

بررسی آزمایشگاهی آبشستگی خاک حول پایه‌های مرکب پل

حبیبه قدسی^۱، محمدجواد خانجانی^{۲*} و علی اصغر بهشتی^۳

^۱ کارشناس ارشد عمران، گروه آموزشی مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه شهید باهنر، کرمان، ایران
^۲ استاد بخش مهندسی عمران، گروه آموزشی مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه شهید باهنر، کرمان، ایران
^۳ استادیار بخش مهندسی آب، گروه مهندسی آب، دانشکده مهندسی کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران
 mkhanjani@eng.uk.ac.ir

چکیده: یکی از دلایل اصلی فروپاشی پل‌ها، آبشستگی بستر پایه پل می‌باشد. پیچیدگی مکانیسم آبشستگی در اطراف پایه‌های پل باعث شده است که علی‌رغم پژوهش‌های گسترده‌ای که انجام شده، هنوز معادله مناسبی برای پیش‌بینی عمق آبشستگی در دست نباشد. این مکانیسم در پایه‌های مرکب پیچیده‌تر است. در این تحقیق از مدل فیزیکی برای مطالعه آبشستگی در اطراف پایه‌های مرکب در شرایط آب زلال استفاده شده است. کانال آزمایشگاهی استفاده شده به طول ۲۱/۸۵ متر، عرض ۰/۷۷ متر و عمق ۰/۱۶ متر بوده است. بستر کانال از رسوبات یکنواخت با اندازه متوسط ۰/۷۱ میلی‌متر پوشیده شد. پایه‌های مرکب معمولاً از پایه، سرشمع و گروه شمع تشکیل می‌شوند. برای بررسی تاثیر پارامترهای هندسی بر عمق آبشستگی، شش مدل آزمایشگاهی شامل ترکیبات مختلف پارامترهای هندسی بکار گرفته شد. این پارامترها شامل گسترش بالادست سرشمع، تعداد شمع‌ها در راستای جریان، گسترش بالادست شمع‌های ردیف اول و ضخامت سرشمع می‌باشند. در مجموع ۸۲ آزمایش انجام شد. ارزیابی عمق آبشستگی اطراف پایه‌های مرکب با روش‌های معمول مانند HEC-18، کلمن، شیپارد و همکاران و عطایی آشتیانی و همکاران انجام شد. روند تغییرات حداکثر عمق آبشستگی با مهمترین پارامترهای هندسی پایه‌های مرکب که در این مطالعه بررسی شده است می‌تواند در ارائه روابط تجربی جهت تخمین عمق آبشستگی مفید باشد.

واژگان کلیدی: آبشستگی، پایه مرکب، سرشمع، گروه شمع، ضخامت سرشمع.

Experimental Investigation of Local Scour around a Complex Bridge Pier

H. Ghodsi, M. J. Khanjani and A. A. Beheshti

Abstract: One of the main reason for bridge collapses may be flood flow scour. This interesting subject attracted many researchers, resulting in improvement of many theoretical and experimental works. In this study, local scour around complex pier was experimentally investigated. The experiments were carried out in a concrete rectangular flume. The flume was 0.77 m wide, 0.6 m deep and 21.85 m long. The flume was filled by uniform sand with median size of $d_{50}=0.71$ mm and geometric standard deviation of $\sigma_g=1.135$. Complex pier consisted of a column, a pile cap that was rested on array of piles. The experiments were conducted using clear-water condition. To observe the geometric parameters effect (pile cap upstream extension, pile group arrangement, pile group upstream extension, and pile cap thickness) on scour depth, six models of complex pier were performed. A total of 82 experiments were carried out to study local scour. To evaluate the complex pier scour depth commonly procedures such as HEC-18, Coleman (2005), Sheppard et al. (2004), and Ataie-Ashtiani et al. (2010) were applied. The results show that, there is a good agreement between measured data and theoretical estimation and also there was no harmony between a measured and estimated data. The collected data were used to evaluate some leading existing theoretical and experimental methods for calculation the maximum scour depth around the complex piers.

Keywords: Scour, Complex Pier, Pile Cap, Pile Group, Pile Cap Thickness.

