

## بررسی پارامترهای موثر بر آبشستگی موضعی پایه های مرکب پل ها

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

۱- کارشناس ارشد عمران- سازه های هیدرولیکی، دانشگاه شهید باهنر کرمان

۲- استاد گروه مهندسی عمران- دانشگاه شهید باهنر کرمان

۳- استادیار گروه مهندسی آب- دانشگاه فردوسی مشهد

Habibeh.ghodsi@gmail.com

### چکیده

آبشستگی پایه های پل اصلی ترین عامل تخریب پل ها محسوب می شود. پیچیدگی مکانیسم آبشستگی در اطراف پایه های پل باعث شده است که علی رغم پژوهش های گسترده ای که انجام شده، هنوز معادله مناسبی برای پیش بینی عمق آبشستگی در دست نباشد. این مکانیسم در پایه های مرکب پیچیده تر است. در این تحقیق از مدل فیزیکی برای مطالعه آبشستگی در اطراف پایه های مرکب در شرایط آب زلال استفاده شده است. کانال آزمایشگاهی استفاده شده به طول ۲۱/۸۵ متر، عرض ۰/۷۷ متر و عمق ۰/۶ متر بوده است. بستر کانال از رسوبات یکنواخت با اندازه متوسط ۰/۷۱ میلیمتر پوشیده شد. مدل های مختلفی از پایه های مرکب جهت بررسی اثر پارامترهای هندسی مختلف شامل گسترش بالادست سرشمع، تعداد شمع های در راستای جریان، گسترش بالادست شمع های ردیف اول، ضخامت سرشمع و ارتفاع سرشمع آزمایش شد. نتایج نشان می دهد که با افزایش گسترش بالادست سرشمع و گسترش بالادست شمع های ردیف اول، عمق آبشستگی کاهش می یابد. با افزایش تعداد شمع های در راستای جریان عمق آبشستگی افزایش می یابد. وقتی همه المان های پایه مرکب در معرض جریان قرار دارند، با افزایش ضخامت سرشمع عمق آبشستگی هم افزایش می یابد. در صورتیکه وقتی سرشمع همتراز بستر اولیه قرار دارد، با افزایش ضخامت سرشمع، عمق آبشستگی ابتدا افزایش و سپس کاهش می یابد. روند تغییرات حداکثر عمق آبشستگی با مهمترین پارامترهای هندسی پایه های مرکب که در این مطالعه بررسی شده است می تواند در ارائه روابط تجربی جهت تخمین عمق آبشستگی مفید باشد.

کلمات کلیدی: آبشستگی، مدل فیزیکی، پایه مرکب، سرشمع، ضخامت سرشمع.

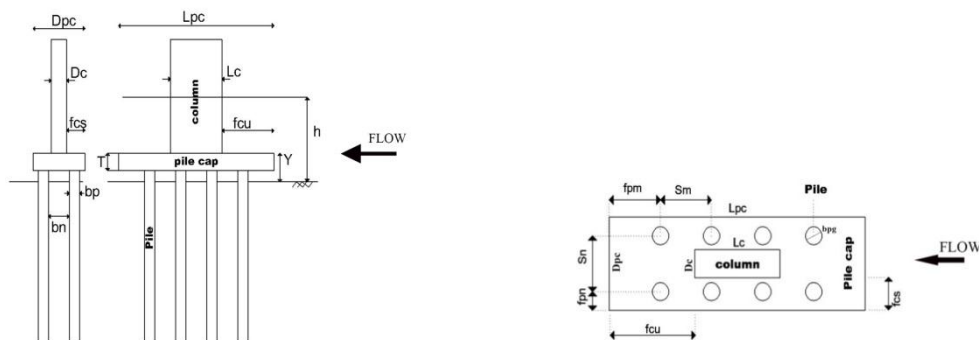
### مقدمه

بحث آبشستگی هر چند قدمتی طولانی در علم هیدرولیک دارد، لیکن به دلیل شرایط و پیچیدگی های خاص آن و همچنین به دلیل نبودن رابطه ای مناسب که پاسخگوی تمامی شرایط باشد، همچنان مورد توجه خاص محققین علم هیدرولیک است. سازه های هیدرولیکی که بصورت مانعی در برابر جریان قرار می گیرند، الگوی جریان در نزدیکی خود را تغییر می دهند و به صورت موضعی باعث آبشستگی در این محدوده می شوند. اهمیت بررسی پدیده آبشستگی زمانی آشکار می شود که عمق آبشستگی قابل ملاحظه باشد به گونه ای که این عمق به فونداسیون سازه برسد و پایداری این سازه ها را در معرض خطر قرار دهد یا موجب تخریب آنها گردد. روش معمول برای تعیین عمق آبشستگی استفاده از روابط تجربی یا بکارگیری مدل های فیزیکی می باشد. علیرغم مطالعات وسیعی که تاکنون جهت برآورد عمق آبشستگی موضعی اطراف سازه های هیدرولیکی مختلف انجام شده است، هنوز رابطه ای عمومی و جامعی برای محاسبه آبشستگی موضعی ارائه نشده است. همچنین نظر به اینکه مبانی تئوری و تجربی روش های مختلف بعضاً متفاوت بوده است، لذا مقدار

