aminini@yahoo.com

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۰/۰۷/۳۰

تاریخ دریافت: ۱۳۹۰/۰۲/۲۷

مقدمه

روش‌ها، عرض معادل، به صورت عرضی تعریف می‌شود که عمق آبشستگی ناشی از آن با عمق آبشستگی گروه شمع‌ها در شرایط جریان و رسوب مشابه، برابر باشد (شپارد و رنا، ۲۰۰۵). فاصله بین شمع‌ها، زاویه برخورد آب با شمع‌ها، میزان مستغرق بودن شمع‌ها و نیز آرایش یا نحوه قرارگیری شمع‌ها نسبت به یکدیگر، مهمترین عواملی هستند که عمق آبشستگی در گروه شمع‌ها را تحت تأثیر قرار می‌دهند. اثر هر کدام از این عوامل به صورت ضرایبی در معادله اصلی (معادله آبشستگی در یک پایه ساده) ضرب می‌شوند.

ژائو و شپارد (۱۹۹۸) اثر فاصله بین شمع‌ها و زاویه برخورد آب با گروه شمع‌ها را بررسی کردند و تأثیر این عوامل را بر آبشستگی نشان دادند. امینی و همکاران (۲۰۱۰) گروه شمع‌ها را در دو حالتی که شمع‌ها مستغرق یا غیرمستغرق باشند بررسی کرده و با محاسبه اثرات میزان مستغرق بودن شمع‌ها و فاصله بین آن‌ها، روشی را برای محاسبه آبشستگی گروه شمع‌ها ارائه کردند. سازمان نظارت بر بزرگراه‌های آمریکا^۵ در استاندارد مهندسی هیدرولیک شماره ۱۸^۶، (ریچاردسون و دیویس، ۲۰۰۱) و نیز مرکز ترافیک فلوریدا^۷ در راهنمای آبشستگی پل (شپارد و رنا، ۲۰۰۵) روشی را برای محاسبه آبشستگی در پل‌های با هندسه مرکب شامل پایه اصلی، سرشمع و شمع‌ها، ارائه کرده‌اند. در این روش‌ها اثر آرایش شمع‌ها به وسیله معادلات متفاوتی تخمین زده می‌شوند. روابطی که توسط سازمان نظارت بر بزرگراه‌های آمریکا و مرکز ترافیک فلوریدا برای برآورد اثر تعداد ردیف پایه‌ها (m) بر عمق آبشستگی در گروه شمع‌ها، به کار می‌روند، به صورت زیر هستند:

رابطه ارزیابی شده در HEC-18

$$K_m = 0.9 + 0.1m - 0.0714(m-1) \left[2.4 - 1.1 \left(\frac{S}{D} \right) + \left(\frac{S}{D} \right)^2 \right] \quad (1)$$

رابطه ارزیابی شده در FDOT:

$$K_m = \begin{cases} 0.045(m) + 0.95 & |\alpha| < 5^\circ, m \leq 5 \\ 1.19 & |\alpha| < 5^\circ, m > 5 \\ 1 & |\alpha| > 5^\circ \end{cases} \quad (2)$$

انواع متنوعی از گروه پایه‌ها به طور وسیعی به عنوان شالوده سازه‌های دریایی و پایه پل‌ها کاربرد دارند. ایجاد و گسترش آبشستگی در پایه پل‌ها از مهمترین عوامل آسیب و خرابی پل‌ها است. پیش‌بینی نحوه ایجاد، گسترش و وضعیت نهایی گودال آبشستگی از مهمترین موارد طراحی هیدرولیکی پل‌ها است (عطایی آشتیانی و بهشتی، ۲۰۰۶). در دهه‌های اخیر، پژوهش‌های گسترده‌ای در زمینه تخمین میزان عمق آبشستگی و درک مکانیسم آن در پایه پل‌ها انجام شده است. طراحی و به تبع آن پایداری این سازه‌ها، به طور مستقیم به تخمین حداکثر عمق آبشستگی در شرایط مختلف بستر و جریان رودخانه بستگی دارد. لذا تخمین دقیق حداکثر عمق آبشستگی در اطراف گروه پایه‌ها به عنوان ضرورتی اجتناب‌ناپذیر در کارهای مهندسی مطرح است.