۱ - مقدمه

وقتی پایه پل در برابر جریان قرار می‌گیرد، ممکن است توپوگرافی بستر رسوبی اطراف آن تغییر کند. با رسیدن تغییرات توپوگرافی به فونداسیون پایه پل، پایداری آن در معرض خطر قرار می‌گیرد. از این پدیده به عنوان آبخستگی یاد می‌شود. از این رو پیش بینی عمق آبخستگی اطراف سازه‌های در معرض جریان مورد توجه قرار گرفته است. تخمین عمق آبخستگی اطراف پایه پل یکی از پارامترهای مهم در طراحی پل‌ها می‌باشد. پژوهش‌های مختلفی برای برآورد عمق آبخستگی اطراف پایه پل‌ها انجام شده‌اند که از آن جمله می‌توان به این موارد اشاره کرد: لارسن و تاچ، لیو و همکاران، شن و همکاران، بروسرز و همکاران، جین و فیشر، رادکیوی، ملویل و سوترلند، فلوریش، ملویل، ابد و گسر، ریچاردسون و ریچاردسون، پارولا و همکاران، ملویل و رادکیوی، ملویل، لیم، مارتین واید و همکاران، اتما و همکاران، ملویل و کلمن، شپپارد و همکاران، هزا و همکاران، لو و همکاران [۱]. رادکیوی تاثیر پارامترهای جریان و رسوب را بر آبخستگی پایه پل‌ها بررسی کرد و بر اساس داده‌های آزمایشگاهی روابط ریاضی برای این مسئله ارائه نمود [۲]. ملویل عوامل موثر بر آبخستگی پایه‌ها و کوله‌ها را بطور گسترده بررسی کرد که منجر به ارائه رابطه تجربی موسوم به فاکتورهای k (K-factors) گردید [۳]. اتما و همکاران مسئله آبخستگی را اطراف پایه‌های مورب نسبت به جریان بررسی کردند [۴]. در دهه گذشته بیشتر مطالعات مسئله آبخستگی حول تک پایه‌ها و گروه پایه‌ها متمرکز بوده است. ملویل و س، درگاهی، اتما و همکاران، انگر و هگر، کیرکیل و همکاران [۵-۹]. همچنین بررسی‌های آزمایشگاهی هم پیرامون آبخستگی پایه‌های مرکب (compound pier) و کیسیون (caisson) انجام گرفت: هانا، عطایی و آشتیانی و بهشتی، ذونعمت کرمانی و همکاران، امینی و همکاران، عطایی و کردکندی و بهشتی و همکاران [۱۰-۱۶]. ملاحظات فیزیکی و اقتصادی منجر به طراحی پایه‌هایی شامل ستونی واقع بر سرشمع که توسط گروهی از پایه‌ها حمایت می‌شوند، شده است (شکل ۱). از این مجموعه به عنوان پایه مرکب (complex pier) یاد می‌شود. دانش و اطلاعات پیرامون عمق آبخستگی و

فرآیند آبخستگی تنها به چند پژوهش می‌شود که از آن جمله می‌توان به ملویل و کلمن، ریچاردسون و دیویس، شپپارد و گلسر، کلمن، عطایی آشتیانی و همکاران، بهشتی و عطایی آشتیانی، لو و همکاران، کومار و کوتایاری، و فرارو و همکاران اشاره کرد [۲۵-۱۷]. ملویل و کلمن روشی را برای محاسبه عمق آبخستگی پایه‌های مرکب، شامل معادلات مختلف بر پایه اجزا مختلف پایه مرکب ارائه کردند [۱۷]. در این روش از تاثیر گروه شمع صرف نظر شده است. در این روش، با افزایش ارتفاع سرشمع نسبت به بستر اولیه عمق آبخستگی هم افزایش می‌یابد. کلمن با در نظر گرفتن پنج حالت مختلف برای ارتفاع سرشمع، روابط قبلی را اصلاح نمود [۲۰]. عطایی آشتیانی و همکاران با اضافه کردن دو مورد به فرضیات کلمن بر پایه داده‌های آزمایشگاهی، روابط معتبرتری ارائه نمودند [۲۱]. لو همکاران با استفاده از تئوری انتقال رسوب، معادلات نیمه تجربی برای محاسبه عمق آبخستگی اطراف پایه‌های غیر یکنواخت ارائه کردند [۲۳]. کوتایاری و کومار تغییرات عمق آبخستگی اطراف پایه‌های مدور یکنواخت را بصورت آزمایشگاهی بررسی نمودند [۲۴]. فرارو و همکاران با کمک داده‌های آزمایشگاهی به مطالعه تاثیر ضخامت سرشمع بر حداکثر عمق آبخستگی پایه‌های مرکب پرداختند.