آبستگي موضعي محاسبه شده بر اساس روش های مختلف، الزاماً یکسان و یا نزدیک بهم نمی باشند. معمولاً توصیه می شود محاسبه عمق آبستگي با روش های مختلف انجام شود و در نهایت بر اساس قضاوت مهندسی، مقدار آبستگي موضعي تعیین شود. در بسیاری از موارد نیز می توان از مدل های فیزیکی برای تخمین عمق آبستگي کمک گرفت.

اکثر مطالعات پیشین برای پایه ها با سطح مقطع یکنواخت انجام شده اند [ملویل و سوترلند (Melville and Sutherland 1988)، رادکیوی و اتما (Raudkivi and Ettema 1983) و هانا (Hannah 1978)]، اما ملاحظات ژئوتکنیکی و اقتصادی اغلب منجر به طراحی پل هایی با هندسه مرکب می شود [پارولا و همکاران (Parola et al. 1996)، ملویل و کلمن (Melville and Coleman 2000)، کلمن (Coleman 2005)، عطایی آشتیانی و همکاران (Ataie-Ashtiani et al. 2010) و فرارو و همکاران (Ferraro et al. 2013)]. پایه های مرکب از اجزای متعددی تشکیل شده اند: پایه، سرشمع و گروه شمع (شکل ۱). از این رو پیش بینی عمق آبستگي برای این پایه ها ضروری است. در همین راستا روش های مختلفی برای تخمین عمق آبستگي اطراف پایه با هندسه مرکب ارائه شده است: راهنمای HEC-18 [ریچاردسون و دیویس (Richardson and Davis 2001)]، شیپارد و گلسر (Sheppard and Glasser 2004)، کلمن (Coleman 2005) و عطایی آشتیانی و همکاران (Ataie-Ashtiani et al. 2010) با انجام آزمایش های مختلف، روابطی را برای تخمین حداکثر عمق آبستگي اطراف پایه های مرکب ارائه دادند. روابط ارائه شده برای داده های آزمایشگاهی مختلفی مورد بررسی قرار گرفته اند. نتایج نشان می دهد که این روابط با تغییر شرایط آزمایش نسبت به شرایطی که این روابط بدست آمده اند نتایج دقیقی ارائه نمی دهند و نیاز به بهبود دارند.

هدف این تحقیق، بررسی مسئله آبستگي موضعي اطراف پایه ها با هندسه مرکب است. در مطالعات پیشین اثر پارامترهایی همچون هندسه پایه پل، ارتفاع سرشمع از بستر (Y)، نسبت عرض ستون به عرض سرشمع ( $D_c/D_{pc}$ )، آرایش گروه شمع ( $m \times n$ ) و ضخامت سرشمع (T) بررسی شده است. در این مطالعه تاثیر پارامتر گسترش بالادست سرشمع ( $f_{cu}$ )، پارامتر فاصله مرکز شمع ها در ردیف اول از لبه بالادست سرشمع ( $f_{pm}$ ) و تعداد ستون های گروه شمع ها (m) بر روی عمق آبستگي پایه ها با هندسه مرکب بررسی خواهد شد (تعریف پارامترها در شکل ۱ ارائه شده است). همچنین با انجام تعدادی آزمایش تلاش شده تا ارتفاعی از سرشمع، که در آن سرشمع شسته شده و شمع ها در معرض جریان قرار می گیرند، تعیین گردد.



