

## اثر شکل سرشمع در ابعاد حفره آبشستگی در پایه پل‌ها با هندسه مرکب

واله خالدی<sup>۱</sup>، عطا امینی<sup>۲\*</sup> و جمیل بهرامی<sup>۳</sup>

### چکیده

از تأثیرگذارترین دلایل شکست پل آبشستگی موضعی است. در این پژوهش با استفاده از مدل فیزیکی، میزان تأثیرگذاری شکل سرشمع بر ابعاد حفره آبشستگی بررسی شد. داده‌های آزمایشگاهی از سه مدل کوچک مقیاس شده از پایه‌های مرکب که دارای سرشمع‌هایی با شکل‌های متفاوت هستند، استخراج شدند. آزمایش‌ها در شرایط آب زلال و با رسوبات یکنواخت و دبی یکسان انجام شدند. عمق آب در آزمایش‌ها ثابت و به گونه‌ای انتخاب شد که شرایط آب کم‌عمق را فراهم کند. تغییرات طول، عرض و عمق حفره آبشستگی در اثر تغییر ارتفاع سرشمع اندازه‌گیری و رسم شد. نتایج نشان داد که ابعاد حفره تا حدودی با طول (L<sub>pc</sub>) عرض (b<sub>pc</sub>) و ضخامت سرشمع (T) متناسب است. همچنین علاوه بر عمق حفره، طول و عرض حفره نیز با ارتفاع سرشمع نسبت به بستر اولیه، به صورت قابل ملاحظه‌ای وابسته است. در این مدل‌ها، بیشترین ابعاد طول و عرض حفره به ترتیب معادل ۱۱L<sub>pc</sub> و ۸/۵b<sub>pc</sub> و عمق حفره برابر ۹T مشاهده شد. ضمن این که طول حفره دارای تغییرات بیشتری به نسبت عرض حفره بود. این نتایج در راستای رسیدن به الگویی برای پیش‌بینی ابعاد حفره آبشستگی در پایه مرکب پل‌ها می‌تواند مورد استفاده مهندسان و پژوهشگران قرار گیرد.

**واژه‌های کلیدی:** آب زلال، آبشستگی موضعی، ابعاد حفره، پایه مرکب پل.

ارجاع: خالدی و.، امینی ع. و بهرامی ج. ۱۳۹۹. اثر شکل سرشمع در ابعاد حفره آبشستگی در پایه پل‌ها با هندسه مرکب. مجله پژوهش آب ایران. ۳۷: ۱۰۹-۱۰۱.

۱- کارشناسی ارشد گروه عمران، دانشکده فنی، دانشگاه کردستان، سنندج.

۲- دانشیار، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی کردستان، سنندج.

۳- استادیار گروه عمران، دانشکده فنی، دانشگاه کردستان، سنندج.

\* نویسنده مسئول: [a.amini@areco.ac.ir](mailto:a.amini@areco.ac.ir)

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۰۴/۲۳

تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۰۲/۱۵

## مقدمه

ایجاد آشفنگی در رژیم جریان، باعث فرسایش و آبستگى رسوبات بستر رودخانه می‌شود. گسترش عمق حفرة آبستگى در اطراف پایه‌های پیچیده و تکیه‌گاه‌های دلیل اصلی فروریختن پل‌هاست (محمدپور و همکاران، ۲۰۱۹). مسأله مهم در طراحی سازه‌های هیدرولیکی پیدا کردن راهکاری برای پیش‌بینی شیوه شکل‌گیری، گسترش و شکل نهایی حفرة آبستگى<sup>۱</sup> است (سلیمانی و همکاران، ۲۰۱۷). اندازه‌گیری ابعاد حفرة آبستگى اطراف سازه از دو جنبه اهمیت دارد: اول این‌که از یک طرف بیان‌کننده میزان ظرفیت تخریب در اطراف سازه است؛ از طرف دیگر در طراحی ابعاد فونداسیون این‌چنین سازه‌های هیدرولیکی در معرض جریان مورد استفاده است. به این صورت که لازم است طراح از میزان و شیوه آبستگى در این نوع سازه‌ها آگاه شود (امینی و همکاران، ۲۰۱۴). ضمن این‌که تاکنون نقش هندسه سرشمع در شیوه توسعه ابعاد حفرة آبستگى بررسی نشده است. به‌طور کلی آبستگى موضعی نتیجه مجموعه‌ای از رخدادهاست. با برخورد جریان آب به پایه، در اثر گردابان فشار، جریان‌های پایین‌رونده ایجاد می‌شود که پس از برخورد به بستر باعث حفر بستر در جلو پایه می‌شود و گرداب‌های نعل اسبی را ایجاد می‌کند. جدایی جریان از پایه نیز گرداب‌های برخاستگی را ایجاد می‌کند. باوجود تأثیر قابل توجه گرداب نعل اسبی روی آبستگى موضعی اطراف پایه پل، این گرداب دلیل آغاز پدیده آبستگى نیست (امینی و همکاران، ۲۰۱۲). روابط و روش‌های ارائه شده برای تخمین حداکثر عمق آبستگى اطراف پایه‌های پیچیده، به‌دلیل پیچیدگی مکانیسم آبستگى، اغلب نتایج قابل قبولی حتی در مقیاس آزمایشگاهی ارائه نمی‌کنند (امینی و همکاران، ۲۰۱۴). روابط متعددی برای تعیین عمق آبستگى در اطراف پایه‌های پیچیده<sup>۲</sup> ارائه شده است (امینی و همکاران، ۲۰۱۰ و ملویل و کلن، ۲۰۰۰). از بین این روش‌ها، رابطه HEC-18، (ریچاردسون و دیویس، ۲۰۰۱) و FDOT، (شپارد و رن، ۲۰۰۵) روابط متداول‌تری هستند. این دو روش عمق آبستگى را بر اساس اصل برهم‌نهی<sup>۳</sup> به دست می‌دهند. مورنو و همکاران