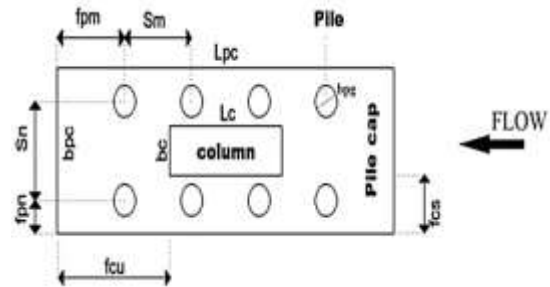
برای تخمین عمق آبخستگی اطراف پایه‌های مرکب روش‌های گوناگونی پیشنهاد گردیده است و مورد استفاده قرار می‌گیرد. روش طراحی HEC-18، توسط سازمان نظارت بر بزرگراه‌های آمریکا ارائه شده است [۱۸]. در این روش عمق آبخستگی پایه مرکب از جمع جبری مولفه‌های پایه مرکب (پایه، سرشمع و گروه شمع) بدست می‌آید. در روش ملویل و کلمن پایه مرکب به صورت ستونهای واقع بر فونداسیون (بدون اثر گروه شمع) بررسی شدند [۱۷]. شپپارد و همکاران روابطی برای محاسبه قطر معادل D^* پایه مرکب به صورت تک پایه مدور ارائه نمودند [۱۹].

در این روش فرض بر این است که عمق آبخستگی پایه مدور با قطر D^* در همان شرایط رسوب و جریان، برابر با عمق آبخستگی برای پایه مرکب را نتیجه خواهد داد. روش کلمن بر مبنای معادلات ملویل و کلمن ارائه شد [۲۰ و ۱۷].

می‌شود که از استغراق پایه جلوگیری شود. در مجموع از شش مدل آزمایشگاهی شامل پایه، سرشمع و گروه شمع با مشخصات مختلف برای بررسی اثر گسترش بالادست سرشمع، تعداد شمع‌ها در راستای جریان، گسترش بالادست شمع‌های ردیف اول و ضخامت سرشمع استفاده گردید (جدول ۱). آزمایش‌ها تا رسیدن به زمان تعادل ادامه می‌یابد. بر مبنای معیار ملویل و چپو زمان تعادل زمانی در نظر گرفته شده است که در آن افزایش عمق آبشستگی کمتر از ۰.۵٪ قطر پایه در ۲۴ ساعت می‌باشد [۲۶].

۳- مشاهدات و تحلیل نتایج

عمق آبشستگی بر حسب گسترش بالادست سرشمع در شکل ۲ ترسیم شده است. ارتفاع سرشمع برای حالت‌هایی که سرشمع زیر بستر اولیه مدفون است مثبت و برای حالت‌هایی که سرشمع از ابتدا در معرض جریان واقع شده، منفی در نظر گرفته شد. مشاهدات به خوبی تغییرات پیش‌بینی شده توسط پارولا و همکاران را تایید می‌کند [۲۷]. مدل پارولا و همکاران شامل پایه واقع بر روی فونداسیون بوده است. شرایط برای مدل‌های $Y/D_c=0$ و $Y/D_c=-0.667$ این مطالعه نیز صادق می‌باشد. در این حالت‌ها، تنها پایه و سرشمع در معرض جریان قرار دارند و از اثر گروه شمع صرف نظر شده است. در نتیجه با افزایش گسترش بالادست سرشمع، عمق آبشستگی کاهش می‌یابد.



شکل ۱: مدل پایه مرکب

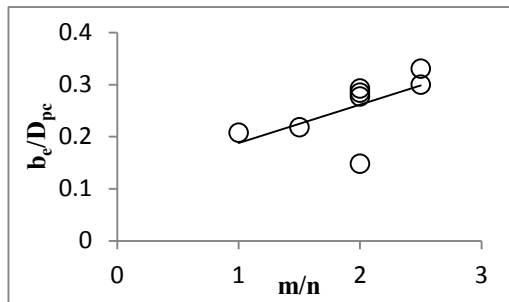
در این مطالعه اثر پارامترهای هندسی شامل گسترش بالادست سرشمع، تعداد شمع‌ها در راستای جریان، گسترش بالادست شمع‌های ردیف اول و ضخامت سرشمع بر عمق آبشستگی پایه مرکب با مدل آزمایشگاهی بررسی گردید.

۲- مدل فیزیکی و مراحل آزمایش

کلیه آزمایش‌ها در کانال آزمایشگاه هیدرولیک دانشگاه شهید باهنر کرمان به طول ۲۱،۸۵ متر، عرض ۷۷ سانتیمتر و عمق ۶۰ سانتیمتر انجام شد. آزمایش‌ها تحت شرایط آب صاف و رسوب بستر یکنواخت انجام شدند. کف کانال به عمق ۳۰ سانتیمتر از ماسه با قطر متوسط ۰،۷۱ میلی‌متر و انحراف معیار استاندارد ۱،۱۳۵ پر شد. جریان آب پس از عبور از سطح شیب‌دار ابتدای کانال، وارد کانال می‌شود. یک سرریز در انتهای کانال عمق و دبی جریان را تنظیم و ثابت می‌کند. عمق آب با توجه به شرایط آب صاف طوری تنظیم

