

## مطالعه آزمایشگاهی آبشستگی اطراف پایه مرکب پل

حبیبه قدسی<sup>۱</sup>، محمد جواد خانجانی<sup>۲</sup>

تاریخ ارسال: ۱۳۹۶/۰۶/۱۶

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۷/۰۲/۲۳

### چکیده

در این مطالعه، آبشستگی موضعی اطراف پایه مرکب پل بررسی شده است. پایه مرکب معمولاً از پایه، سرشمع و گروه شمع تشکیل می شود. این آزمایش ها تحت شرایط آب صاف انجام شدند. برای بررسی تاثیر هندسه پارامترها بر عمق آبشستگی، شش مدل آزمایشگاهی شامل ترکیبات مختلف هندسه پارامترها بکار گرفته شد. این پارامترها شامل ادامه بالادست سرشمع، تعداد شمع ها در راستای جریان، ادامه بالادست شمع های ردیف اول و ضخامت سرشمع می باشند. ارزیابی عمق آبشستگی اطراف پایه مرکب با روش های معمول موجود انجام شد. نتایج نشان می دهد بعضی از مدل های موجود با این نتایج تطبیق داشته و برآورد مناسبی ارائه نمودند، اما بعضی دیگر از مدل ها همراه با خطا هستند و مقادیر قابل قبولی ارائه نمی دهند. نتایج آزمایش ها نشان می دهد با افزایش ضخامت سرشمع، ارتفاع سرشمع که در آن بستر اطراف سرشمع شسته شده و گروه شمع در معرض جریان قرار می گیرند، کاهش می یابد. همچنین با افزایش تعداد شمع های در راستای، حداکثر عمق آبشستگی کاهش می یابد. همین طور افزایش ادامه بالادست گروه شمع ها موجب کاهش عمق آبشستگی می شود.

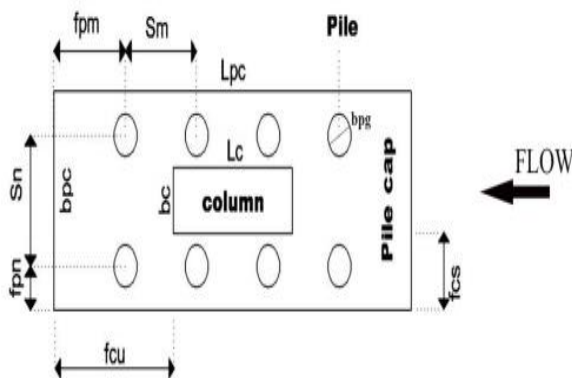
واژه های کلیدی: آبشستگی، پایه مرکب، سرشمع، ضخامت سرشمع، گروه شمع.

<sup>۱</sup> دانشجوی دکتری، بخش مهندسی عمران، دانشگاه شهید باهنر کرمان، کرمان، ایران. ۰۹۱۱۳۵۴۹۵۱۰ [habibeh.ghodsi@gmail.com](mailto:habibeh.ghodsi@gmail.com)

<sup>۲</sup> استاد، بخش مهندسی عمران، دانشگاه شهید باهنر کرمان، کرمان، ایران. ۰۹۱۳۱۴۱۳۰۲۸ [khanganani@yahoo.com](mailto:khanganani@yahoo.com) (مسئول مکاتبه)

مرکب را نتیجه خواهد داد. روش کلمن (Coleman 2005) بر مبنای معادلات ملویل و کلمن (Melville and Coleman 2000) ارائه شد.

در این مطالعه اثر پارامترهای هندسی شامل ادامه بالادست سرشمع، تعداد شمع ها در راستای جریان، ادامه بالادست شمع های ردیف اول و ضخامت سرشمع بر عمق آبستتگی پایه مرکب با مدل آزمایشگاهی بررسی گردید.



شکل ۱: مدل پایه مرکب

### مدل فیزیکی و مراحل آزمایش

کلیه آزمایش ها در کانال آزمایشگاه هیدرولیک دانشگاه شهید باهنر کرمان به طول ۲۱/۸۵ متر، عرض ۷۷ سانتیمتر و عمق ۶۰ سانتیمتر انجام شد. آزمایش ها تحت شرایط آب صاف و رسوب بستر یکنواخت انجام شدند. محل نصب پایه کانال به عمق ۳۰ سانتیمتر از ماسه با قطر متوسط ۰/۷۱ میلیمتر و انحراف معیار هندسی استاندارد ۱/۱۳۵ پر شد. جریان آب پس از عبور از سطح شیبدار ابتدای کانال، وارد کانال می شود. یک سرریز در فاصله ۵/۴ متری از مدل پایه، در انتهای کانال عمق و دبی جریان را تنظیم و ثابت می کند. عمق آب با توجه به شرایط آب صاف طوری تنظیم می شود که از استغراق پایه جلوگیری شود. در مجموع ۸۲ آزمایش با استفاده از شش مدل آزمایشگاهی شامل پایه، سرشمع و گروه شمع با مشخصات مختلف برای بررسی اثر ادامه بالادست سرشمع، تعداد شمع ها در راستای جریان، ادامه بالادست شمع های ردیف اول و