(۲۰۱۵) میزان کارایی سه روش کلن HEC-18، بررسی کردند. طبق نتایج ارائه شده، روش HEC-18 عمق حفرة را کمتر از مقدار واقعی تخمین می‌زند، روش FDOT تخمین محافظه‌کارانه ارائه می‌دهد؛ اما پیش‌بینی انجام شده به‌وسیله روش کلن (کلن، ۲۰۰۵) نتایج قابل قبول‌تری اطراف پایه مرکب پل ارائه می‌دهد. امینی و محمد (۲۰۱۷)، بر اساس مطالعات صحرایی، نتایج قابل قبولی برای پیش‌بینی عمق آبستگى در پایه‌های مرکب ارائه کردند (جنی و همکاران، ۲۰۱۶). علی‌رغم اهمیت پیش‌بینی عمق آبستگى، برآورد طول و عرض حفرة آبستگى نیز مورد توجه پژوهشگران قرار گرفته است. گوادیو و همکاران (۲۰۱۲) با استفاده از دستگاه لیزری اسکن سه بعدی فرآیند تشکیل حفرة آبستگى و نحوه توسعه ابعاد آن را اطراف یک‌پایه ساده بررسی کردند. نتایج آن‌ها نشان داد تغییرات ابعاد حفرة با توجه به نوع پایه متفاوت است. به‌گونه‌ای که در پایه‌های بزرگ‌تر و طوق‌دار، ابعاد بزرگ‌تری نسبت به حالت ساده‌تر پایه‌ها، به‌وجود آمد. داس و همکاران (۲۰۱۴) همین موضوع را در پایه‌های غیر ساده و با عرض‌های متفاوت ارزیابی کردند. آنان به این نتیجه رسیدند که مشخصات هندسی و اندازه عرض حفرة در تناسب با عرض معادل شمعه‌هاست. سلیمانی و همکاران (۲۰۱۷)، ابعاد حفرة آبستگى در گروه پایه‌ها را بررسی و بر مبنای مدل فیزیکی روابطی را برای مساحت و حجم حفرة‌ها ارائه کردند. دیاب و همکاران (۲۰۱۰) تغییرات ابعاد حفرة آبستگى در پایه‌های ساده را بررسی و روابطی را برای محاسبه مساحت و حجم آن‌ها ارائه کردند. آنان دریافتند که مساحت و حجم حفرة تشکیل شده به عمق آبستگى وابسته است. رضایی و همکاران (۱۳۹۷) به بررسی آزمایشگاهی تأثیر افزودن رس و ترکیب آن با نانو رس به مصالح ساختمانی پایین‌دست سازه مستهک‌کننده انرژی (صفحات مشبک)، در کاهش عمق و طول آبستگى پرداختند بر اساس نتایج، ترکیب رس و نانورس تأثیر مثبتی در بهبود و کاهش عمق و طول حفرة آبستگى به ویژه در زمان‌های اولیه برداشت در پایین‌دست صفحات مشبک داشته است. نتایج شبیه‌سازی مدل‌هایی با هندسه مرکب را ارائه و تغییرات ابعاد حفرة آبستگى را در پنج مدل بررسی کردند. آنان دریافتند که طول و عرض حفرة‌های

1- Scour hole  
2- Complex pier  
3- Superposition

پل ( $y_s$ ) عبارت است از: عمق جریان ( $y$ )، سرعت جریان ( $V$ )، قطر پایه ( $D$ )، میانگین قطر ذرات ( $d_{50}$ ) که با معادله (۱) بیان می‌شوند (باغبادرانی و همکاران، ۲۰۱۸). در این معادله متغیرهایی که بیشترین تأثیرپذیری را از هم دارند، به صورت بدون بعد دسته‌بندی شده‌اند.

$$\frac{y_s}{b_c} \text{ or } \frac{b_e}{b_c} = f\left(\frac{U}{U_c} \text{ or } Fr, \frac{h}{b_c}, \frac{b_c}{d_{50}}, \frac{b_c}{b_{pg}}, \frac{T}{b_{pg}}, \frac{Y}{b_c}, \frac{L_u}{b_c}, \frac{L_f}{b_c}, K_{sc}, K_{spc}, \frac{b_{pg}}{b_c}, m, n, \frac{S_b}{b_{pg}}, \frac{S_l}{b_{pg}}\right) \quad (1)$$

در این معادله،  $b_{pg}$  عرض شمع،  $b_e$  عرض معادل برای پایه منفرد که آبشستگی یکسان با پایه مرکب تولید می‌کند،  $U_c$  سرعت بحرانی،  $U^*$  سرعت برشی رسوبات بستر،  $U^*_{c}$  سرعت برشی بحرانی رسوبات بستر که این سرعت با استفاده از روش ارائه شده در ملویل و کلمن (۲۰۰۰) محاسبه شد،  $Fr$  عدد فرود جریان،  $m$  تعداد پایه‌ها در راستای جریان،  $n$  تعداد پایه‌ها در راستای عمود بر جریان،  $S_b$  فاصله مرکز به مرکز پایه‌ها در راستای جریان،  $S_l$  فاصله مرکز به مرکز پایه‌ها در راستای عمود بر جریان،  $K_s$  ضریب شکل برای پایه تکی یا گروه پایه‌ها و  $W$  عرض معادل گروه شمع‌هاست. (عطایی آشتیانی و همکاران، ۲۰۰۶).