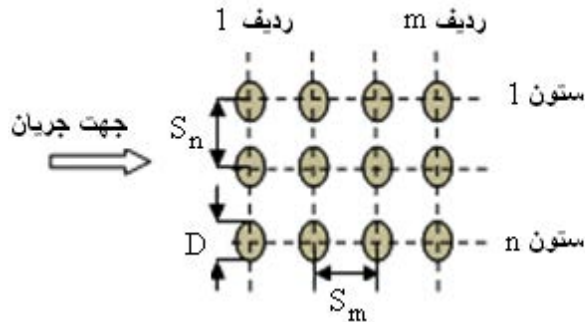
برخلاف پایه‌های ساده، آبشستگی در گروه شمع‌ها و نیز پایه‌هایی با هندسه مرکب، کمتر بررسی شده است (هانا، ۱۹۷۸؛ سلیم و جونس، ۱۹۹۶؛ سامر و همکاران، ۲۰۰۵؛ شپارد و گلاسر، ۲۰۰۴؛ عطایی آشتیانی و بهشتی، ۲۰۰۶؛ امینی و همکاران، ۲۰۱۰). مکانیسم آبشستگی در گروه شمع‌ها علی‌رغم پیچیدگی زیاد، تا حدی شناخته شده است. زرداوکوویچ (۱۹۸۷) این مکانیسم را با توجه به فاصله شمع‌ها و نحوه آرایش آن‌ها تشریح کرد. این پژوهش‌ها نشان داد چهار عامل اصلی در آبشستگی اطراف گروه شمع‌ها مؤثر هستند: عامل تقویت کننده^۱ که باعث افزایش عمق آبشستگی در پایه جلویی می‌شود؛ گرداب‌های برخاستگی^۲ که از بستر به سمت سطح آب شکل می‌گیرند؛ عامل حفاظتی^۳ که باعث کاهش سرعت جریان نزدیک شونده به پایه‌های پایین دست می‌شود؛ و گرداب‌های نعل اسبی به هم فشرده^۴ که از تداخل گرداب‌های نعل اسبی پایه‌های مجاور ناشی می‌شوند.

در روش‌های متداول کنونی، برای محاسبه عمق آبشستگی گروه شمع‌ها و پایه‌های با هندسه مرکب، ابتدا عرض معادل محاسبه و سپس با استفاده از روابط موجود برای تخمین عمق آبشستگی در شمع‌های ساده، عمق آبشستگی ناشی از گروه شمع‌ها محاسبه می‌شود. در این

- 1- Reinforcing
- 2- Shed vortices
- 3- Sheltering
- 4- Compressed horseshoes vortex

5- Federal Highway Administration (FHWA)
6- Hydraulic Engineering Circular No.18 (HEC-18)
7- Florida Department of Transportation (FDOT)

پارامترها در شکل ۱ تعریف شده‌اند. شکل ۱ نمونه‌ای از گروه شمعه‌ها با $m=4$ ردیف و $n=3$ ستون را نشان می‌دهد. m تعداد پایه‌ها در جهت موازی با جریان و n تعداد آن‌ها در جهت عمود بر جریان است.

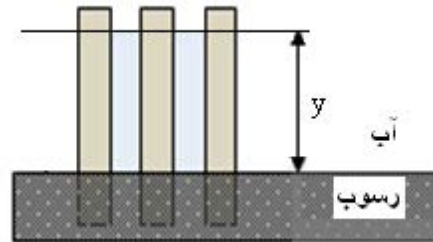


شکل ۱- گروه شمعه‌ها با آرایش ۴*۳ و نمایش اختصارات به کار رفته در این تحقیق

شبکه‌ای از موانع مانند فیلترهای شنی، سرریز لبه تیز و صفحات مشبک، اغتشاش و آشفتگی جریان ورودی حذف شد، به طوری که در محل آزمایش‌ها، توزیع سرعت در جهت عمود بر جریان نسبتاً یکنواخت می‌شد. انتقال آب از مخزن اصلی آزمایشگاه به کانال، در سیستمی بسته، به وسیله یک دستگاه پمپ و لوله‌هایی به قطر ۲۵۰ میلی‌متر انجام می‌گرفت.