### مقدمه

وقتی پایه پل در برابر جریان قرار می گیرد، ممکن است توپوگرافی بستر رسوبی اطراف آن تغییر کند. با رسیدن تغییرات توپوگرافی به فونداسیون پایه پل، پایداری آن در معرض خطر قرار می گیرد. از این پدیده به عنوان آبستتگی یاد می شود. از این رو پیش بینی عمق آبستتگی اطراف سازه های در معرض جریان مورد توجه قرار گرفته است. پیش از این مسئله آبستتگی تنها برای پایه های با سطح مقطع یکنواخت بررسی گردید: ملویل و سوترلند (Melville and Sutherland 1988)، رادکیوی و اتما (Raudkivi and Ettema 1983) و هانا (Hannah 1978). اما از دهه ۹۰ میلادی تخمین عمق آبستتگی اطراف پایه های مرکب مورد توجه قرار گرفت: ریچاردسون و دیویس (Richardson and Davis 2001)، شیپارد و همکاران (Sheppard et al. 2004)، کلمن (Coleman 2005)، عطایی آشتیانی و همکاران (Ataie-Ashtiani et al. 2010)، فرارو و همکاران (Ferraro et al. 2013). پایه های مرکب معمولاً از پایه، سرشمع و گروه شمع تشکیل می شوند (شکل ۱). پارامترهای هندسی پایه مرکب به همراه علامت اختصاری در جدول ۱ آورده شده است. برای تخمین عمق آبستتگی اطراف پایه های مرکب روش های گوناگونی پیشنهاد گردیده است و مورد استفاده قرار می گیرد. روش طراحی HEC-18، توسط سازمان نظارت بر بزرگراه های آمریکا ارائه شده است (Richardson and Davis 2001). در این روش عمق آبستتگی پایه مرکب از جمع جبری مولفه های پایه مرکب (پایه، سرشمع و گروه شمع) بدست می آید. در روش ملویل و کلمن (Melville and Coleman 2000) پایه مرکب به صورت ستونهای واقع بر فونداسیون (بدون اثر گروه شمع) بررسی شدند. شیپارد و همکاران (Sheppard et al. 2004) روابطی برای محاسبه قطر معادل  $D^*$  پایه مرکب به صورت تک پایه مدور ارائه نمودند. در این روش فرض بر این است که عمق آبستتگی پایه مدور با قطر  $D^*$  در همان شرایط رسوب و جریان، برابر با عمق آبستتگی برای پایه

تبادل زمانی در نظر گرفته شده است که در آن افزایش عمق آبشستگی کمتر از ۵٪ قطر پایه در ۲۴ ساعت می باشد.

ضخامت سرشمع استفاده گردید (جدول ۱). آزمایش ها تا رسیدن به زمان تبادل ادامه می یابد. بر مبنای معیار ملویل و چپو (Melville and Chiew 1999) زمان

جدول ۱- خلاصه مشخصات ۶ مدل پایه مرکب

VI	V	IV	III	II	I	شماره مدل	پارامتر
۳	۳	۳	۳	۳	۳	$b_c$	عرض ستون (cm)
۲۷/۵	۲۷/۵	۲۰	۱۴	۸	متغیر	$L_c$	طول ستون (cm)
۱۰	۱۰	۱۰	۱۰	۱۰	۱۰	$b_{pc}$	عرض سرشمع (cm)
۳۰	۳۰	متغیر	۲۴	۱۸	۳۰	$L_{pc}$	طول سرشمع (cm)
۱/۲۵	۱/۲۵	متغیر	۵	۵	متغیر	$f_{cu}$	ادامه طولی بالادست سرشمع (cm)
۳/۵	۳/۵	۳/۵	۳/۵	۳/۵	۳/۵	$f_{cs}$	ادامه عرضی بالادست سرشمع (cm)
۶	۶	متغیر	۶	۶	۶	$f_{pm}$	ادامه طولی شمع های ردیف اول (cm)
متغیر	متغیر	۳	۳	۳	۳	T	ضخامت سرشمع (cm)
متغیر	-۸	-۸	-۸	-۸	متغیر	Y	ارتفاع سرشمع (cm)
۴	۴	۴	۳	۲	۴	m	تعداد شمع ها در راستای جریان
۲	۲	۲	۲	۲	۲	n	تعداد شمع ها در جهت عمود بر جریان
۲	۲	۲	۲	۲	۲	$b_{pg}$	عرض شمع (cm)
۶	۶	۶	۶	۶	۶	$S_m$	فاصله طولی شمع ها (cm)
۶	۶	۶	۶	۶	۶	$S_n$	فاصله عرضی شمع ها (cm)

شکل از داده های لو و همکاران (Lu et al. 2011) و فرارا و همکاران (Ferraro et al. 2013) هم استفاده شده است. همانطور که از شکل ۳ برمی آید با افزایش تعداد شمع های در راستای جریان، عمق آبشستگی افزایش می یابد.