جدول ۱- خلاصه مشخصات مدل پایه‌های مرکب

VI	V	IV	III	II	I	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}	گسترش طولی بالادست سرشمع (cm)
۳،۵	۳،۵	۳،۵	۳،۵	۳،۵	۳،۵	f_{cs}	گسترش عرضی بالادست سرشمع (cm)
۶	۶	متغیر	۶	۶	۶	f_{pm}	گسترش طولی شمع‌های 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 شمع‌ها در راستای جریان
۲	۲	۲	۲	۲	۲	n	تعداد شمع‌ها 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 شمع‌ها (cm)
۶	۶	۶	۶	۶	۶	S_n	فاصله عرضی شمع‌ها (cm)

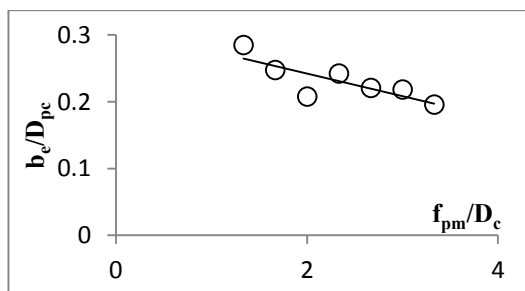


شکل ۳: عمق آبشستگی در برابر تعداد شمع در امتداد جریان

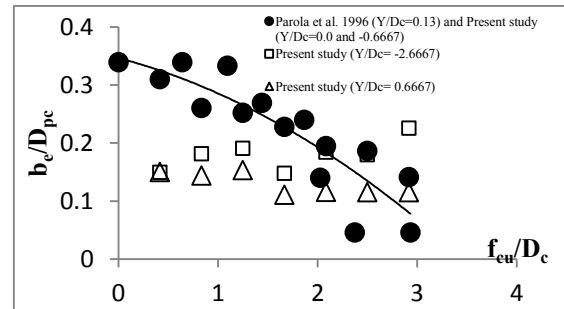
سانتیمتر، عمق آبشستگی کاهش می‌یابد. در این حالت فرض بر این است با افزایش ضخامت سرشمع، سرشمع مانند مانعی در برابر جریان است و به مسلح شدن بستر اطراف سرشمع کمک می‌کند و همین امر موجب کاهش عمق آبشستگی می‌شود.

در ادامه آزمایش‌هایی برای یافتن ارتفاع سرشمع که در آن بستر اطراف سرشمع شسته شده و گروه شمع در معرض جریان قرار می‌گیرند، Y_T انجام شد. در این حالت تغییرات عمق آبشستگی در برابر ضخامت سرشمع در شکل ۵-ج آورده شده است. کلمن مقدار Y_T را برابر نصف ضخامت سرشمع پیشنهاد نمود [۲۰]. مشاهدات بیانگر این است، وقتی ضخامت سرشمع بین ۲ سانتیمتر تا ۱۰ سانتیمتر تغییر می‌کند 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، بخشی از ضخامت سرشمع که در برابر جریان قرار می‌گیرد از شسته شدن بستر جلوگیری می‌کند.

در این صورت، قدرت گردابه‌های نعل اسبی کاهش یافته و عمق آبشستگی هم کاهش می‌یابد. تغییرات Y_T در برابر ضخامت سرشمع در شکل ۶ رسم شده است.



شکل ۴: عمق آبشستگی در برابر گسترش بالادست شمع‌های ردیف اول



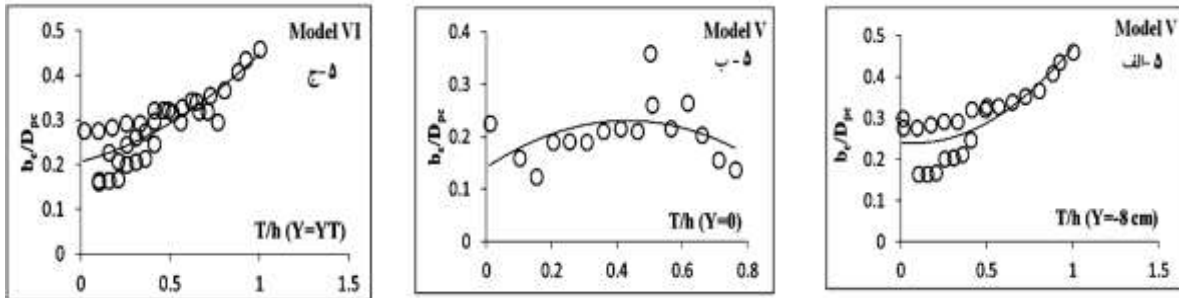
شکل ۵: عمق آبشستگی در برابر گسترش بالادست سرشمع

تغییرات عمق آبشستگی بر حسب تعداد شمع‌های در راستای جریان در شکل ۳ رسم شده است. در این شکل از داده‌های لو و همکاران و فرارا و همکاران هم استفاده شده است [۲۳ و ۲۵]. همانطور که از شکل ۳ برمی‌آید با افزایش تعداد شمع‌های در راستای جریان، عمق آبشستگی افزایش می‌یابد.