برای مدل‌سازی شمعه‌ها لوله‌هایی با جنس پلی‌اتیلن با مقطع دایره‌ای، و با دو قطر $D = 42$ و $D = 60$ میلی‌متر در آزمایش‌ها به کار رفت. فاصله مرکز شمعه‌ها در جهات طولی و عمود بر جریان (S_n و S_m) از ۱ تا $6/4$ برابر قطر شمعه متغیر در نظر گرفته شد. یک سری از آزمایش‌ها به منظور ارزیابی اثر آرایش شمعه‌ها و فاصله آن‌ها از همدیگر انجام گرفت. سری دوم آزمایش‌ها، برای ارزیابی اثر تعداد ردیف‌های شمعه‌ها درحالتی که فاصله آن‌ها ثابت بود، انجام شد. در این حالت فاصله مرکز شمعه‌ها در جهات طولی و عمود بر جریان یکسان و معادل ۲ برابر قطر شمعه‌ها در نظر گرفته شد. مدل‌های گروه شمعه‌ها در کانال آزمایشگاهی، به نحوی طراحی شدند که تأثیر سایر متغیرهای مؤثر بر میزان آب‌شستگی به حداقل برسد. بر اساس تحقیقات رودکیوی و اتما (۱۹۸۳)، ملویل و چپو (۱۹۹۹) و ملویل و سادرلند (۱۹۸۸)، به منظور حذف اثر اندازه رسوبات بر میزان آب‌شستگی، نسبت d_{50} / d_{50} قطر میانگین رسوبات است) کمتر از ۵۰ در نظر گرفته شد. همچنین برای اجتناب از تأثیر تنگ‌شدگی کانال

که در آن، K_m ضریب تأثیر آرایش گروه شمعه‌ها، S فاصله مرکز شمعه‌ها (با فرض اینکه در جهات طولی و عمود بر جریان این فاصله یکسان است: $S = S_m = S_n$) و α زاویه برخورد جریان آب با گروه پایه‌ها هستند. سایر



در تحقیق حاضر با شبیه‌سازی فیزیکی آب‌شستگی، ضمن تشریح مکانیسم آب‌شستگی در گروه شمعه‌ها، اثر آرایش آن‌ها بر عمق آب‌شستگی موضعی بررسی شد و رابطه‌ای برای محاسبه اثر آرایش گروه شمعه‌ها بر عمق آب‌شستگی موضعی ارائه شده است.

مواد و روش‌ها

مشخصات کانال آزمایشگاهی مورد استفاده در این تحقیق، مدل گروه شمعه‌ها، خصوصیات رسوبات و کمیت‌های اندازه‌گیری شده در زیر تشریح شده‌اند. آزمایش‌ها در کانالی آزمایشگاهی با دیواره آجری و شیشه‌ای به طول ۴۶ متر، عرض ۱/۵۲ متر و عمق ۱/۹ متر در مؤسسه ملی تحقیقات هیدرولیک مالزی در کوالالامپور^۱ انجام گرفت. در فاصله ۱۰/۳ متر پایین‌تر از ورودی کانال آزمایشگاهی، بخشی از کانال به طول ۱۵ متر با رسوب یکنواخت به ضخامت ۰/۵۵ متر پر شد. یک دریچه کنترلی خودکار در انتهای کانال آزمایشگاهی، سرعت جریان و عمق آب را تنظیم می‌کرد. برای داشتن بستری هموار و یکنواخت، قبل از انجام هر آزمایش با استفاده از ارتفاع سنج نصب شده بر دیواره‌های کانال آزمایشگاهی، هموار بودن سطح بستر کنترل می‌شد. محل انجام آزمایش‌ها، در محور مرکزی کانال آزمایشگاهی و به فاصله ۲۲/۵ متر پایین‌تر از ورودی کانال قرار داشت. این فاصله برای آرام کردن جریان ورودی استفاده شد. در ورودی کانال، با ایجاد

1- National Hydraulic Research Institute of Malaysia (NAHRIM)

دانه که اغلب در پایان آزمایش در حفره آبشستگی ایجاد می‌شود، از ذرات رسوبی یکنواخت با انحراف معیار هندسی می‌شود. $\sigma_g = \sqrt{\frac{d_{84}}{d_{16}}} = 1.33$ میلی‌متر استفاده شد که از مقدار بحرانی آن برای تشکیل لایه محافظتی ($\sigma_g = 1.4$) کمتر است (ملویل و کولمن، ۲۰۰۰). مشخصات رسوبات مورد استفاده، در جدول ۱ آورده شده است.