شکل ۱- مدل پایه مرکب

## مدل فیزیکی و مراحل آزمایش

کلیه آزمایش ها در کانال آزمایشگاه هیدروئیک 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. کف کانال به عمق ۳۰ سانتیمتر از ماسه با قطر متوسط ۰٫۷۱ میلیمتر و انحراف معیار استاندارد ۱٫۳۵ پر شد. جریان آب پس از عبور از سطح شیبدار ابتدای کانال، وارد کانال می شود. یک سرریز 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 از شش مدل آزمایشگاهی پایه مرکب (شامل پایه، سرشمع و گروه شمع) با مشخصات مختلف

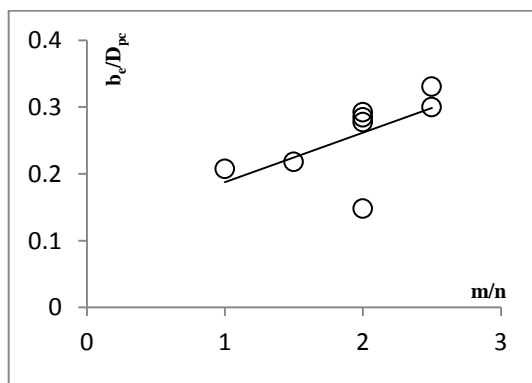
برای بررسی اثر گسترش بالادست سرشمع، تعداد شمع ها در راستای جریان، گسترش بالادست شمع های ردیف اول و ضخامت سرشمع استفاده گردید (جدول ۱). آزمایش ها تا رسیدن به زمان تعادل ادامه می یابد. بر مبنای معیار ملویل و چو (Melville and Chiew 1999) زمان تعادل زمانی در نظر گرفته شده است که در آن افزایش عمق آبشستگی کمتر از ۵٪ قطر پایه در ۲۴ ساعت می باشد. در مجموع ۸۲ آزمایش انجام شده است.

جدول ۱- خلاصه مشخصات مدل پایه های مرکب

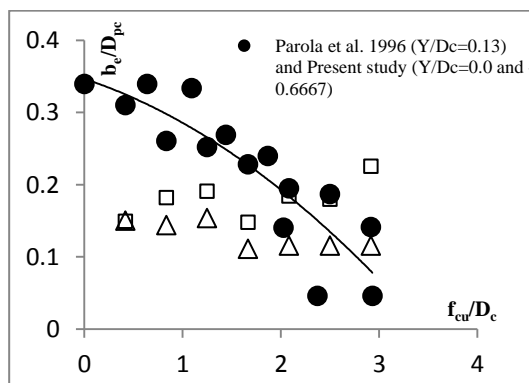
پارامتر	مدل	I	II	III	IV	V	VI
عرض ستون (cm)	$b_c$	۳	۳	۳	۳	۳	۳
طول ستون (cm)	$L_c$	متغیر	۸	۱۴	۲۰	۲۷.۵	۲۷.۵
عرض سرشمع (cm)	$b_{pc}$	۱۰	۱۰	۱۰	۱۰	۱۰	۱۰
طول سرشمع (cm)	$L_{pc}$	۳۰	۱۸	۲۴	متغیر	۳۰	۳۰
گسترش طولی بالادست سرشمع (cm)	$f_{cu}$	متغیر	۵	۵	متغیر	۱.۲۵	۱.۲۵
گسترش عرضی بالادست سرشمع (cm)	$f_{cs}$	۳.۵	۳.۵	۳.۵	۳.۵	۳.۵	۳.۵
گسترش طولی شمع های ردیف اول (cm)	$f_{pm}$	۶	۶	۶	متغیر	۶	۶
ضخامت سرشمع (cm)	$T$	۳	۳	۳	۳	متغیر	متغیر
ارتفاع سرشمع (cm)	$Y$	متغیر	-۸	-۸	-۸	-۸	متغیر
تعداد شمع ها در راستای جریان	$m$	۴	۲	۳	۴	۴	۴
تعداد شمع ها در جهت عمود بر جریان	$n$	۲	۲	۲	۲	۲	۲
عرض شمع (cm)	$b_{pg}$	۲	۲	۲	۲	۲	۲
فاصله طولی شمع ها (cm)	$S_m$	۶	۶	۶	۶	۶	۶
فاصله عرضی شمع ها (cm)	$S_n$	۶	۶	۶	۶	۶	۶

### مشاهدات و تحلیل نتایج

عمق آبشستگی بر حسب گسترش 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 گسترش بالادست سرشمع، عمق آبشستگی کاهش می یابد.



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

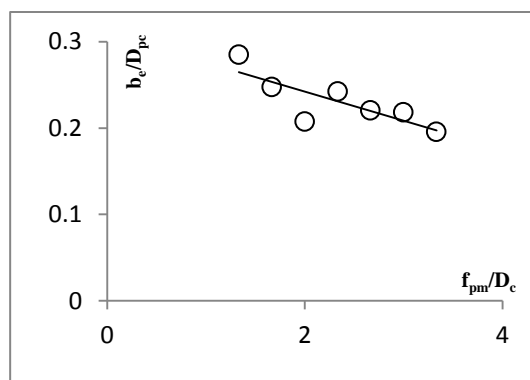


شکل ۲- عمق آبشستگی در برابر گسترش بالادست سرشمع

تغییرات عمق آبخستگی بر حسب تعداد شمع های در راستای جریان در شکل ۳ رسم شده است. در این شکل از داده های لو و همکاران (Lu et al. 2011) و فرارا و همکاران (Ferraro et al. 2013) هم استفاده گردید. همانطور که شکل ۳ نشان می دهد با افزایش تعداد شمع های در راستای جریان، عمق آبخستگی افزایش می یابد.