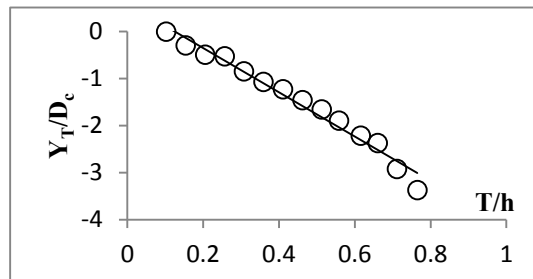
عمق آبشستگی بر حسب گسترش بالادست شمع‌های ردیف اول در شکل ۴ رسم شده است. در این حالت با افزایش گسترش بالادست شمع‌های ردیف اول، عمق آبشستگی کاهش می‌یابد. در این حالت فرض بر این است که با افزایش گسترش بالادست شمع‌های ردیف اول، قدرت گردابه‌های نعل اسبی و ورتکس‌های رو به پایین در اطراف پایه مرکب کاهش یافته و از شدت آبشستگی کاسته می‌شود. در نتیجه عمق آبشستگی هم کاهش می‌یابد.

تغییرات عمق آبشستگی در برابر ضخامت سرشمع در شکل ۵ آورده شده است. در شکل ۵-الف، عمق آبشستگی در برابر ضخامت سرشمع، وقتی سرشمع از ابتدا در معرض جریان واقع شده ($Y=1cm$) رسم شده است. مشاهدات به خوبی تغییرات پیش‌بینی شده توسط مارتین-واید و همکاران را تایید می‌کند [۲۸].

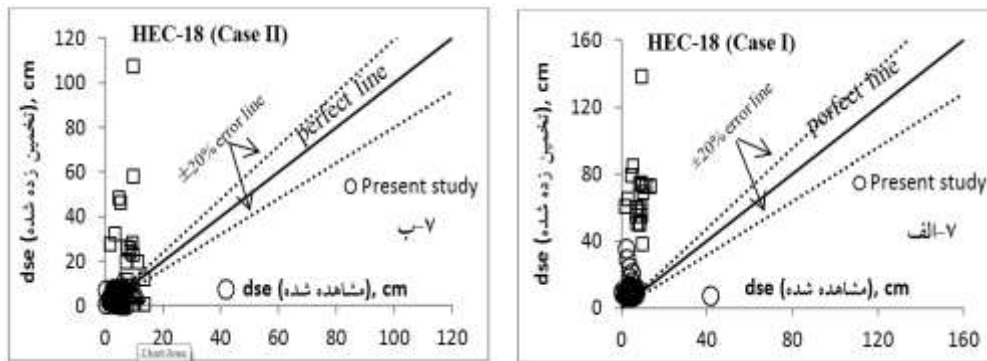
در این حالت ضخامت سرشمع از ۲ سانتیمتر تا ۸ سانتیمتر تغییر می‌کند. با افزایش ضخامت سرشمع، عمق آبشستگی هم افزایش می‌یابد. در شکل ۵-ب عمق آبشستگی بر حسب ضخامت سرشمع برای سرشمع مدفون ($Y=0.0$) آورده شده است. در این حالت ضخامت سرشمع از ۲ سانتیمتر تا ۱۵ سانتیمتر متغیر است. همانطور که از شکل ۵-ب برمی‌آید، با افزایش ضخامت سرشمع از ۲ سانتیمتر تا ۸ سانتیمتر عمق آبشستگی هم افزایش می‌یابد. اما در ادامه با افزایش ضخامت سرشمع از ۹ سانتیمتر تا ۱۵



شکل ۵: عمق آبستگی در برابر ضخامت سرشمع



شکل ۶: ارتفاع سرشمع قطع شده در برابر ضخامت سرشمع



شکل ۷- تغییرات عمق آبستگی مشاهده شده با روش ریچاردسون و دیویس (۲۰۰۱)

در این روش، محاسبه و دسته بندی حالت‌های پایه مرکب تقریباً مشابه روش HEC-18 می‌باشد. نتایج حاصل از روش شیپارد و همکاران در شکل‌های ۸-الف، ۸-ب و ۸-ج آورده شده است. برطبق نتایج ارائه شده، این روش برای حالت یک و حالت دو نتایج خوبی برآورد نمی‌کند. در حالیکه برای حالت ۳ برآورد بهتری حاصل شده است.