پارامترهای مربوط به گروه شمع‌ها با  $b_{pg}$  و  $l_{pg}$  که عرض و طول معادل گروه شمع‌هاست، نشان داده شده است. تأثیر رسوب، جریان و سایر عوامل اثرگذار در آبشستگی به کمک گروه‌های بی‌بعد بررسی می‌شوند. به این ترتیب که شدت جریان با  $V/V_c$ ، اندازه رسوبات بستر با  $b_e/d_{50}$ ، عمق جریان به صورت  $y/b_e$  است. این پارامترها را در روابط رایج مربوط به پایه ساده می‌توان جای‌گذاری و ابعاد حفرة آبشستگی را به دست آورد. پارامترهای مرتبط با آبشستگی در پایه‌های مرکب به صورت شماتیک در شکل ۱ نمایش داده و همچنین کانال آزمایشگاهی مورد استفاده در شکل ۱ آورده شده است.

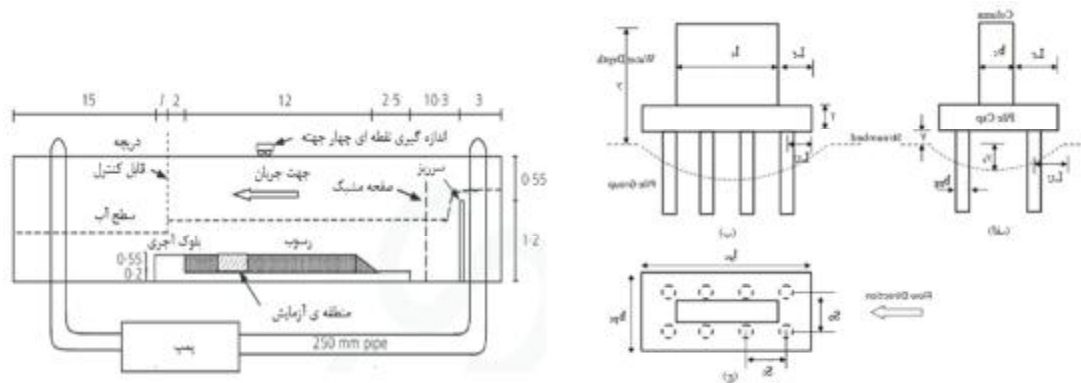
آبشستگی به نسبت عمق حفرة، دارای تغییرات یکنواخت‌تر و کمتری هستند. ضمن این‌که برای طول حفرة در مدل‌های مختلف، روند تغییرات بیشتر مشاهده کردند. مورنو و همکاران (۲۰۱۶) طبق بررسی که روی پایه‌های مرکب داشتند، به این نتیجه رسیدند که مراحل تغییر عمق حفرة در طی فرآیند آبشستگی، به تعداد المان‌های سازه‌ای پایه مرکب پل که در معرض جریان و داخل حفرة آبشستگی قرار دارد، وابسته است. با وجود این‌که پژوهش‌های بسیاری در مورد آبشستگی موضعی اطراف پایه‌های پل انجام شده، کمتر به بررسی ابعاد حفرة آبشستگی در پایه‌های مرکب پرداخته شده است. ضمن این‌که تاکنون نقش هندسه سرشمع در شیوه توسعه ابعاد حفرة آبشستگی بررسی نشده است. در این تحقیق شیوه تغییرات ابعاد حفرة آبشستگی در اطراف پایه پیچیده پل‌ها در اثر تغییر شکل هندسه سرشمع بررسی شد. همچنین نقش ارتفاع سرشمع نسبت به بستر اولیه در نحوه شکل‌گیری حفرة آبشستگی در مدل‌های مختلف آنالیز شد. داده‌های منتشر شده در این پژوهش گامی نخست برای بررسی‌های دقیق‌تر روند تغییرات ابعاد حفرة در پایه‌های پیچیده به دست می‌دهد.

## مواد و روش‌ها

### آنالیز ابعادی

با توجه به این‌که تعداد پارامترهای مؤثر بر آبشستگی موضعی پایه پل متنوع است، منظور کردن تأثیر همه پارامترها در برآورد آبشستگی غیرممکن به نظر می‌رسد. بنابراین در بررسی شیوه شکل‌گیری آبشستگی با استفاده از روش آنالیز ابعادی، از متغیرهای بی‌بعد شده استفاده می‌شود.