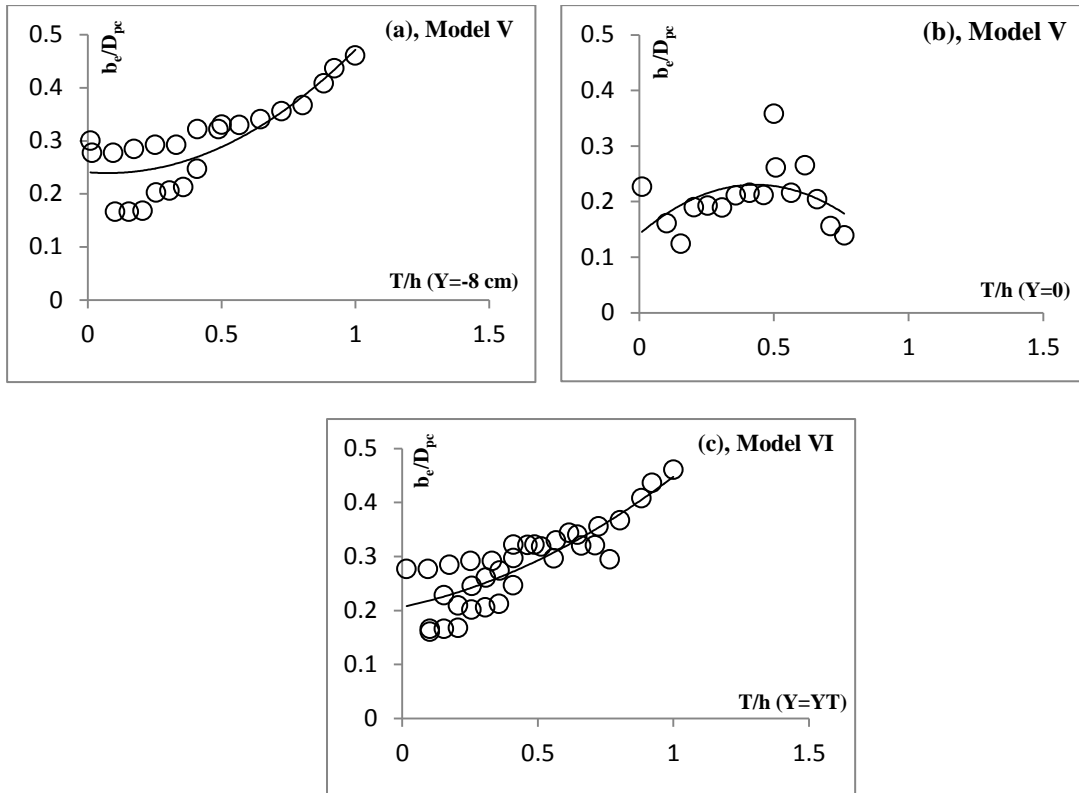
عمق آبخستگی بر حسب گسترش بالادست شمع های ردیف اول در شکل ۴ رسم شده است. در این حالت با افزایش گسترش بالادست شمع های ردیف اول، عمق آبخستگی کاهش می یابد. در این حالت فرض بر این است که با افزایش گسترش بالادست شمع های ردیف اول، قدرت گردابه های نعل اسبی و ورتکس های رو به پایین در اطراف پایه مرکب کاهش یافته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

تغییرات عمق آبخستگی در برابر ضخامت سرشمع T در شکل ۵ آورده شده است. در شکل ۵(a)، عمق آبخستگی در برابر ضخامت سرشمع برای حالتی که سرشمع از 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 al. 1998) را تایید می کند. در این حالت ضخامت سرشمع از ۲ سانتیمتر تا ۸ سانتیمتر تغییر می کند. با افزایش ضخامت سرشمع، عمق آبخستگی هم افزایش می یابد. در شکل ۵(b) عمق آبخستگی بر حسب ضخامت سرشمع برای سرشمع مدفون ( $Y = 0.00$ ) آورده شده است. در این حالت ضخامت سرشمع از ۲ سانتیمتر تا ۱۵ سانتیمتر متغیر است. همانطور که از شکل ۵(b) بر می آید، با افزایش ضخامت سرشمع از ۲ سانتیمتر تا ۸ سانتیمتر عمق آبخستگی هم افزایش می یابد. اما در ادامه با افزایش ضخامت سرشمع از ۹ سانتیمتر تا ۱۵ سانتیمتر، عمق آبخستگی کاهش می یابد. در این حالت 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 آبخستگی می شود.