ج- روش کلمن

در این روش، قطر معادل پایه برای بازه‌های گسسته محاسبه می‌شود. سپس عمق آبستگی برای هر قطر معادل بدست می‌آید. نتایج این روش در شکل‌های ۹-الف و ۹-ب ترسیم شده است. با این حال مقادیر تخمین زده شده بسیار محافظه کارانه است.

۴. روش های تخمین عمق آبستگی

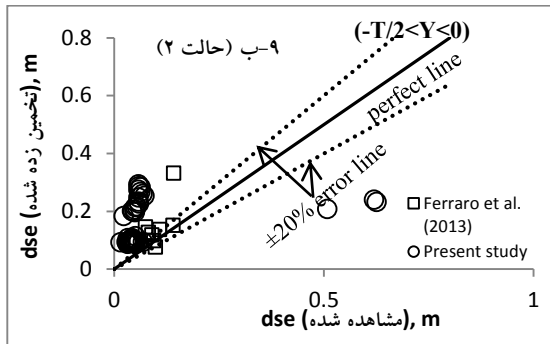
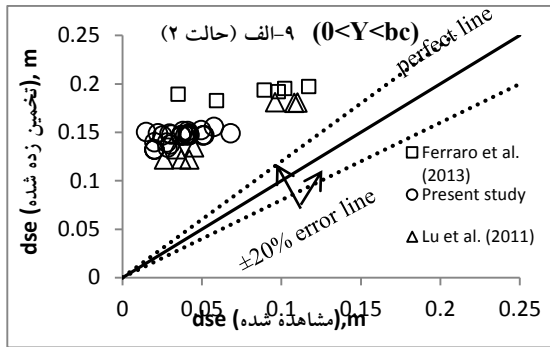
الف- روش HEC-18

آنچه از شکل ۷-الف بر می آید، برای سرشمع نیمه مدفون و مدفون مقادیر پیش بینی شده بسیار محافظه کارانه است. در این روش عمق آبستگی از برهم نهی المان‌های در معرض جریان بدست می‌آیند. در حالیکه نتایج شکل ۷-ب بهتر و مستندتر می‌باشد. نتایج داده‌های این مقاله با داده‌های لو و همکاران و فرارو و همکاران مقایسه شده است [۲۳ و ۲۵]. همانطور که مشاهده می‌شود، بیشتر پیش‌بینی‌ها در بازه خطای ۲۰٪+ و ۲۰٪- قرار دارند.