در این پژوهش، بررسی تغییرات ابعاد حفرة مدنظر است. متغیرهای تأثیرگذار بر ابعاد حفرة آبشستگی را می‌توان در سه دسته ویژگی‌ها جریان، ویژگی‌ها رسوب و هندسه پایه گروه‌بندی کرد. پارامترهای مؤثر بر عمق آبشستگی پایه



شکل ۱- شماتیک پایه پیچیده پلها و فلوم آزمایشگاهی استفاده شده در این پژوهش (الف) نمای بالادست، (ب) نمای عرضی، (ج) نمای بالا، د- کانال آزمایشگاهی مورد استفاده در این تحقیق

یا در دست ساخت در کشور مالزی با مقیاس مناسب ساخته شدند. در انتخاب مدلها سعی شد شکل و ابعاد سرشمع متنوع باشد. به گونه‌ای که سه شکل مربعی، مستطیلی و مخروطی به ترتیب در مدل‌های ۱، ۲ و ۳ انتخاب شدند. در شکل ۲ نمای پلان و نمای عرضی مدل‌های انتخاب شده در این پژوهش به صورت شماتیک نمایش داده شده است. جزئیات مشخصات هندسی مدلها در جدول ۱ ارائه شده است. در مجموع تعداد ۲۵ آزمایش بر روی این سه مدل انجام شد.

### رسوب و جریان

برای شبیه‌سازی بستر رودخانه و پایه‌ها، از یک لایه رسوب غیرچسبنده با ضخامت ۰/۵۵ متر استفاده شد. برای رسیدن به بیشترین عمق آبستگي و نیز جلوگیری از تغییر فرم بستر، رسوبات غیرچسبنده با قطر متوسط ۰/۸ میلی‌متر و با انحراف معیار هندسی ۱/۳۳ میلی‌متر استفاده شد. این مقدار کمتر از مقدار بحرانی آن برای تشکیل لایه محافظتی<sup>۲</sup> و رسوب غیریکنواخت است. (ملویل و کلمن، ۲۰۰۰ و محمدپور و همکاران، ۲۰۱۹). برای حذف اثر اندازه رسوبات بر میزان آبستگي نسبت  $nD/d_{50}$  کمتر از ۵۰ در نظر گرفته شد (امینی و همکاران، ۲۰۱۷). قبل از شروع آزمایشها، جریان آب در کانال آزمایشگاهی با دبی بسیار کم و به‌طور کاملاً آرام برقرار می‌شد. با توجه به این‌که حداکثر مقدار عمق آبستگي در حالت آب زلال اتفاق می‌افتد، آزمایش‌های این پژوهش در وضعیت آب زلال و در سرعت  $V/Vc = ۰/۹۵$  انجام شد. بر اساس

### روش آزمایش

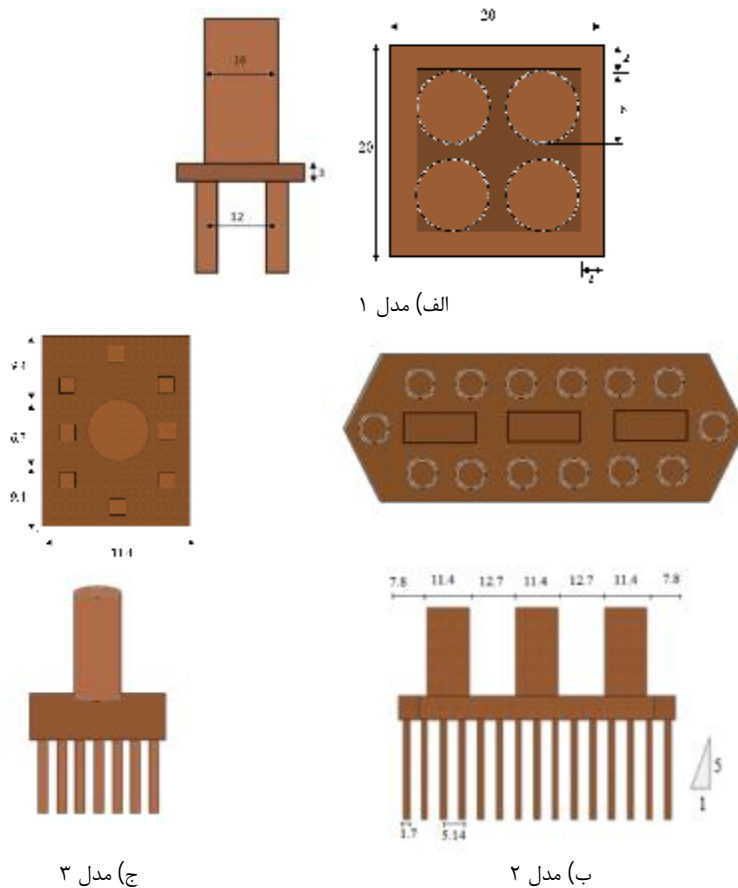
آزمایشها در یک فلوم با دیواره‌ی آجری و شیشه‌ای به طول ۴۶ متر عرض ۱/۵۲ متر و عمق ۱/۹ متر در مؤسسه ملی تحقیقات هیدرولیک مالزی (NAHRIM)<sup>۱</sup> در کوالالامپور انجام شد. طول ۱۵ متر از کانال به وسیله رسوبات یکنواخت با ضخامت ۰/۵۵ متر، در فاصله ۱۰/۳ متر پایین‌تر از ورودی کانال آزمایشگاهی پر شد. سرعت جریان و عمق آب به وسیله دریچه‌ای خودکار در انتهای کانال آزمایشگاهی، تنظیم شد. دبی در آزمایشها به میزان ۱۳۲ لیتر بر ثانیه منظور شد. 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 شد. 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 شبکه‌ای از موانع مانند فیلترهای شنی، سرریز لبه‌تیز و صفحات مشبک، اغتشاش و آشفتگی جریان ورودی حذف شد. به گونه‌ای که در محل آزمایشها اندازه‌گیری سرعت جریان در مقاطع عرضی و عمودی، توزیع سرعت را تقریباً یکنواخت نشان می‌داد.