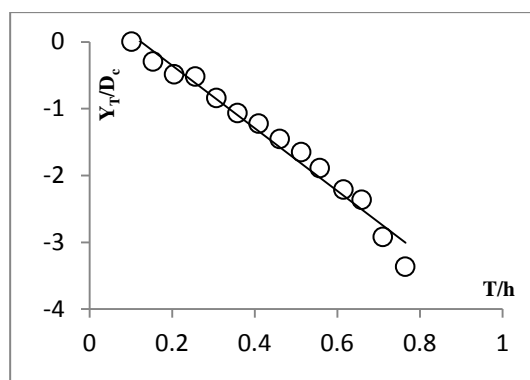
شکل ۴- عمق آبخستگی در برابر گسترش بالادست شمع های ردیف اول

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،  $Y_T$  انجام شد. در این حالت تغییرات عمق آبخستگی در برابر ضخامت سرشمع در شکل ۵(c) آورده شده است. کلمن (Coleman 2005) مقدار  $Y_T$  را برابر نصف ضخامت سرشمع پیشنهاد نمود. نتایج نشان می دهد، 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 با افزایش 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 آبخستگی هم کاهش می یابد. تغییرات  $Y_T$  در برابر ضخامت سرشمع در شکل ۶ رسم شده است.



شکل ۵- عمق آبهستگی در برابر ضخامت سرشمع

ارتفاع سرشمع از دیگر عوامل موثر بر عمق آبهستگی می باشد. تغییرات عمق آبهستگی در برابر ارتفاع سرشمع در شکل ۷ رسم شده است. داده های این مطالعه و داده های گزارش شده توسط پارولا و همکاران (Parola et al. 2013)، ملویل و رادکیوی (Melville and Raudkivi 1996) و فرارو و همکاران (Ferraro et al. 2013) در شکل ۷ آورده شده اند. با استفاده از پارامتر مستقل  $Y/D_{pc}$  ملویل و رادکیوی (Melville and Raudkivi 1996) سه ناحیه آبهستگی اطراف پایه مرکب تعریف کردند که ماکزیمم عمق آبهستگی در هر ناحیه را نشان می دهد. ناحیه ۱ به آبهستگی پایه مرکب بدون اثر سرشمع مرتبط است. در این حالت سرشمع زیر حفره آبهستگی قرار می گیرد و حداکثر عمق آبهستگی  $2/4$  برابر عرض ستون خواهد بود. در ناحیه ۲ سرشمع در حفره آبهستگی و زیر بستر اولیه قرار دارد. در ناحیه ۲ عمق آبهستگی کمتر از  $2/4$  برابر عرض ستون است و به نسبت عرض ستون به عرض سرشمع وابسته است. در این حالت با افزایش ارتفاع سرشمع عمق آبهستگی کاهش می یابد. با خروج سرشمع از زیر بستر اولیه عمق آبهستگی متناسب با نسبت عرض ستون به عرض سرشمع افزایش می یابد. برای مقادیر  $D_c/D_{pc} \leq 0.71$  عمق آبهستگی با کاهش  $Y/D_{pc}$  افزایش می یابد. در ناحیه ۳، هنگامیکه سرشمع بالاتر از بستر اولیه قرار دارد، عمق آبهستگی با افزایش ارتفاع سرشمع، افزایش می یابد. نسبت عرض ستون به عرض سرشمع از دیگر پارامترهای موثر بر ماکزیمم عمق آبهستگی است. این تاثیر برای مقادیر مختلف ارتفاع سرشمع قابل توجه است. در مطالعات پیشین شامل مقادیر مختلف  $D_c/D_{pc}$  بوده اند. شکل های (a) و (b) به ترتیب تغییرات عمق آبهستگی در برابر  $D_c/D_{pc}$  برای  $Y > 0$  و  $Y < 0$  نشان می دهند. شکل ۸ بر اساس داده های مطالعه حاضر و داده های گزارش شده