عمق آبشستگی بر حسب ادامه بالادست شمع های ردیف اول در شکل ۴ رسم شده است. در این حالت با افزایش ادامه بالادست شمع های ردیف اول، عمق آبشستگی کاهش می یابد. در این حالت فرض بر این است که با افزایش گسترش بالادست شمع های ردیف اول، قدرت گردابه های نعل اسبی و ورتکس های رو به پایین در اطراف پایه مرکب کاهش یافته و از شدت آبشستگی کاسته می شود. در نتیجه عمق آبشستگی هم کاهش می یابد.

تغییرات عمق آبشستگی در برابر ضخامت سرشمع در شکل ۵ آورده شده است. در شکل ۵(a)، عمق آبشستگی در برابر ضخامت سرشمع، وقتی سرشمع از

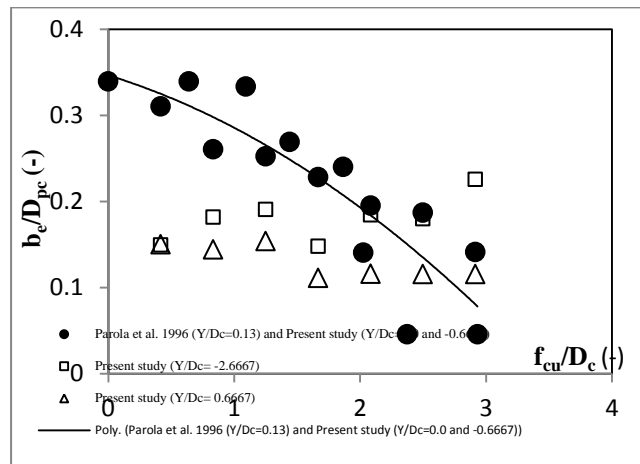
## مشاهدات و تحلیل نتایج

عمق آبشستگی بر حسب ادامه بالادست سرشمع در شکل ۲ ترسیم شده است. ارتفاع سرشمع برای حالت هایی که سرشمع زیر بستر اولیه مدفون است مثبت و برای حالت هایی که سرشمع از ابتدا در معرض جریان واقع شده، منفی در نظر گرفته شد. مشاهدات به خوبی تغییرات پیش بینی شده توسط پارولا و همکاران (Parola et al. 1996) را تایید می کند. مدل پارولا و همکاران (Parola et al. 1996) شامل پایه واقع بر روی فونداسیون بوده است. این شرایط برای مدل های  $Y/D_c=0$  و  $Y/D_c=-0.667$  این مطالعه نیز صادق می باشد. در این حالت ها، تنها پایه و سرشمع در معرض جریان قرار دارند و از اثر گروه شمع صرف نظر شده است. در نتیجه با افزایش ادامه بالادست سرشمع، عمق آبشستگی کاهش می یابد.

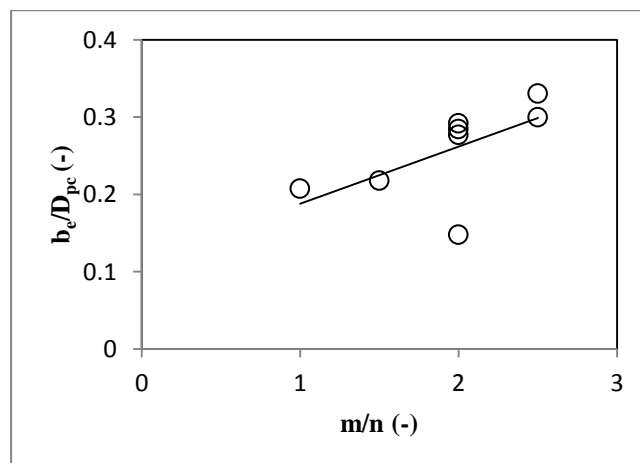
تغییرات عمق آبشستگی بر حسب تعداد شمع های در راستای جریان در شکل ۳ رسم شده است. در این

al. 1998) را تایید می کند. در این حالت ضخامت سرشمع از ۲ سانتیمتر تا ۸ سانتیمتر تغییر می کند.

