

# آبشستگی موضعی پیرامون پایه پل استوانه‌ای با دو دانه‌بندی مصالح بستر

نرگس رئیسی<sup>۱\*</sup> و مهدی قمشی<sup>۲</sup>

<sup>۱\*</sup> - دانشجوی کارشناسی ارشد سازه‌های آبی دانشکده مهندسی علوم آب، دانشگاه شهید چمران اهواز. n\_raeisi123@yahoo

<sup>۲</sup> - استاد دانشکده مهندسی علوم آب، دانشگاه شهید چمران اهواز

تاریخ پذیرش: ۹۳/۲/۲۹

تاریخ دریافت: ۹۲/۱۱/۲۷

## چکیده

آبشستگی موضعی در اطراف پایه‌های پل بر اثر برخورد جریان با پایه و جدایی جریان از آن ایجاد می‌گردد. ابعاد حفره آبشستگی ایجاد شده در اطراف پایه پل به خصوصیات هیدرولیکی جریان، خصوصیات سیال، هندسه پایه و مشخصات مواد بستر بستگی دارد. عمده آزمایش‌هایی که در زمینه آبشستگی اطراف پایه‌های پل در آزمایشگاه انجام می‌گیرد، از یک دانه‌بندی رسوب استفاده می‌شود. از این رو، تحقیق حاضر، با هدف بررسی آبشستگی موضعی اطراف پایه پل‌های استوانه‌ای به قطرهای ۱۰، ۲۰ و ۴۰ میلی‌متر، در کانال آزمایشگاهی و شرایط آب زلال در سرعت‌های نسبی ۰/۹۵، ۰/۸۶ و ۰/۷۶ با دو دانه‌بندی یکنواخت رسوب بستر به اندازه متوسط ۰/۵ و ۰/۷ میلی‌متر مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که در شرایط هیدرولیکی ثابت برای تمامی قطر پایه‌ها، با کاهش قطر دانه‌بندی رسوب بستر، زمان رسیدن به حداکثر میزان عمق آبشستگی افزایش می‌یابد. همچنین با افزایش اندازه متوسط مصالح رسوب بستر از ۰/۵ به ۰/۷ میلی‌متر، بر روی پایه با قطر ۴۰ میلی‌متر با سرعت نسبی ۰/۹۵ به میزان ۱/۲ برابر و برای پایه با قطر ۱۰ میلی‌متر با سرعت نسبی ۰/۷۶ به میزان ۴ برابر از عمق حفره آبشستگی کاسته می‌شود.

**کلید واژه‌ها:** آبشستگی موضعی، آب زلال، پایه پل استوانه‌ای، حفره‌ی آبشستگی.

## Local Scour Around The Cylindrical Bridge Pier With Two Sizes of Bed Material

N. Raeisi<sup>\*1</sup> and M. Ghomeshi<sup>2</sup>

1\* - M.Sc. Student, Faculty of Water Science. Engineering., Shahid Chamran University., ahwaz, Iran.

2- Prof., Faculty of Water Science. Engineering., Shahid Chamran University., ahwaz, Iran.

Received: 16 February 2014

Accepted: 19 May 2014

## Abstract

Local scour around the bridge piers results from the flow impact with bridge piers and its streamline separation. The scour hole around the bridge piers depend on the hydraulic characteristics of the flow, the specifications of the fluid, the pier's shape and the size of the bed material. In most experimental study on scour around the bridge piers only one size of bed material is used. In this study the local scour around the cylindrical bridge piers with diameters of 10, 20 and 40 mm are measured and analyzed in a laboratory flume. The flow condition was clear water with relative velocities of 0.95, 0.86 and 0.76. Two uniform bed materials with mean diameters equal to 0.5 and 0.7 mm are used. The results indicated that in the constant hydraulic conditions for all piers diameters, the equilibrium time for maximum depth scour increases as the grain diameter of bed material increases. Also as the bed material increases from 0.5 mm to 0.7 mm, the depth of scour hole decreases when the diameter of pier was 40 mm and the relative velocity was 0.95 and also when the pier diameter was 10 mm and the relative velocity was 0.76. The amount of scour depths decreases for above mentioned piers were equal to 1.2 times and 4 times respectively.