جدول ۱- مشخصات رسوبات مورد استفاده

اندازه ذرات (میلی‌متر)				σ_g	سرعت برشی بحرانی (متر بر ثانیه) U_c^*	سرعت بحرانی (متر بر ثانیه) V_c	وزن نسبی S_s
d_{90}	d_{84}	d_{50}	d_{16}				
۱/۲۳	۱/۱	۰/۸۱	۰/۶۲	۱/۳۳	۲/۶۵	۰/۳۸	۰/۰۲

سانتی‌متری از بستر کانال به صورت عمودی و ۱۰ سانتی‌متری به صورت افقی با استفاده از یک دستگاه مولینه اندازه‌گیری شد. سرعت، عمق و دبی جریان در فواصل زمانی کوتاه ۳۰ ثانیه‌ای، با استفاده از دستگاه AVM^۳ که در بالادست محل آزمایش‌ها تعبیه شده بود، توسط کامپیوتر ثبت می‌شدند. این دستگاه، عمق آب و سرعت را به ترتیب با دقت‌های ± 0.08 و ± 0.03 اندازه می‌گیرد. نمایی از کانال آزمایشگاهی و وسایل استفاده شده در شکل ۲ نمایش داده شده است.

بیشترین عمق آبشستگی در هر آزمایش، با استفاده از عمق‌سنج با دقت ۰/۱ میلی‌متر در مقیاس ورنیه اندازه‌گیری شد. این دستگاه روی پایه‌هایی که قابلیت جابجا شدن در جهات عمود و موازی با جهت جریان را داشت، نصب شد. تغییرات بستر بعد از پایان یافتن هر آزمایش و با برداشتن مدل، در رأس شبکه‌هایی به ابعاد ۳×۳ سانتی‌متر در اطراف مدل و ۴×۴ سانتی‌متر در پایین‌دست حفره آبشستگی ثبت شد. عمق آبشستگی در قبل و بعد از تخلیه ملایم آب اندازه گرفته شد، حال آنکه تفاوتی در عمق حفره در هر دو حالت مشاهده نشد. این عدم تفاوت توسط نظریه‌ها (۱۹۹۶) نیز گزارش شده است.

در تعدادی از آزمایش‌ها به منظور ثبت اثر زمان بر عمق آبشستگی، دستگاه سرعت و عمق‌سنج صوتی (ADV) برای اندازه‌گیری تغییرات بستر در طول زمان و با فواصل

آزمایشگاهی و تداخل حفره آبشستگی با دیواره کانال، عرض مجموع شمع‌های مورد آزمایش در جهت عمود بر جریان، کمتر از ۱۲٪ عرض کانال آزمایشگاهی نگه داشته شد.

در این تحقیق برای رسیدن به بیشترین عمق آبشستگی و نیز جلوگیری از تشکیل فرم بستر، رسوبات غیرچسبنده با قطر متوسط $d_{50}=0.8$ میلی‌متر به کار برده شد. همچنین به منظور به حداقل رساندن اثر لایه محافظتی ذرات درشت

شرایط جریان و کمیت‌های اندازه‌گیری شده در کانال آزمایشگاهی با استفاده از جریان آب شهری و با دبی بسیار کم و به طور کاملاً آرام، جریان آب برقرار می‌شد. با توجه به اینکه حداکثر مقدار عمق آبشستگی در حالت آب زلال^۱ اتفاق می‌افتد، آزمایش‌های این تحقیق، در شرایط آب زلال و در سرعت $V/V_c = 0.95$ که V متوسط سرعت جریان و V_c سرعت بحرانی جریان برای انتقال رسوبات است، انجام شد. سرعت برشی بحرانی (U_c^*) و سرعت بحرانی (V_c) برای حرکت رسوبات بر اساس روش پیشنهادی توسط ملویل و کولمن (۲۰۰۰) محاسبه شد. مبنای این محاسبات در حالتی که رسوبات یکنواخت فرض شوند، استفاده از فرمول‌هایی به صورت زیر است:

$$u_{*c} = 0.0115 + 0.0125d_{50}^{1.4} \quad (3)$$

$$\frac{V_c}{u_{*c}} = 5.75 \log \left[5.53 \frac{y}{d_{50}} \right] \quad (4)$$

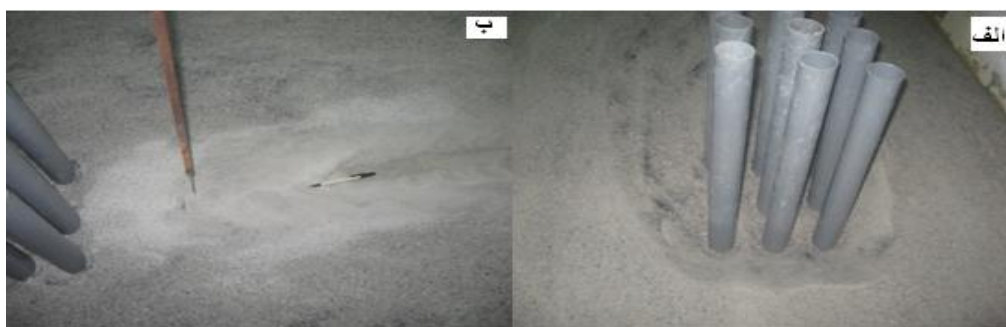
با توجه به دبی جریان (۱۳۸ لیتر بر ثانیه) و عرض معادل گروه پایه‌ها، در تمام آزمایش‌ها عمق آب در ۰/۲۴ متر ثابت نگه داشته شد. این عمق، شرایط آب کم عمق^۲ را فراهم می‌کند (عطایی آشتیانی و بهشتی، ۲۰۰۶؛ ملویل و کولمن، ۲۰۰۰ و شپارد و گلاسر، ۲۰۰۴). برای به حداقل رساندن اثر عمق جریان بر میزان آبشستگی، شرط $\frac{y}{nD} < 0.7$ (عطایی آشتیانی و بهشتی، ۲۰۰۶؛ ملویل و کولمن، ۲۰۰۰) رعایت شد. سرعت جریان در فواصل ۵

3- Area Velocity Module

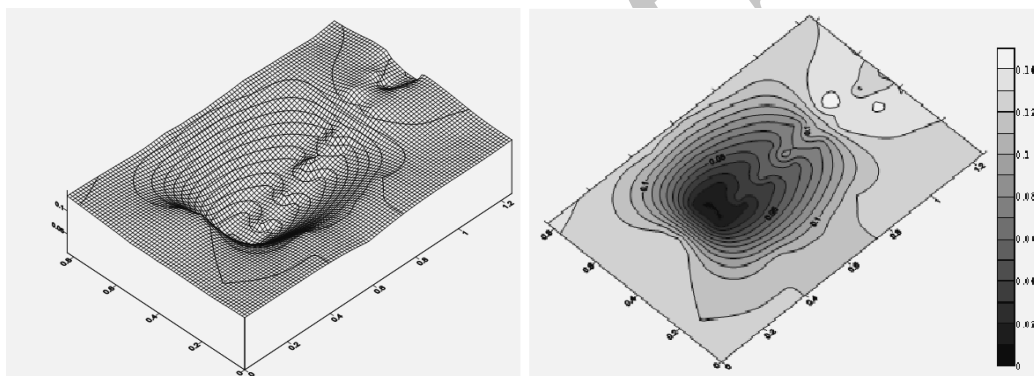
1- Clear-water condition
2- shallow water

کاهش می‌یابد. این نتیجه با آنچه که توسط عطایی آشتیانی و بهشتی (۲۰۰۶) و نظری‌ها (۱۹۹۶) مشاهده شده، همخوانی دارد. جزییات بیشتر تغییرات عمق آبشستگی برحسب تغییر فاصله توسط امینی و همکاران (۲۰۱۰) ارائه شده است. نمایش ارتفاعی و سه‌بعدی حفره آبشستگی ایجاد شده در اطراف گروه شمع‌ها با آرایش 2×2 در شکل ۴ نشان داده شده است.