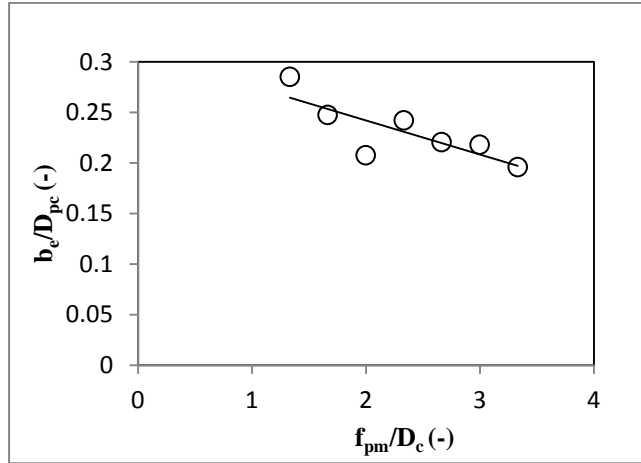
ابتدا در معرض جریان واقع شده ( $Y = -8 \text{ cm}$ ) رسم شده است. مشاهدات به خوبی تغییرات پیش بینی شده توسط مارتین- واید و همکاران (Martin- Vide et



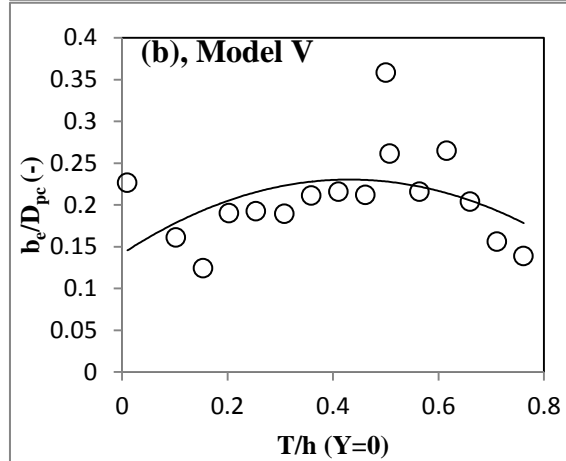
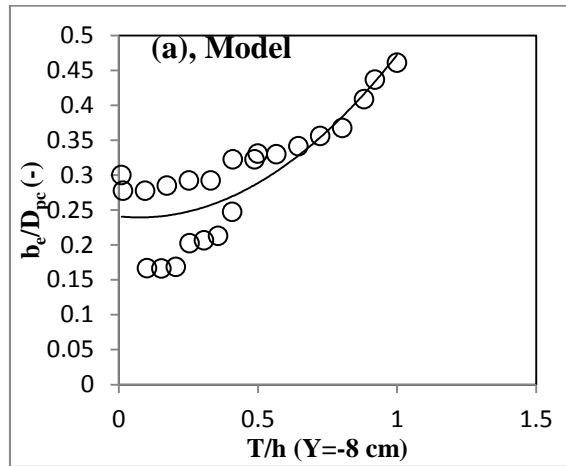
شکل ۲: عمق آبشستگی در برابر گسترش بالادست سرشمع

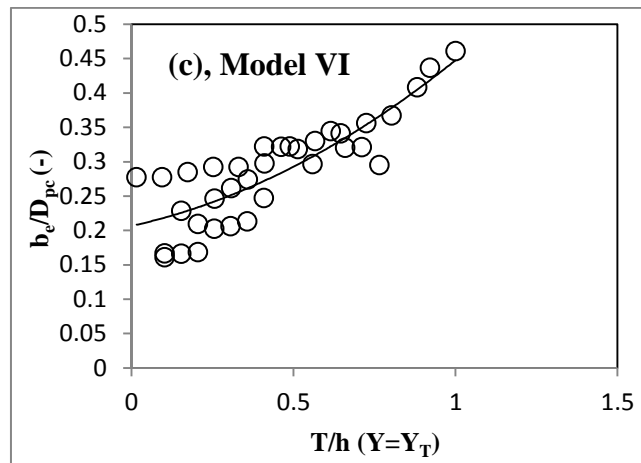


شکل ۳: عمق آبشستگی در برابر تعداد شمع های در راستای جریان



شکل ۴: عمق آبستگي در برابر گسترش بالادست شمع های ردیف اول





شکل ۵: عمق آبشستگی در برابر ضخامت سرشمع

بخشی از ضخامت سرشمع که در برابر جریان قرار می گیرد از شسته شدن بستر جلوگیری می کند. در این صورت، قدرت گردابه های نعل اسبی کاهش یافته و عمق آبشستگی هم کاهش می یابد. تغییرات  $Y_T$  در برابر ضخامت سرشمع در شکل ۶ رسم شده است.

### روش های تخمین عمق آبشستگی

در این بخش برای بررسی عملکرد روش های پیش بینی عمق آبشستگی از پارامترهای آماری ضریب تعیین ( $R^2$ )، ریشه میانگین مربعات خطا ( $RMSE$ ) و میانگین قدر مطلق مربعات خطا ( $MAPE$ ) استفاده شده است. مقادیر این پارامترها در جدول ۲ نشان داده شده است.

#### الف- روش HEC-18

آنچه از شکل ۷(a) بر می آید، برای سرشمع نیمه مدفون و مدفون مقادیر پیش بینی شده بسیار محافظه کارانه است. در این روش عمق آبشستگی از برهم نهی المان های در معرض جریان بدست می آیند. در حالیکه نتایج شکل ۷(b) بهتر می باشد،  $R^2=21\%$  و  $RMSE=9.659$  و  $MAPE=4.109$  برای شکل ۷(a) و  $R^2=11\%$  و  $RMSE=11.216$  و  $MAPE=4.906$  برای شکل ۷(b). نتایج داده های این تحقیق با داده های لو و همکاران (Lu et al. 2011) و فرارو و همکاران (Ferraro et al. 2013) مقایسه شده است.