شکل ۶- ارتفاع سرشمع قطع شده در برابر ضخامت سرشمع

توسط پارولا و همکاران (Parola et al. 1996)، ملویل و رادکیوی (Melville and Raudkivi 1996)، لو و همکاران (Lu et al. 2011) و فرارو و همکاران (Ferraro et al. 2013) رسم شده است. در شکل ۸(a) برای سرشمع مدفون، با افزایش  $D_c/D_{pc}$  ماکزیمم عمق آبستگي افزایش می یابد. در این حالت عمق آبستگي بطور قابل ملاحظه ای به مقدار  $D_c/D_{pc}$  وابسته است. می توان گفت اثر  $D_c/D_{pc}$  بر عمق آبستگي بیشتر از سایر پارامترهای هندسی می باشد. علاوه بر این عمق آبستگي داده های آزمایشگاهی پیشین، رفتار یکسانی نسبت به  $D_c/D_{pc}$  دارند. بهترین تابع که بیانگر تغییرات عمق آبستگي نسبت به  $D_c/D_{pc}$  باشد به صورت زیر ارائه می شود:

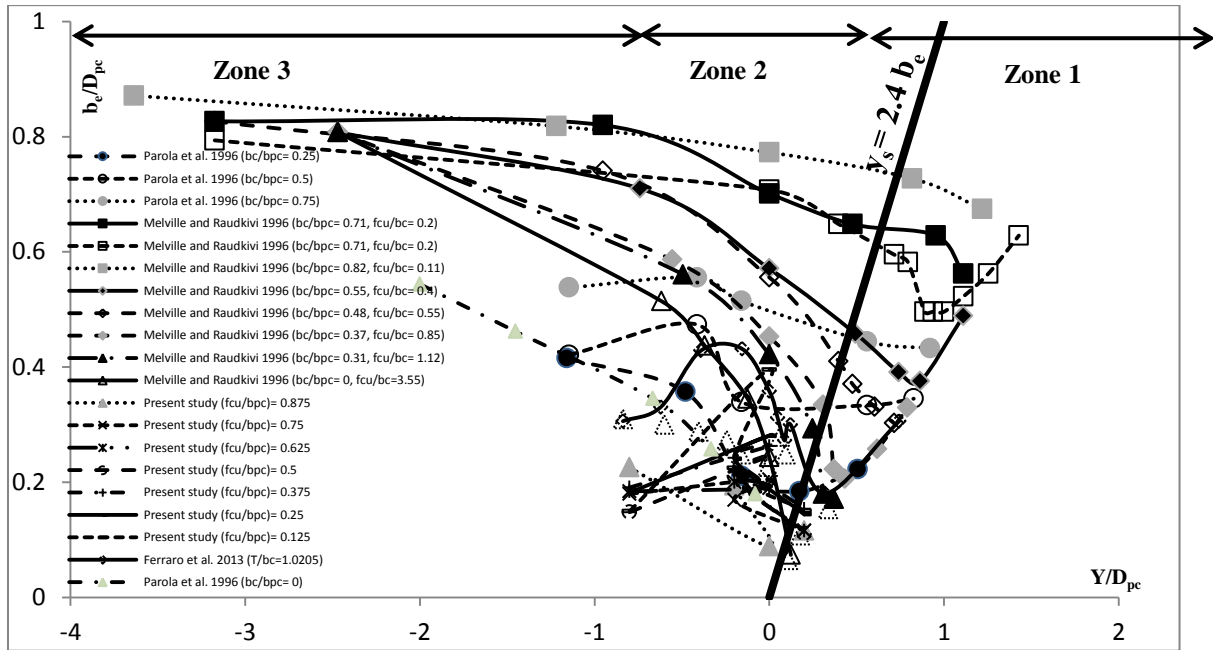
$$\frac{b_e}{D_{pc}} = 0.2486\left(\frac{D_c}{D_{pc}}\right)^2 + 0.6074\left(\frac{D_c}{D_{pc}}\right) - 0.0038 \quad (1)$$

در رابطه بالا  $b_e$  عرض معادل پایه،  $D_c$  و  $D_{pc}$  به ترتیب عرض ستون و عرض سرشمع می باشند. وقتی تمامی المان های پایه پیچیده در معرض جریان قرار می گیرند، تغییرات عمق آبستگي نسبت به  $D_c/D_{pc}$  پیچیده تر می شود (شکل ۸(b))، به طوری که هر یک از داده های پیشین رفتار متفاوتی دارند. در این حالت وقتی  $D_c/D_{pc}$  بین مقادیر ۰٫۲ تا ۰٫۸ نوسان دارد تغییرات عمق آبستگي قابل توجه است. هنگامیکه  $D_c/D_{pc}$  به سمت ۰٫۸ میل می کند رفتار تمام داده های گزارش شده یکسان شده و به سوی خط افقی میل می کند. در تمامی این موارد با افزایش  $D_c/D_{pc}$  ماکزیمم عمق آبستگي کاهش می یابد.