بستگی دارد. در مقادیر کمتر از $S/D = 1/25$ گروه پایه‌ها به شکل یک پایه عمل کرده و عمق آبشستگی در گروه پایه‌ها بیشتر از مقدار آن برای پایه‌های منفرد است. بیشترین عمق آبشستگی در بالادست گروه پایه‌ها و در اطراف ردیف اول اتفاق می‌افتد. این عمق برای پایه‌های واقع در یک ردیف با هم برابر است. مقدار آبشستگی در پایه‌های عقبی (ردیف‌های دوم، سوم و ...) به ترتیب



شکل ۳- حفره آبشستگی ایجاد شده در اطراف گروه شمع‌ها: الف: بالادست گروه شمع‌ها (نگاه از بالا) ب: پایین دست گروه شمع‌ها (نگاه از کنار)



شکل ۴- حفره آبشستگی در اطراف گروه شمع‌های با آرایش 2×2

دو حفره مجزا تشکیل می‌شوند و عمق‌های آبشستگی هر دو پایه با هم برابر هستند.

گروه شمع‌های دوتایی در جهت جریان (آرایش 1×2) همان طور که در شکل ۵- ب نشان داده شده است، در این حالت بیشترین عمق آبشستگی در بالادست پایه جلویی اتفاق می‌افتد. در تمام آزمایش‌ها با فواصل $S/D < 5$ ، عمق آبشستگی در پایه عقب تا حد ۲۰٪ از پایه جلو کمتر بود. هانا (۱۹۷۸) این مقدار را ۳۰٪ اعلام کرده است. عامل حفاظتی پایه جلویی، باعث کاهش سرعت جریان نزدیک شونده به پایه پایین دست می‌شود و عمق آبشستگی را در آن کاهش می‌دهد. در این آرایش، با افزایش فاصله، اختلاف عمق آبشستگی دو پایه کمتر می‌شود. نتایج داده‌ها نشان داد که بیشینه عمق اندازه گرفته شده در این

برای ارزیابی اثر آرایش گروه شمع‌ها، علاوه بر داده‌های ثبت شده در آزمایش‌های مربوط به مدل‌هایی با فواصل متغیر، نتایج آزمایش‌های انجام شده در گروه پایه‌ها با فاصله ثابت ($S/D = 2$) نیز استفاده شد، که در زیر آمده است.

گروه شمع‌های دوتایی عمود بر جهت جریان (آرایش 2×1) در گروه دوتایی شمع‌ها با آرایش 2×1 ، عمق آبشستگی در اطراف هر دو شمع با هم برابر است (شکل ۵- الف). در حالتی که فاصله شمع‌ها از هم کم باشد ($S/D < 2/5$)، به علت اثر تداخل بازوهای گرداب‌های نعل اسبی، هر دو حفره آبشستگی به هم متصل می‌شوند. بیشینه عمق آبشستگی اندازه گرفته شده در این آرایش، از مقدار آن برای تک پایه بیشتر بود. اما در فواصل بیشتر ($S/D > 2/5$)،

ریچاردسون و دوپس (۲۰۰۱) برابر ۶ ردیف به دست آمده است. شکل ۶ گروه شمع‌ها با ۱۰ ردیف و ۲ ستون و حفره آب‌شستگی حاصله را نشان می‌دهد.

افزایش تعداد شمع‌ها در جهت عمود بر جریان باعث افزایش عرض مدل در جهت عمود بر جریان و در نتیجه منجر به افزایش عمق آب‌شستگی می‌شود.

با افزایش فاصله ستون‌ها (S_n در شکل ۱) عمق آب‌شستگی کم می‌شود. جدا از تأثیر افزایش ردیف‌ها و ستون‌ها بر آب‌شستگی در آرایش‌هایی با تعداد بیشتری ردیف و ستون، الگوی جریان تحت تأثیر پایه‌های کناری و عقبی (یا جلویی) قرار می‌گیرد. برای به دست آوردن نحوه تغییر عمق آب‌شستگی بر حسب فاصله بین پایه‌ها و نحوه آرایش گروه پایه‌ها، آنالیز رگرسیون بر مبنای میزان همبستگی داده‌ها انجام شد. بهترین خط برازش از نوع توانی تشخیص داده شد ($y = ax^b$) و نتایج آن برای آرایش‌های مختلف محاسبه شد. در این رابطه، y نمایانگر عمق آب‌شستگی و x برای بیان S/D به کار رفته است. ضرایب ثابت معادله فوق (a و b) و نیز ضریب همبستگی متغیرها (R) در جدول ۲ آورده شده است.

آرایش در حد مقدار آن برای تک پایه است.