### مدل‌ها

برای انجام آزمایشها، در این پژوهش تعداد سه مدل مختلف با شکل سرشمع متفاوت از چوب و PVC ساخته شد. این مدلها از نمونه‌های واقعی پل‌های ساخته شده و

(امینی و همکاران، ۲۰۱۷) آورده شده است. سرعت برشی بحرانی  $U_c^*$  و سرعت بحرانی  $V_c$  برای حرکت ذرات رسوب، بر اساس روش پیشنهادی توسط ملویل و کلمن (۲۰۰۰) محاسبه شد.

پیشنهاد ملویل و چپو (۱۹۹۹) در مورد زمان لازم برای رسیدن عمق آبستنگی به عمق نهایی، آزمایش‌ها در زمان‌های ۸ و ۲۴ ساعت انجام شده است. جزئیات بیشتر از روش تحقیق در مراجع (امینی و همکاران، ۲۰۱۴) و



شکل ۲- شکل مدل‌های استفاده شده در این پژوهش (الف) مدل ۱، (ب) مدل ۲، (ج) مدل ۳

جدول ۱- مشخصات هندسی مدل‌ها

متغیر	مدل یک	مدل دو	مدل سه
bc	۰/۱۶	۰/۳۴۳	۰/۰۶۷
lc	۰/۱۶	۰/۳۴۳	۰/۰۶۷
bpc	۰/۲۰	۰/۱۳۷	۰/۱۷۷
lpc	۰/۲۰	۰/۷۵۴	۰/۲۵۵
T	۰/۰۳	۰/۰۵۱	۰/۱۱۱
m	۲	۱۵	۳۰۴۰۳
n	۲	۳	۳
Spb	۰/۱۲	۰/۰۵۱۴	۰/۰۵۷
Spl	۰/۱۲	۰/۰۵۱۴	۰/۰۶۷
مقیاس	۱:۱۰	۱:۳۵	۱:۹
شکل ستون	مربع	مستطیل	دایره
شکل شمع	دایره	دایره	مربع
شکل سرشمع	مربع	ذوزنقه	مربع

### ابعاد حفره

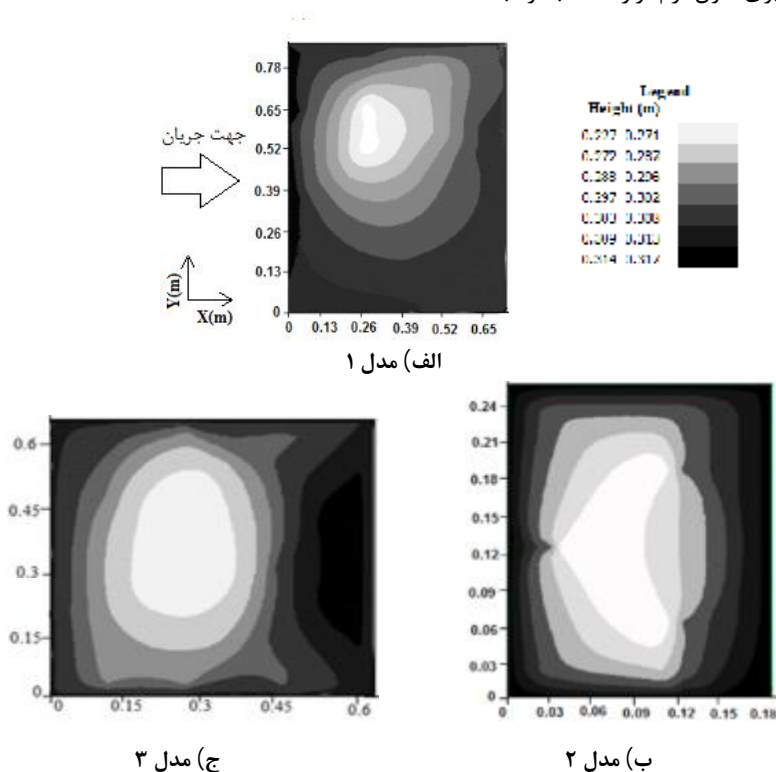
ابعاد حفره آبشستگی (عمق، طول و عرض) با استفاده از ارتفاع سنج مدرج با دقت ۰/۱ میلی‌متر اندازه‌گیری شد. ابعاد حفره نسبت به تراز اولیه بستر و موقعیت سرشمع در سه جهت  $X$ ،  $Y$  و  $Z$  اندازه‌گیری شد. آنالیز داده‌ها با استفاده از نرم‌افزار Civil3D انجام شد. این نرم‌افزار در سال ۱۹۹۳ میلادی معرفی شد، که در محیط اتوکد کار می‌کند. با توجه به توانایی این نرم‌افزار در تبدیل داده‌ها به خطوط ارتفاعی و رسم سه بعدی عوارض زمین دارای کاربرد وسیعی در کارهای مهندسی است. این نرم‌افزار قادر است داده‌ها با مختصات  $XYZ$  را به خطوط، سطح، تصویر و منحنی‌های ارتفاعی تبدیل کند.