### روش های تخمین عمق آبستگي

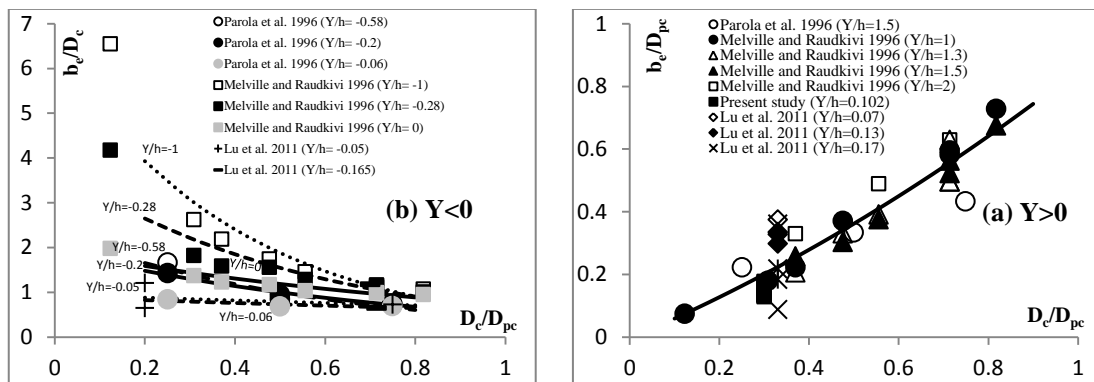
برای ارزیابی روش های تخمین عمق آبستگي اطراف پایه های مرکب از داده های حاصل از تحقیقات آزمایشگاهی لو و همکاران (Lu et al. 2011)، فرارو و همکاران (Ferraro et al. 2013) و داده های این مطالعه استفاده شده است. از روش های تخمین عمق آزمایشگاهی شامل HEC-18 (Richardson and Davis 2001)، شیپارد و گلسر (Sheppard and Glasser 2004)، کلمن (Coleman 2005)، روش های اصلاح شده HEC-18 و کلمن که توسط عطایی آشتیانی و همکاران (Ataie-Ashtiani et al. 2010) انجام شد، استفاده گردید.

شکل ۹(a)، عمق آبستگي اندازه گیری شده را در برابر نتایج حاصل از روش کلمن (Coleman 2005) نشان می دهد. در این شکل خطوط تطابق کامل و خطای  $\pm 20\%$  برای مقایسه بهتر نشان داده شده اند. روش کلمن (Coleman 2005) محافظه کارانه است. در شکل ۹(b)، داده های گزارش شده در برابر نتایج حاصل از روش اصلاح شده کلمن رسم شده اند که نشان دهنده همگرایی خوب بین این داده هاست. در شکل ۹(c)، همین مقایسه با استفاده از روش HEC-18 انجام شده است که قابل قبول می باشد. همین روند با استفاده از روش اصلاح شده HEC-18 در شکل ۹(d) نشان داده شده است. مقایسه شکل ۹(c) و ۹(d) بیانگر این است که روش اصلاح شده