گروه شمع‌ها با آرایش ۲×۲

در این آرایش نیز در فواصل بیشتر از $3/5D$ ، حداکثر عمق آب‌شستگی در لبه بالادست پایه‌های جلویی اتفاق می‌افتد. این عمق در پایه‌های عقبی کمتر شده و برای هر دو پایه در یک ردیف، یکسان است. در فواصل کمتر از $3/5D$ ، بیشترین عمق آب‌شستگی در فاصله بین دو پایه جلویی اندازه‌گیری شد. این روند به علت اثر متقابل پایه‌ها و تداخل گردابه‌های نعل اسبی و اثر محافظتی پایه‌ها در فواصل کم است.

افزایش تعداد شمع‌ها در جهت جریان

در حالتی که آزمایش با یک ستون شمع انجام می‌شود، در شرایطی که فاصله شمع‌ها در جهت جریان یکسان باشد، علیرغم افزودن تعداد شمع‌ها در جهت جریان (افزایش m)، مکانیسم آب‌شستگی مشابه آرایش ۱×۲ است. بیشینه عمق آب‌شستگی در پایه جلویی اتفاق می‌افتد و برای ردیف‌های بعدی، مقدار آن پیوسته کاهش می‌یابد. نتایج به دست آمده از آزمایش‌هایی با فواصل ثابت شمع‌ها، نشان می‌دهند که مقدار بیشترین عمق آب‌شستگی که در ردیف شمع‌های جلویی اتفاق می‌افتد، با افزایش تعداد پایه‌ها تا ۵ ردیف ($m=5$) افزایش می‌یابد. افزودن ردیف‌های بیشتر، اثری بر عمق بیشینه آب‌شستگی ندارد. این مقدار توسط



شکل ۵- گروه پایه‌های دو تایی الف: عمود بر جهت جریان (نگاه از بالا) ب: موازی با جریان (نگاه از بالا)



شکل ۶- گروه شمع‌ها با آرایش ۲×۱۰ الف: قبل از آزمایش ب: بعد از آزمایش

جدول ۲- آرایش گروه شمع‌های به کار رفته و ضرایب به دست آمده در این تحقیق

آرایش پایه‌ها $m \times n$	قطر پایه (متر)	تعداد آزمایش‌ها	a	b	R
۲×۲	۰/۰۶	۹	۰/۹۸۸	-۰/۳۲	۰/۹۵
۲×۴	۰/۰۴۲	۷	۰/۹۰۷	-۰/۴۴	۰/۹۷
۳×۵	۰/۰۶	۱۰	۱/۰۱۳	-۰/۳۹	۰/۹۸
۳×۵	۰/۰۴۲	۶	۰/۹۰۷	-۰/۴۴	۰/۹۷
۳×۴	۰/۰۶	۹	۰/۹۷۲	۰/۴۰	۰/۹۸

تحقیق نشان می‌دهد که با افزایش تعداد ردیف شمع‌ها تا $m=5$ ردیف در جهت جریان، عمق آبشستگی افزایش می‌یابد. بیشتر از این تعداد ردیف‌ها، تغییرات عمق آبشستگی ناچیز است. افزایش تعداد ستون‌ها (n) در آرایش یک گروه شمع، باعث افزایش عرض مدل در جهت عمود بر جریان و در نتیجه منجر به افزایش عمق آبشستگی می‌شود. آنالیز تغییرات سه بعدی حفره آبشستگی نیز نشان می‌دهد که محل وقوع بیشترین عمق آبشستگی در محدوده ردیف اول و اکثراً در جلوی پایه‌های ابتدایی اتفاق می‌افتد. مقدار آبشستگی در پایه‌های عقبی به ترتیب کاهش می‌یابد.

منابع

1. Amini A. Melville B. W. Thamer M. and Ghazali H. 2010. Clearwater local scour around pile groups. J. of Hydraul. Eng., ASCE (Accepted)
2. Ataie Ashtiani B. and Beheshti A. A. 2006. Experimental investigation of clear-water local scour at pile groups. J. of Hydraul. Eng. 132(10):1100-1104.
3. Hannah C. R. 1978. Scour at pile groups. Research Report, No. 28-3. Civil Engineering Department University of Canterbury Christchurch New Zealand.
4. Melville B. W. and Chiew Y. M. 1999. Time scale for local scour at bridge piers. J. of Hydraul. Eng. 125(1):59-65.
5. Melville B. W. and Coleman S. 2000. Bridge Scour. Water Resources Publications, LLC, Colorado. 572 pp.
6. Melville B. W. and Sutherland A. 1988. Design method for local scour at bridge piers. J. of Hydraul. Eng. 114(10):1210-1226.
7. Nazariha M. 1996. Design Relationshippe for Maximum Local Scour Depth for Bridge pier Groups. Ph.D Thesis. University of Ottawa, Ottawa, Canada. 325 pp.