### نتایج و بحث

#### هندسه حفره آبشستگی

در این پژوهش، هدف بررسی تأثیر شکل سرشمع بر تغییرات ابعاد حفره آبشستگی است، از سه مدل با سرشمع به شکل‌های متفاوت استفاده شد. پس از وارد کردن مختصات مربوط به حفره‌های آبشستگی به وجود آمده به نرم‌افزار Civil3D، طول و عرض حفره‌های آبشستگی به وسیله ابزار اندازه‌گیری طول نرم‌افزار محاسبه و ثبت شد.

بیشترین عمق حفره از اختلاف کمترین تراز حفره با تراز بستر اولیه محاسبه شد. در جدول ۲ ابعاد حفره‌های به‌وجود آمده اطراف مدل‌های مختلف آورده و نمونه‌ای از شکل حفره آبشستگی ترسیم شده در این پژوهش، در شکل ۳ ارائه شده است. برای مشاهده اثر متغیر شکل سرشمع در شکل‌گیری ابعاد حفره آبشستگی، در شکل ۳ حفره آبشستگی در هر سه مدل و در ارتفاع تقریباً یکسان سرشمع از بستر اولیه آورده شده است ( $0.3 < Y < 0.34$ ). شکل ۳ نشان می‌دهد که شکل حفره آبشستگی به‌طور قابل ملاحظه‌ای تحت تأثیر شکل سرشمع است. این نتایج با یافته‌های مورنو و همکاران (۲۰۱۶) که نقش شکل اجزای پایه مرکب را در عمق حفره آبشستگی بررسی کردند، همخوانی دارد. در شکل ۳-الف با سرشمع مربعی، شکل کلی حفره آبشستگی به‌خصوص در نقاط گودتر به مربع نزدیک‌تر است و می‌توان گفت تا حدودی کشیدگی طولی و عرضی حفره مشابه هم هستند. در سرشمع با شکل مخروطی، شکل حفره در بازه ارتفاعی ۰/۲۷۱-۰/۲۲۷ شکل کشیده‌تر دارد (شکل ۳-ب). در تغییرات شکل حفره همین روند مشاهده می‌شود.



شکل ۳- شماتیک حفره آبشستگی در مدل‌های: الف) مدل ۱، ب) مدل ۲ و ج) مدل ۳

جدول ۲- طول و عرض حفره آبشستگی در مدل‌های مورد بررسی

مدل	شماره آزمایش	شکل هندسی سرشمع	ارتفاع سرشمع Y (m)	عمق حفره Ys (m)	عرض حفره Ws (m)	طول حفره Ls (m)		
۱	۱	مربعی	۰/۰۵۶	۰/۲۷۱	۰/۵۳۰	۰/۳۵۰		
	۲		۰/۰۲۱	۰/۲۴۰	۰/۷۴۰	۰/۴۷۵		
	۳		۰/۰۶۰	۰/۲۳۴	۰/۷۲۱	۰/۴۶۳		
	۴		-۰/۰۲۰	۰/۲۱۸	۰/۷۵۰	۰/۶۷۰		
	۵		-۰/۰۸۴	۰/۱۸۲	۰/۷۹۰	۰/۳۱۰		
	۶		۰/۱۰۰	۰/۰۴۹	۰/۲۶۶	۰/۲۶۸		
	۲	۷	مخروطی	۰/۱۱۱	۰/۰۳۲	۰/۱۷۳	۰/۱۷۵	
		۸		۰/۰۰۸	۰/۰۵۵	۰/۳۱۰	۰/۲۱۰	
		۹		-۰/۰۲۰	۰/۰۶۶	۰/۳۵۰	۰/۵۶۰	
		۱۰		-۰/۰۴۴	۰/۰۷۷	۰/۴۱۰	۰/۳۶۰	
		۱۱		-۰/۰۸۱	۰/۰۷۸	۰/۴۳۰	۰/۳۸۰	
		۱۲		-۰/۱۱۴	۰/۰۶۶	۰/۳۵۸	۰/۳۶۱	
		۱۳		-۰/۱۶۴	۰/۰۷۷	۰/۴۱۸	۰/۴۲۱	
۱۴		-۰/۱۵۹		۰/۰۶۶	۰/۳۵۸	۰/۳۶۱		
۱۵		-۰/۱۷۹		۰/۰۶۰	۰/۳۲۶	۰/۳۲۸		
۱۶		۰/۲۸۱		۰/۱۴۰	۰/۸۲۵	۰/۸۱۰		
۱۷		۰/۲۵۱		۰/۱۳۸	۰/۸۱۳	۰/۷۹۹		
۳		۱۸		مستطیلی	-۰/۲۲۹	۰/۱۰۰	۰/۶۰۰	۰/۷۰۰
		۱۹			۰/۰۶۶	۰/۰۷۴	۰/۴۳۶	۰/۴۲۸
	۲۰	۰/۰۴۴	۰/۰۴۸		۰/۴۳۰	۰/۴۰۰		
	۲۱	۰/۰۱۰	۰/۰۴۱		۰/۲۴۱	۰/۲۳۷		
	۲۲	-۰/۰۳۳	۰/۱۰۰		۰/۶۴۰	۰/۴۱۰		
	۲۳	-۰/۰۸۲	۰/۱۳۷		۰/۶۰۰	۰/۷۲۰		
	۲۴	-۰/۱۱۰	۰/۱۷۶		۱/۰۳۷	۱/۰۱۹		
	۲۵	-۰/۱۶۳	۰/۱۷۰		۱/۰۰۲	۰/۹۸۴		