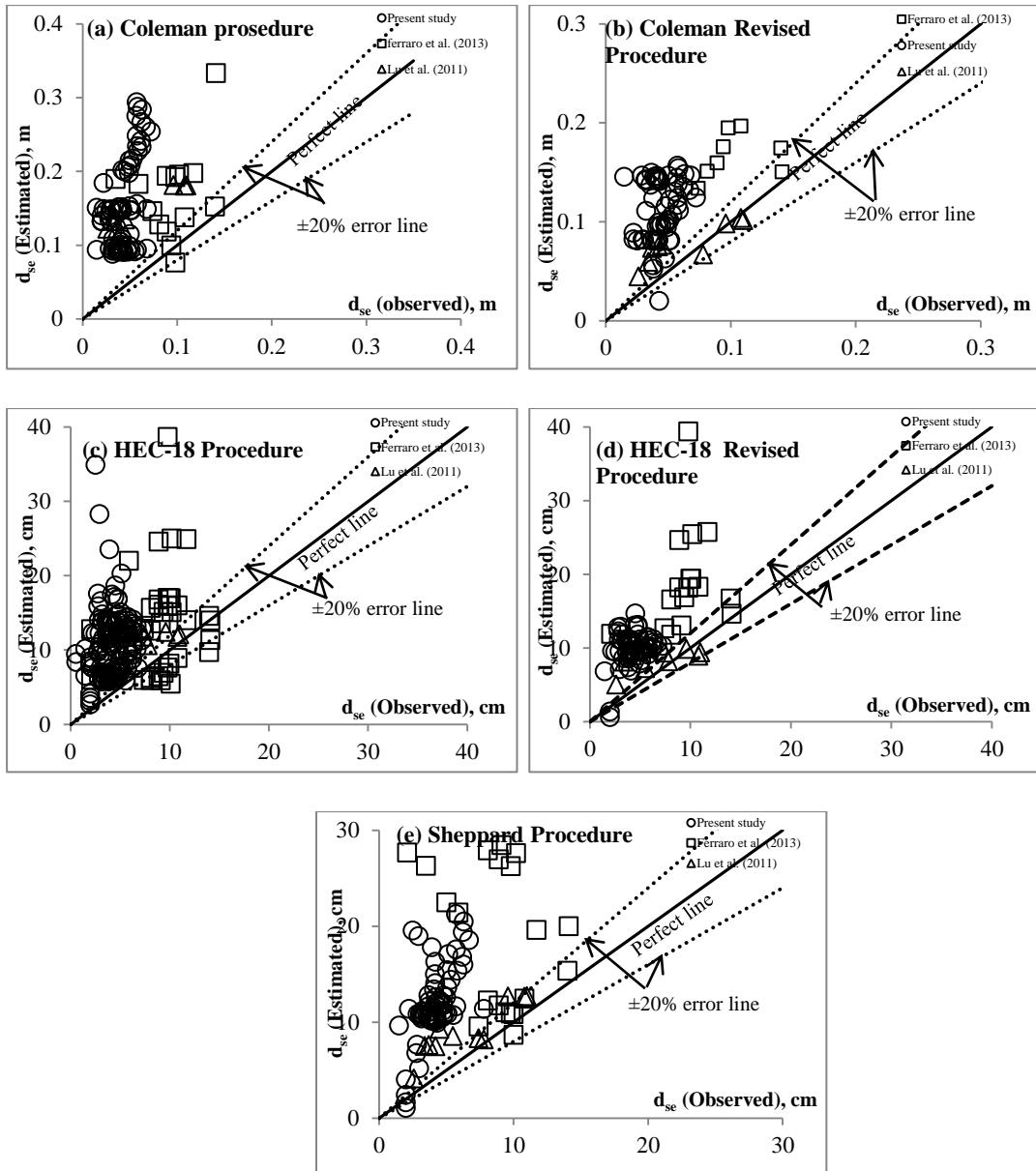


شکل ۷- تغییرات عمق آبستگی نسبت به ارتفاع سرشمع

HEC-18 قابلیت اطمینان بیشتری نسبت به روش HEC-18 دارد. شکل ۹(e)، مقایسه بین داده های آزمایشگاهی با نتایج حاصل از روش شیپارد و گلسر (Sheppard and Glasser 2004) را نشان می دهد. این روش بسیار محافظه کارانه است و نتایج حاصل از این روش چندان قابل قبول نیستند و اختلاف زیادی با داده های اندازه گیری شده دارند. در مجموع روش های کلمن (Coleman 2005) و شیپارد و گلسر (Sheppard and Glasser 2004) چندان مناسب برای تخمین عمق آبستگی اطراف پایه های مرکب نمی باشند. دقت روش HEC-18 اصلاح شده نسبت به روش HEC-18 خیلی بهتر است. دقت روش های کلمن (Coleman 2005) و روش کلمن اصلاح شده به هم نزدیک است. دقت عمل این دو روش بسیار بیشتر از سایر روش هاست و داده های بیشتری در محدوده خطوط خطای  $\pm 20\%$  قرار می گیرند.



شکل ۸- تغییرات عمق آبستگی در برابر نسبت عرض ستون به عرض سرشمع



شکل ۹- تغییرات عمق آبستگی بر اساس روش های مختلف

## 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 آبستگی یاد می شود. در این مطالعه اثر پارامترهای هندسی بر عمق آبستگی پایه مرکب با مدل آزمایشگاهی بررسی گردید. این پارامترها شامل گسترش بالادست 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 آبستگی کاهش می یابد. در حالیکه با افزایش تعداد شمع های در راستای جریان و ضخامت سرشمع عمق آبستگی افزایش می یابد. در همین حال روش های موجود برای تخمین عمق آبستگی 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 (روش اصلاح شده کلمن و اصلاح شده HEC-18) با ارائه ضرایب تصحیحی بر مبنای داده های پیشین موفق به ارائه تخمین بهتری برای عمق آبخستگی اطراف پایه های مرکب شده است.

## مراجع

- 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., Tafarajnoruz, 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.
- 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 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.
- Raudkivi, A. J., and Ettema, R. (1983). "Clear water scour at cylindrical piers." *J. Hydraul. Eng.*, **109**(3), 338-350.
- 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.