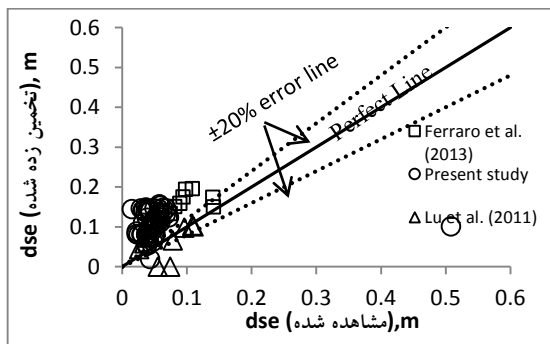
ب- روش شیپارد و همکاران

د- روش عطایی آشتیانی و همکاران

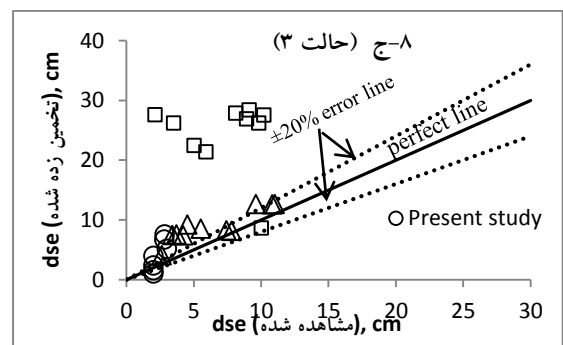
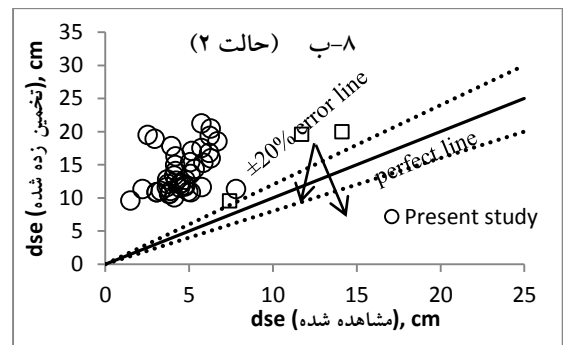
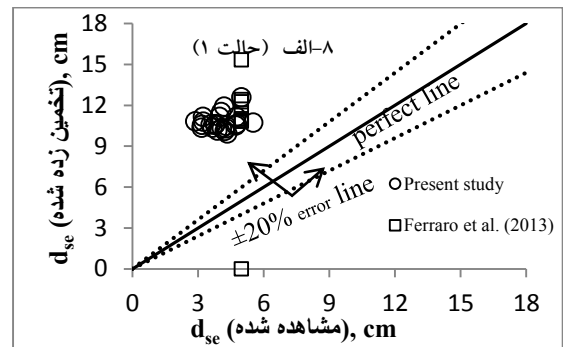
عطایی آشتیانی و همکاران در این روش به تصحیح رابطه ارائه شده توسط کلمن بر پایه آزمایش‌های پیشین پرداختند. آنها با اضافه کردن ضرایب مشخص، تخمین بهتری از روش کلمن ارائه کردند. این نتایج در شکل ۱۰ آورده شده است.



شکل ۹: تغییرات عمق آبستگی مشاهده شده با روش کلمن (۲۰۰۵)



شکل ۱۰: تغییرات عمق آبستگی مشاهده شده با روش عطایی آشتیانی و همکاران (۲۰۱۰)



شکل ۸: تغییرات عمق آبستگی مشاهده شده با روش شیپارد و همکاران (۲۰۰۴)

معرض خطر قرار می‌گیرد. از این پدیده به عنوان آبستگی یاد می‌شود. در این مطالعه اثر پارامترهای هندسی بر عمق آبستگی پایه مرکب با مدل آزمایشگاهی بررسی گردید. این پارامترها شامل گسترش بالادست

۵. نتیجه گیری

وقتی پایه پل در برابر جریان قرار می‌گیرد، ممکن است توپوگرافی بستر رسوبی اطراف آن تغییر کند. با رسیدن تغییرات توپوگرافی به فونداسیون پایه پل، پایداری آن در

اندازه گیری ها نشان می دهد که گسترش بالادست سرشمع کوتاه تر سبب ایجاد عمق آبشستگی عمیق تر می شود. هنگامی که سرشمع بر روی بستر اولیه رسوبات قرار دارد، با افزایش تعداد شمع های در راستای جریان عمق آبشستگی افزایش می یابد. وقتی سرشمع بالاتر از بستر اولیه رسوبات قرار دارد، با افزایش طول گسترش بالادست شمع های ردیف اول، حداکثر عمق آبشستگی کاهش می یابد. با افزایش ضخامت سرشمع که بالاتر از سطح اولیه رسوبات قرار دارد عمق آبشستگی بیشتری اتفاق می افتد. تغییرات عمق آبشستگی در برابر ضخامت سرشمع از تابع درجه دو پیروی می کند و حداکثر عمق آبشستگی در ضخامت ۹ سانتیمتر رخ می دهد. با افزایش ضخامت سرشمع، ارتفاع سرشمع قطع شده و حداکثر عمق آبشستگی افزایش می یابد.

سرشمع، تعداد شمع های در راستای جریان، گسترش بالادست شمع های ردیف اول و ضخامت سرشمع بوده اند. نتایج حاکی از آن است که با افزایش گسترش 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. در حالیکه روش عطایی و همکاران با ارائه ضرایب تصحیحی بر مبنای داده های پیشین موفق به ارائه تخمین بهتری برای عمق آبشستگی اطراف پایه های مرکب شده است. مشاهدات آزمایشگاهی را می توان به صورت زیر خلاصه نمود:

Univ. of Canterbury, Christchurch, New Zealand, 1978.