با افزایش ضخامت سرشمع، عمق آبشستگی هم افزایش می یابد. در شکل ۵(b) عمق آبشستگی بر حسب ضخامت سرشمع برای سرشمع مدفون ( $Y=0.0$ ) آورده شده است. در این حالت ضخامت سرشمع از ۲ سانتیمتر تا ۱۵ سانتیمتر متغیر است. همانطور که شکل ۵(b) نشان می دهد، با افزایش ضخامت سرشمع از ۲ سانتیمتر تا ۸ سانتیمتر عمق آبشستگی هم افزایش می یابد. اما در ادامه با افزایش ضخامت سرشمع از ۹ سانتیمتر تا ۱۵ سانتیمتر، عمق آبشستگی کاهش می یابد. در این حالت فرض بر این است با افزایش ضخامت سرشمع، سرشمع مانند مانعی در برابر جریان است و به مسلح شدن بستر اطراف سرشمع کمک می کند و همین امر موجب کاهش عمق آبشستگی می شود.

در ادامه آزمایش هایی برای یافتن ارتفاع سرشمع که در آن بستر اطراف سرشمع شسته شده و گروه شمع در معرض جریان قرار می گیرند، انجام شد. در این حالت تغییرات عمق آبشستگی در برابر ضخامت سرشمع در شکل ۵(c) آورده شده است. کلمن (Coleman 2005) مقدار  $Y_T$  را برابر نصف ضخامت سرشمع پیشنهاد نمود. مشاهدات بیانگر این است، وقتی ضخامت سرشمع بین ۲ سانتیمتر تا ۱۰ سانتیمتر تغییر می کند مقدار  $Y_T$  کمتر از نصف ضخامت سرشمع است. اما در بازه ۱۱ سانتیمتر تا ۱۵ سانتیمتر مقدار  $Y_T$  بیشتر از نصف ضخامت سرشمع است. در این حالت فرض بر این است، با افزایش ضخامت سرشمع،

همانطور که مشاهده می شود، بیشتر پیش بینی ها در بازه خطای  $\pm 20\%$  قرار دارند.

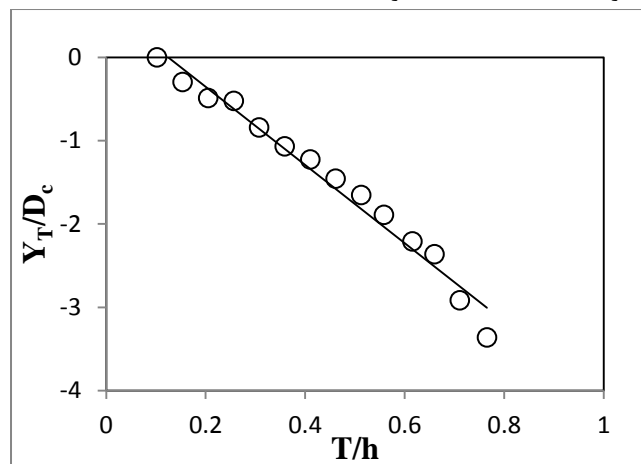
برای شکل ۸(c) برآورد بهتری حاصل شده است.

### ج- روش کلمن (Coleman 2005)

در این روش، قطر معادل پایه برای بازه های گسسته محاسبه می شود. سپس عمق آبستنگی برای هر قطر معادل بدست می آید. نتایج این روش در شکل های ۹(a) و ۹(b) ترسیم شده است. مقایسه پارامترهای آماری،  $R^2=45\%$  و  $RMSE=8.778$  و  $MAPE=1.3175$  برای شکل ۹(a) و  $R^2=60\%$  و  $RMSE=6.631$  و  $MAPE=0.911$  برای شکل ۹(b) بیانگر عملکرد بهتر روش Coleman نسبت به روش های HEC-18 و Sheppard می باشد.