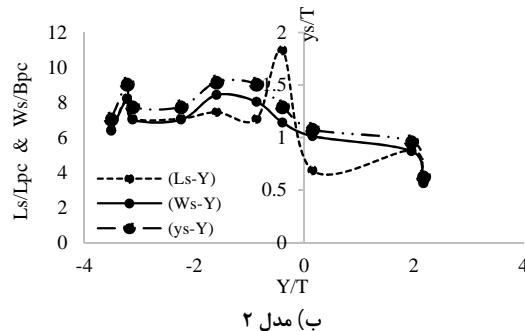
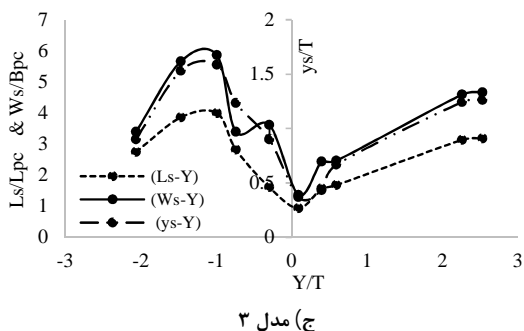
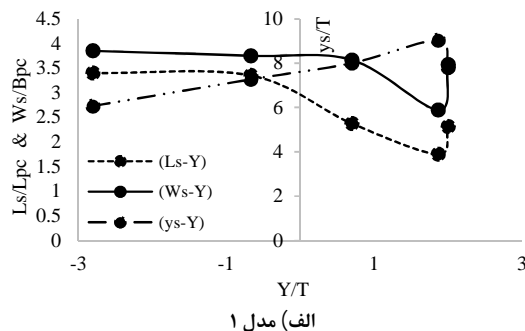
## تغییرات ابعاد حفره در مدل‌های مورد بررسی

در شکل ۴، ارتفاع سرشمع (Y) در برابر تغییرات ابعاد (طول، عرض و عمق) حفره نشان داده شده است. هر یک از پارامترها در این نمودارها برای بررسی دقیق‌تر بی‌بعد شده‌اند. عمق حفره و ارتفاع سرشمع به وسیله ضخامت سرشمع (Y) و طول و عرض حفره نیز به ترتیب به وسیله طول (Lpc) و عرض سرشمع (Bpc) بی‌بعد شد. متفاوت بودن روند تغییرات در سه مدل بررسی شده، نشان‌دهنده تأثیرگذار بودن شکل هندسی سرشمع در روند شکل‌گیری حفره آبشستگی موضعی است. با توجه به شکل‌ها می‌توان تغییرات ابعاد را با توجه به مشخصات هیدرولیکی و وضعیت انتقال رسوب در سه بخش توصیف کرد. بخش اول، در ابتدای آزمایش که هنوز سرشمع مدفون در بستر است، تغییرات ابعاد به خصوص در ارتفاع سرشمع،  $T < Y < 2T$  بسیار ملایم و ناچیز است. این نتیجه

با نتایج امینی و محمد (۲۰۱۷) درباره تغییرات عمق حفره در این ناحیه همخوانی دارد. در این حالت حجم فرسایش کمتر است و قدرت تخریب و آبشستگی به نسبت زیاد نیست. حالت دوم مرحله گذار از ارتفاع مثبت سرشمع به ارتفاع منفی (بالای بستر) است. در این بخش به دلیل معلق شدن سرشمع جریان آشفتنی بیشتری را تجربه می‌کند. گردابه‌های جریان در زیر سرشمع با برخورد با رسوبات و کف سرشمع، رسوبات بیشتری را با خود جابجا می‌کنند. احتمال رخ دادن بیشینه ابعاد آبشستگی در این حالت انتظار می‌رود. با توسعه آبشستگی، جریان مسیر خود را از زیر سرشمع پیدا کرده و گردابه‌های جریان امکان انتقال به پایین دست پایه را پیدا خواهند کرد. از این زمان به بعد ابعاد حفره آبشستگی کاهش می‌یابد؛ با این حال، در شکل اول مربعی بودن شکل سرشمع باعث شده است نقش تخریب‌کننده جریان آشفته ملایم‌تر باشد.

مستطیلی، ابعاد حفرة در بازه‌ی ارتفاعی بیان شده با شیب قابل توجهی افزایش می‌یابد. در حالتی که سرشمع بیرون از بستر است و جریان آب از میان گروه شمعه‌ها عبور می‌کند، در ارتفاع  $-2T < Y < -T$  در مدل‌های ۱ و ۲ تغییرات ابعاد یکنواخت است. در حالی که در سرشمع مستطیلی بیشینه‌های ابعاد در این بخش اتفاق افتاده است.

به گونه‌ای که شیب تغییرات به‌خصوص در بازه  $-0.5T < Y < 0.5T$  افزایش یافته در انتهای بازه نقاط اوجی را برای طول و عرض نشان می‌دهد. نتایج مشابهی توسط مورنو و همکاران (۲۰۱۵) گزارش شده است. در بازه ارتفاعی اشاره شده، بیشینه ابعاد در مدل دوم به خصوص برای طول حفرة مشاهده شد. در سرشمع با شکل



شکل ۴- مقایسه تغییرات طول و عرض حفرة آبستگى در اثر تغییر ارتفاع سرشمع: الف) مدل ۱، ب) مدل ۲ و ج) مدل ۳

- مشابه عمق، روند تغییرات طول و عرض حفرة آبستگى به ارتفاع سرشمع نسبت به بستر اولیه وابسته است.
- بیشترین ابعاد طول و عرض حفرة به ترتیب معادل  $1.1L_{pc}$  و  $1.5b_{pc}$  و عمق حفرة برابر  $0.9T$  مشاهده شد.