- [11] Ataie-Ashtiani, B.; Beheshti, A. A.; "Experimental investigation of clear-water local scour at pile groups", vol. 10, p.p. 1100-1104, 2006 (American).
- [12] Zounemat-Kermai, M.; Beheshti, A. A.; Ataie-Ashtiani, B.; Sabbagh-Yazdi, S. R.; "Estimation of current-induced scour depth around pile groups using neural network and adaptive neuro-fuzzy inference system", vol. 2, p.p. 746-755, 2009 (Netherlands).
- [13] Amini, A.; Melville, B. W.; Thamer, M. A.; Ghazali, A. H.; "Clear-water local scour around pile groups in shallow-water flow", vol. 2, p.p. 177-185, 2012 (American).
- [14] Ataie-Ashtiani, B.; Aslani-Khorsandi, A.; "Flow field around side-by-side piers with and without scour hole", vol. 3, p.p. 471-490, 2012b (Netherlands).
- [15] Ataie-Ashtiani, B.; Aslani-Khorsandi, A.; "Flow field around single and tandem piers", vol. 3, p.p. 471-490, 2012b (Netherlands).
- [16] Beheshti, A. A.; Ataie-Ashtiani, B.; Khanjani, M. J.; "Discussion of "Clear-water local scour around pile groups in shallow-water flow"", vol. 6, p.p. 679-681, 2013 (American).
- [17] Melville, B. W.; Coleman, S. E.; *Bridge scour*, Water Resources Publications, Littleton, Colo, 2000.
- [18] Richardson, E.V.; Davis, S.R.; "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, 2001.

مراجع

- [1] Melville, B. W.; Raudkivi, A. J.; "Effects of foundation geometry on bridge pier scour", vol. 4, p.p. 203-209, 1996 (American).
- [2] Raudkivi, A. J.; "Functional trends of scour at bridge piers", vol. 1, p.p. 1-13, 1996 (American).
- [3] Melville, B. W.; "Pier and abutment scour: integrated approach", p.p. 125-136, 1997 (American).
- [4] Ettema, B.; Mostafa, E. A.; Melville, B. W.; Yassin, A. A.; "Local scour at skewed piers", vol. 7, p.p. 756-759, 1998 (American).
- [5] Melville, B. W.; Sutherland, A. J.; "Design methods for local scour at bridge piers", vol. 10, p.p. 1210-1226, 1988 (American).
- [6] Dargahi, B.; "Controlling mechanism of local scouring", vol. 10, p.p. 1197-1214, 1990 (American).
- [7] Ettema, R.; Kirkil, G.; Muste, M.; "Similtude of large-scale turbulence in experiments on local scour at cylinders", 733-9429(2006)132:1(33), vol. 1, p.p. 33-40, 2006 (American).
- [8] Unger, J.; Hager, W. H.; "Riprap failure at circular bridge piers", vol. 4, p.p. 354-362, 2006 (American).
- [9] Kirkil, G.; Constantinescu, S. G; Ettema, R.; "Coherent structures in the flow field around a circular cylinder with scour hole", vol. 5, p.p. 572-587, 2008 (American).
- [10] Hannah, C. R.; "Scour at pile groups", Res. Rep. No. 28-3, Dept. of Civil Engineering,

- [24] Kumar, A.; Kothiyari, U. C.; “*Temporal variation of scour around circular compound piers*”, vol. 5, p.p. 420-429, **2012** (American).
- [25] Ferraro, D.; Tafarajnoruz, A.; Gaudio, R.; Cardoso, A. H.; “*Effects of pile cap thickness on maximum scour depth at a complex pier*”, vol. 5, p.p. 482-491, **2013** (American).
- [26] Melville, B. W.; Chiew, Y. M.; “*Time scale for local scour at bridge piers*”, vol. 1, p.p. 59-65, **1999** (American).
- [27] Parola, A. C.; Mahdavi, S. K.; Brown, B. M.; El Khoury, A.; “*Effects of rectangular foundation geometry on local pier scour*”, 733-9429(1996)122%3A1(35), vol. 1, p.p. 35-40, **2010** (American).
- [28] Martin-Vide, J. P.; Hidalgo, C.; Bateman, A.; “*Local scour at piled bridge foundation*”, 733-9429(1998)124:4(439), vol. 4, p.p. 439-444, **2010** (American).
- [19] Sheppard, D. M.; Odeh, M.; Glasser, T.; “*Large scale clear-water local scour experiments*”, vol. 10, p.p. 957-963, **2004** (American).
- [20] Coleman, S. E.; “*Clearwater local scour at complex piers*”, vol. 4, p.p. 330-334, **2005** (American).
- [21] Ataie-Ashtiani, B.; Baratian-Ghorgi, Z.; and Beheshti, A. A.; “*Experimental investigation of clear-water local scour of compound piers*”, vol. 6, p.p. 343-351, **2010** (American).
- [22] Beheshti, A. A.; Ataie-Ashtiani, B.; “*Experimental study of three-dimensional flow field around a complex bridge pier*”, vol. 2, p.p. 343-351, **2010** (American).
- [23] Lu, J. Y.; Shi, Z. Z.; Hong, J. H.; Lee, J. J.; Raikar, R. V.; “*Temporal variation of scour depth at nonuniform cylindrical piers*”, vol. 1, p.p. 45-56, **2011** (American).