### ب- روش شیپارد و همکاران (Sheppard et al. 2004)

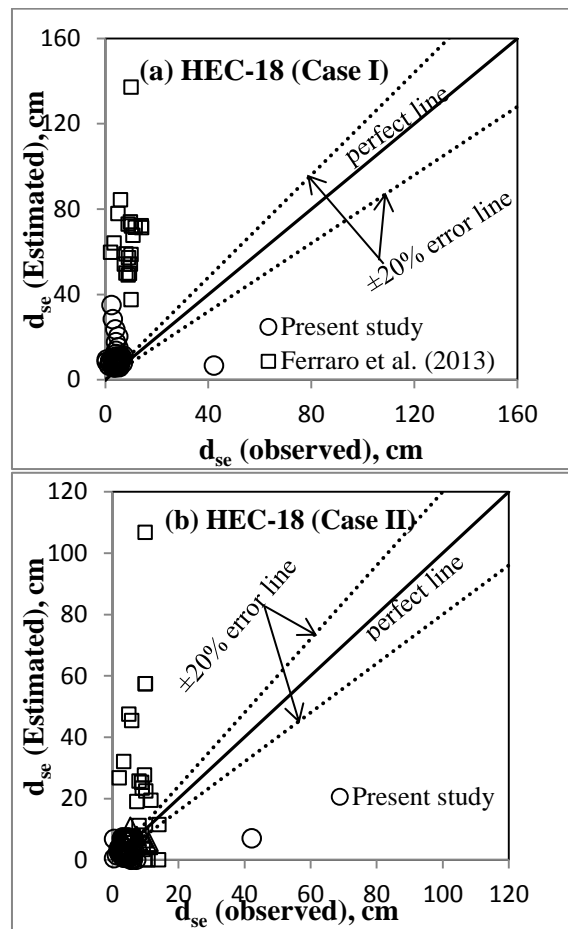
در این روش، محاسبه و دسته بندی حالت های پایه مرکب تقریباً مشابه روش HEC-18 می باشد. نتایج حاصل از روش شیپارد و همکاران در شکل های ۸(a)، ۸(b) و ۸(c) آورده شده است. برطبق نتایج ارائه شده،  $R^2=10\%$  و  $RMSE=18.778$  و  $MAPE=8.377$  برای شکل ۸(a) و  $R^2=15\%$  و  $RMSE=15.840$  و  $MAPE=6.089$  برای شکل ۸(b). برطبق نتایج ارائه شده، این روش برای case I و case II نتایج خوبی برآورد نمی کند. در حالیکه برای case III،  $R^2=18\%$  و  $RMSE=11.970$



شکل ۶: ارتفاع سرشمع قطع شده در برابر ضخامت سرشمع

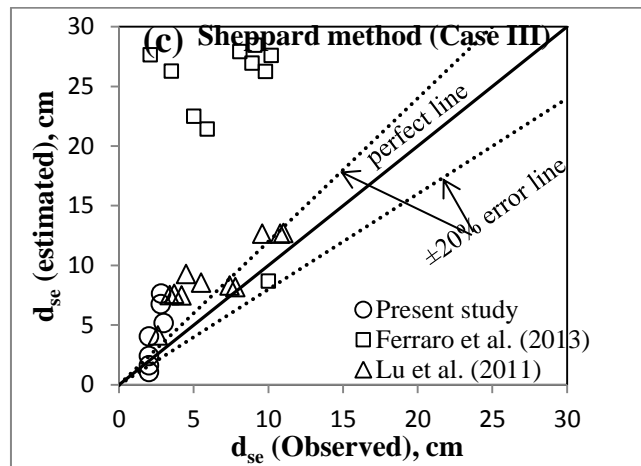
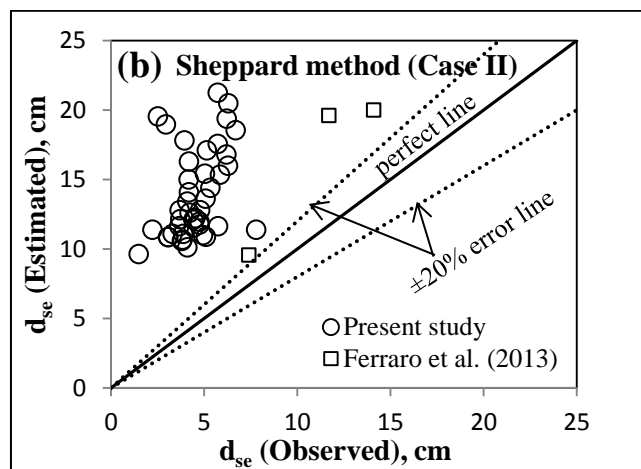
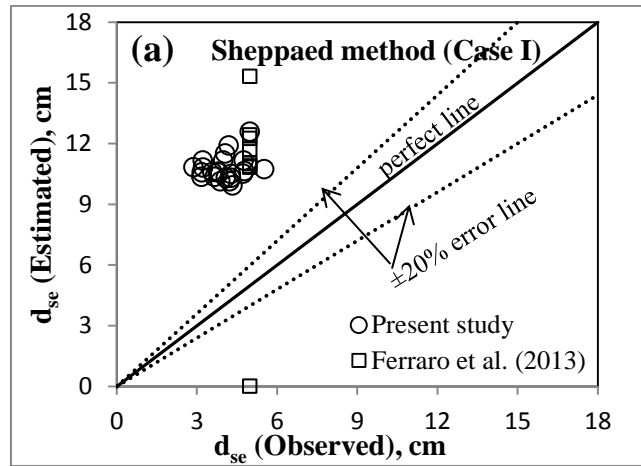
جدول ۲- مقادیر پارامترهای آماری برای مقایسه عملکرد روابط تجربی تخمین عمق آبستنگی