#### منابع

۱. رضایی م.، قادری ا و دانشفراز ر. ۱۳۹۷. بررسی آزمایشگاهی تأثیر رس و نانو رس مونت وریلونیتی بر کاهش آبستگى در پایین دست صفحات مشبک. مجله تحقیقات مهندسی سازه‌های آبیاری و زهکشی. ۱۹(۷۳): ۱-۱۶.
2. Amini A. and Mohamad T. A. 2017. Local scour prediction around piers with complex geometry. Marine Georesources and Geotechnology. 35(6): 857-864.
3. Amini A. Melville B. W. and Ali T. M.

#### نتیجه‌گیری

در این پژوهش شبیه‌سازی فیزیکی تغییرات ابعاد حفرة آبستگى در پایه مرکب پلها، در آزمایشگاه انجام و متغیرهای مؤثر شناسایی و اثر آنها بررسی شد. تعداد سه عدد مدل با سرشمع به شکل‌های متفاوت و در ارتفاع‌های مختلف از بستر اولیه آزمایش شد. نتایج حاصل از این پژوهش را می‌توان به‌صورت زیر خلاصه کرد:

- از بین اجزای پایه مرکب (سرشمع، ستون و گروه پایه) شکل هندسی سرشمع نقش مهمی در شیوه شکل‌گیری حفرة آبستگى دارد.
- بیشترین طول و عرض حفرة آبستگى در ارتفاع منفی (سرشمع بالای بستر) رخ می‌دهد. طول و عرض بیشینه در مدل با سرشمع مخروطی در زمان معلق شدن سرشمع و در سرشمع مستطیلی و مربعی، پس از معلق شدن سرشمع اتفاق می‌افتد.



- Engineering, 142(2). DOI: 10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.0001080.
17. Moreno M. Maia R. and Couto L. 2016. Prediction of equilibrium local scour depth at complex bridge piers. *Journal of Hydraulic Engineering*, 142(11). DOI: 10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.0001153.
  1. Richardson E. V. and Davis S. R. 2001. *Evaluating Scour at Bridges*. Hydraulic Engineering Circular No. 18 (HEC 18). 4rd Ed., Rep. No. FHWA NHI 01-001.
  2. Sheppard D. M. and Renna R. 2005. *Bridge scour manual*. Florida department of transportation, 605 Suwannee Street, Tallahassee, Florida. 129 p.
  3. Solaimani N. Amini A. Banejad H. and Ghazvinei P. T. 2017. The effect of pile spacing and arrangement on bed formation and scour hole dimensions in pile groups, *Int. J. River Basin Manag.* 15(2): 219-225.
  2012. Clear-water local scour around pile groups in shallow-water flow. *Journal of Hydraulic Engineering*, 138: 177-185
  4. Amini A. Melville W. B. and Mohamad T. A. 2014. Local Scour at Piled Bridge Piers Including an Examination of the Superposition Method. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 41(5): 461-471.
  5. Amini A. Mohamad T. A. Ghazali H. Huat B. and Aziz A. 2010. A local scour prediction method for pile cap in complex piers. *ICE. Agricultural Water Management*, 164: 73-80.
  6. Ataie-Ashtiani B. and Beheshti A. A. 2006. Experimental investigation of clear-water local scour at pile groups. *Journal of Hydraulic Engineering*, 132(10): 1100-1104.
  7. Amini-Baghdadorani D. Ataie-Ashtiani B. Beheshti A. Hadzaman M. and Jamali M. 2018. Prediction of current-induced local scour around complex piers: Review, revisit, and integration. *Coastal Engineering*, 133: 43-58.
  8. Coleman S. E. 2005. Clearwater local scour at complex piers. *Journal of Hydraulic Engineering*, 131(4): 330-334.
  9. Das S. Das R. and Mazumdar A. 2014. Variation in clear water scour geometry at piers of different effective widths. *Turkish Journal of Engineering and Environmental Sciences*, 38: 97-111.
  10. Diab R. Link O. and Zanke U. 2010. Geometry of developing and equilibrium scour holes at bridge piers in gravel. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 37(4): 544-552.
  11. Gaudio R. Tafarajnoruz A. and Calomino F. 2012. Combined flow altering countermeasures against bridge pier scour. *IAHR*, 50(1): 35-43.
  12. Jannaty M. H. Eghbalzadeh A. and Hosseini S. A. 2016. Using field data to evaluate the complex bridge piers scour methods. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 43(3): 218-225.
  13. Melville B. W. and Coleman S. E. 2000. *Bridge scour*, Water Resources Publications, Highlands ranch, Colorado, USA. 550 p.
  14. Melville B. W. and Chiew Y. M. 1999. Time scale for local scour at bridge piers. *Journal of Hydraulic Engineering*, 125(1): 59-65.
  15. Mohammadpour R. Aminuddin A. B. A. Sabzevari T. and Murshed M. F. 2019. Local scour around complex abutments. *ISH*. doi: 10.1080/09715010.2019.1607783
  16. Moreno M. Maia R. and Couto L. 2015. Effects of Relative Column Width and Pile-Cap Elevation on Local Scour Depth around Complex Piers. *Journal of Hydraulic Engineering*. *Journal of Hydraulic Engineering*.