این روابط و داده‌هایی که با ثابت نگه داشتن فواصل شمع‌ها در $S/D=2$ به دست آمد، با استفاده از ابزار Solver در نرم‌افزار اکسل تحلیل شد و بهترین رابطه که بیانگر اثر آرایش گروه پایه‌هاست (ضریب K_{mn}) به صورت زیر حاصل شد:

$$K_{mn} = 1.31m^{0.05}n^{-0.523(n^{-0.72}/m^{-0.24})} \quad (8)$$

رابطه به دست آمده ضمن ساده بودن، می‌تواند با تخمین مناسب اثر تعداد ردیف‌ها و ستون‌های موجود در آرایش‌های مختلف را برآورد کند. این رابطه بیانگر وابستگی ضریب آرایش شمع‌ها و به تبع آن عمق آبشستگی، به طور مستقیم با m و به طور معکوس با n است. ظاهر شدن هر دو متغیر m و n در این رابطه، بیانگر قابلیت آن در برآورد اثر متقابل این متغیرها در عمق آبشستگی است.

تعداد محدودی داده آزمایشگاهی در گروه شمع‌ها تاکنون استخراج شده است. بیشتر این داده‌ها نیز اثر آرایش پایه‌ها را به همراه اثر فاصله شمع‌ها بررسی کرده‌اند. بنابراین تحقیقات بیشتری برای استخراج داده‌های مناسب در گروه شمع‌ها به خصوص برای آرایش‌های نامنظم و گروه شمع‌های غیر موازی با جهت جریان لازم است.

نتیجه‌گیری

در گروه شمع‌ها، فاصله بین ستون‌ها (S_n) بیشترین تأثیر را بر عمق آبشستگی دارد. در این تحقیق مکانیسم آبشستگی در آرایش‌های متفاوت از گروه شمع‌ها تشریح شد. نتایج نشان می‌دهد که این مکانیسم در گروه شمع‌ها وابسته به آرایش آن‌ها است. تغییر در آرایش گروه شمع‌ها به طور مستقیم در بیشترین مقدار عمق آبشستگی مؤثر است. در پایان هر آزمایش، توده‌ای از رسوبات در پایین‌دست حفره آبشستگی شکل می‌گیرد که به صورت متقارن در مرکز کانال آزمایشگاهی قرار می‌گیرد. نتایج این

12. Sheppard D. M. and Renna R. 2005. Bridge scour manual. florida department of transportation. 605 Suwannee Street. Tallahassee. Florida. 129 pp
13. Sumer B. Roulund A. Fredsoe J. and Michelsen. J. 2005. 3D numerical modeling of flow and scour around a pile. First International Conference on Scour of Foundations. TexasUS. 795-809.
14. -Zdravkovich M. M. 1987. The effects of interference between circular cylinders in cross flow. J. of Fluid. and Struct. 1:239-261.
15. Zhao G. and Sheppard D. M. 1998. The effect of flow skew angle on sediment scour near pile groups. Complication of Conf. Scour Papers (1991-1998). ASCE. Reston. Va.:377-391.
8. Richardson E. V. and Davis S. R. 2001. Evaluating Scour at Bridges. Hydraulic Engineering Circular No. 18 (HEC-18). Rep. No. FHWA NHI 01-001. Federal Highway Administration Washington D. C.
9. Raudkivi A. J. and Ettema R. 1983. Clear-water scour at cylindrical piers. J. of Hydraul. Eng., 109(3):338-350.
10. Salim M. and Jones J. S. 1996. Scour around exposed pile foundations. North American Water and Environment Congress 96. Anaheim. proceedings of the American Society of Civil Engineers. CAUS: 335-346
11. Sheppard D. M. and Glasser. T. 2004. Sediment scour at piers with complex geometries. Proc. 2004 2nd Int. Conf. on Scour and Erosion. World Scientific. Singapore.

Archive of SID