روش تجربی	$R^2$ (%) ضریب تعیین	RMSE (cm) ریشه میانگین مربعات خطا	MAPE (cm) قدر مطلق مربعات خطا
HEC-18 Case I	۱۱	11/216	۴/۹۰۶
HEC-18 Case II	۲۱	۹/۶۵۹	۴/۱۰۹
Sheppard Case I	۱۰	۱۸/۷۷۸	۸/۳۷۷
Sheppard Case II	۱۵	۱۵/۸۴۰	۶/۰۸۹
Sheppard Case III	۱۸	۱۱/۹۷۰	۵/۶۵۶
Coleman Case II	۴۵	۸/۷۷۸	۱/۳۶۴
Coleman Case III	۶۰	۶/۶۳۱	۰/۹۱۱
Ataie-Ashtiani et al.	۷۰	۵/۹۴۷	۳/۱۷۵

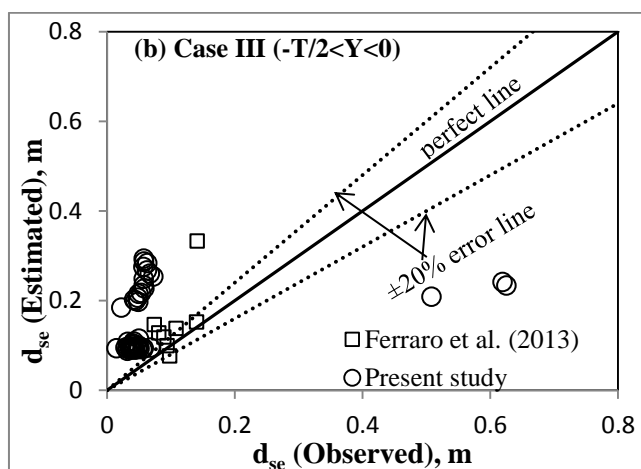
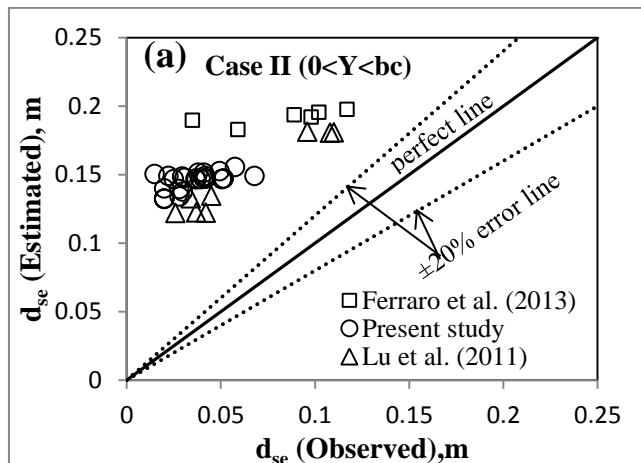


شکل ۷: تغییرات عمق آبشستگی مشاهده شده با روش HEC-18

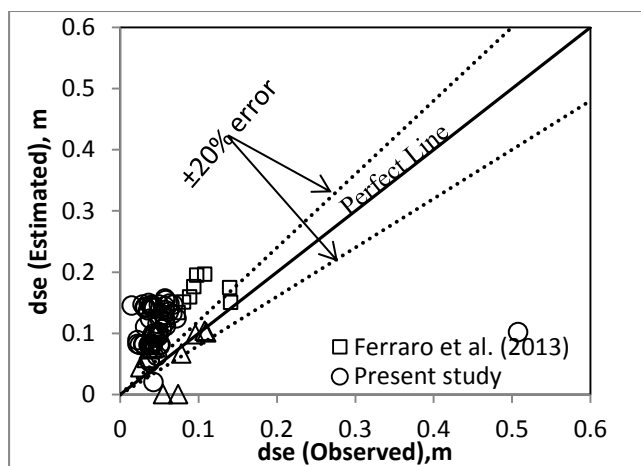




شکل ۸: تغییرات عمق آبستگي مشاهده شده با روش Sheppard et al.



شکل ۹: تغییرات عمق آبستگي مشاهده شده با روش Coleman



شکل ۱۰: عمق آبستگي تخمين زده شده روش Ataie-Ashtiani et al.

پارامترهای هندسی بر عمق آبشستگی پایه مرکب با مدل آزمایشگاهی بررسی گردید. این پارامترها شامل ادامه بالادست سرشمع، تعداد شمع های در راستای جریان، ادامه بالادست شمع های ردیف اول و ضخامت سرشمع بوده اند. نتایج حاکی از آن است که با افزایش ادامه بالادست سرشمع و شمع های ردیف اول عمق آبشستگی کاهش می یابد. در حالیکه با افزایش تعداد شمع های در راستای جریان و ضخامت سرشمع عمق آبشستگی افزایش می یابد. در همین حال روش های موجود برای تخمین عمق آبشستگی برای بازه های مختلف ترکیبات پایه، معادلات مختلفی ارائه کرده اند. نتایج حاصل از این روش ها برای حالت هایی که سرشمع نزدیک بستر است نتایج قابل قبولی ارائه نمی کنند.

#### د- روش عطایی آشتیانی و همکاران (Ataie-Ashtiani et al. 2010)

عطایی آشتیانی و همکاران در این روش به تصحیح رابطه ارائه شده توسط کلمن (Coleman 2005) بر پایه آزمایش های پیشین پرداختند. آنها با اضافه کردن ضرایب مشخص، تخمین بهتری از روش کلمن ارائه کردند. این نتایج در شکل ۱۰ آورده شده است ( $MAPE=3.175$  و  $RMSE=5.947$  و  $R^2=70\%$ ).

#### نتیجه گیری

وقتی پایه پل در برابر جریان قرار می گیرد، ممکن است توپوگرافی بستر رسوبی اطراف آن تغییر کند. با رسیدن تغییرات توپوگرافی به فونداسیون پایه پل، پایداری آن در معرض خطر قرار می گیرد. از این پدیده به عنوان آبشستگی یاد می شود. در این مطالعه اثر

#### منابع

- Ataie-Ashtiani, B., Baratian-Ghorghi, Z., and Beheshti, A. A. 2010. Experimental investigation of clear-water local scour of compound piers. *Journal of Hydraulic Engineering*, 136(6): 343-351.
- Coleman, S. E. 2005. Clearwater local scour at complex piers. *Journal of Hydraulic Engineering*, 131(4): 330-334.
- Ferraro, D., Tafarjnoruz, A., Gaudio, R., and Cardoso, A. H. 2013. Effects of pile cap thickness on maximum scour depth at a complex pier. *Journal of Hydraulic Engineering*, 139(5): 482-491.
- Hannah, C. R. 1978. Scour at pile groups. Res. Rep. No. 28-3, Dept. of Civil Engineering, Univ. of Canterbury, Christchurch, New Zealand.
- Lu, J. Y., Shi, Z. Z., Hong, J. H., Lee, J. J., and Raikar, R. V. 2011. Temporal variation of scour depth at nonuniform cylindrical piers. *Journal of Hydraulic Engineering*, 137(1), 45-56.
- Martin-Vide, J. P., Hidalgo, C., and Bateman, A. 2010. Local scour at piled bridge foundation. *Journal of Hydraulic Engineering*, 124(4): 439-444.
- Melville, B. W., and Chiew, Y. M. 1999. Time scale for local scour at bridge piers. *Journal of Hydraulic Engineering*, 125(1): 59-65.
- Melville, B. W., and Coleman, S. E. 2000. Bridge scour, Water Resources Publications, Littleton, Colo.
- Melville, B. W., and Raudkivi, A. J. 1996. Effects of foundation geometry on bridge pier scour. *Journal of Hydraulic Engineering*, 122(4): 203-209.
- Melville, B. W., and Sutherland, A. J. 1988. Design methods for local scour at bridge piers. *Journal of Hydraulic Engineering*, 114(10): 1210-1226.
- Parola, A. C., Mahdavi, S. K., Brown, B. M., and El Khoury, A. 2010. Effects of rectangular foundation geometry on local pier scour. *Journal of Hydraulic Engineering*, 122(1): 35-40.
- 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, Federal Highway Administration, Washington, D.C.

Sheppard, D. M., Odeh, M., and Glasser, T. 2004. Large scale clear-water local scour experiments. *Journal of Hydraulic Engineering*, 130(10): 957-963.

## Experimental Investigation of Local Scour around Complex Bridge Pier

Habibeh Ghodsi<sup>1</sup>, Mohammad Javad Khanjani<sup>2</sup>

### Abstract

In this study, local scour around complex pier experimentally investigated. Complex pier consisted of a column, a pile cap which is rested on array of piles. Experiments were conducted on clear-water condition. To see the geometric parameters (pile cap upstream extension, pile group arrangement, pile group upstream extension, and pile cap thickness) effect on scour depth, six physical models of complex pier were built and applied in this study. These experimental results were compared with theoretical equations. The results showed that some of the existing theoretical existing equations provide an appropriate estimation for scour depth. On the other hand, others did not provide acceptable values. The result showed that, by increasing pile cap thickness, the pile cap undercutting elevation was decreased. When the number of piles in line with flow increased the maximum scour depth was also decreased.

**Keywords:** Scour, Complex pier, Pile cap, Pile group, Pile cap thickness.

---

<sup>1</sup> Ph. D. student, Civil Engineering Department, Shahid Bahonar University of Kerman, Kerman, Iran. Habibeh.ghodsi@gmail.com

<sup>2</sup> Professor, Civil Engineering Department, Shahid Bahonar University of Kerman, Kerman, Iran. Khangani@yahoo.com