**Keywords:** Scour hole, Clear water, Cylindrical pier, Local scour.

## مقدمه

آبشستگی پدیده‌ای است که بر اثر اندرکنش شرایط جریان و حرکت مصالح بستر در کناره رودخانه‌ها و آبراهه‌ها، در اثر عبور جریان صورت می‌گیرد. عمق ناشی از فرسایش بستر نسبت به بستر اولیه را عمق آبشستگی می‌نامند (شفاعی بجستان، ۱۳۹۲). پل‌ها از جمله مهمترین و پرکاربردترین سازه‌های رودخانه‌ای هستند که از دیرباز مورد استفاده قرار می‌گرفتند و همه ساله همراه با بروز سیلاب‌هایی در هر رودخانه، تعداد کثیری از این پل‌ها آن هم درست زمانی که بیشترین نیاز به آن‌ها وجود دارد تخریب می‌گردند. یکی از مهمترین و مؤثرترین عوامل این تخریب‌ها آبشستگی اطراف پایه‌های پل ناشی از جریان رودخانه می‌باشد، به طوری که حدود ۶۰ درصد از تخریب پل‌ها را می‌توان به آبشستگی یا عوامل هیدرولیکی دیگر نسبت داد (نورزاد و همکاران، ۱۳۸۰). لذا برای طراحی پایه‌های پل با ضریب اطمینان بالا و به صورت اقتصادی نیاز به برآورد حداکثر مقدار آبشستگی اطراف پایه‌ها می‌باشد. از عوامل مهم ایجاد آبشستگی در پایه پل‌ها می‌توان به جریان رو به پائین<sup>۱</sup>، گرداب نعل اسبی<sup>۲</sup> در جلو پایه و گرداب برخاستگی<sup>۳</sup> در کناره‌های پایه اشاره نمود و عملکرد آن‌ها بدین شیوه است که، جریان پس از برخورد به دماغه، به دلیل وجود گرادیان فشار در جهت قائم، به سمت پائین منحرف می‌شود تا از فشار هیدرودینامیک بکاهد و پس از برخورد به کف کانال، یک سیستم جریان چرخشی در مقابل پایه شکل می‌گیرد. گردابه‌های تولید شده دارای محور چرخشی در راستای جریان بوده و در پشت پایه به هم می‌رسند، این گردابه‌ها به گرداب نعل اسبی معروفند. از سوی دیگر وجود پایه در مقابل جریان باعث ایجاد لایه مرزی بر روی جداره آن می‌شود و بر روی پایه به سمت پائین دست به علت بازشدگی جریان و ایجاد گرادیان فشار معکوس پدیده جدایی در لایه مرزی شکل گرفته، که این گردابه‌ها دارای محور چرخش قائم بوده و به گرداب برخاستگی معروفند (رادکیوی<sup>۴</sup>، ۱۹۸۶). بر این اساس، پدیده آبشستگی در اطراف پایه بسیار پیچیده بوده و از آنجا که عوامل زیادی در شکل‌گیری این پدیده مؤثر هستند، مدل سازی عددی آن بسیار دشوار می‌باشد. از این رو، در حال حاضر عموماً بررسی این پدیده در آزمایشگاه و با استفاده از مدل‌های آزمایشگاهی کوچک مقیاس انجام می‌شود. با توجه به قدمت آبشستگی اطراف پایه پل، محققین زیادی در این زمینه کار کرده‌اند و مطالعه‌های بسیاری بر روی آبشستگی در اطراف پایه‌های پل در آزمایشگاه انجام گرفته است و دانشمندان مختلف با استفاده از نتایج این تحقیق‌ها روابطی را برای تعیین حداکثر عمق حفره آبشستگی ارائه نمودند، که اکثر این رابطه‌ها با استفاده از یک دانه‌بندی رسوب بدست آمده است، به نقل از ترابی (۱۳۹۱) می‌توان آزمایش‌های اینگلیس و پونا (۱۹۴۹)، بتا (۱۹۶۰)،

هانکو (۱۹۷۱)، گیل (۱۹۷۳)، کادار (۱۹۸۱) و لی (۲۰۰۹) را نام برد، و دانشمندی چون احمد (۱۹۵۳) و برادلی (۱۹۵۸) بر اساس مشاهده‌های خود، حداکثر عمق آبشستگی را مستقل از دانه‌بندی می‌دانستند. در ادامه به چند نمونه از کارهای صورت پذیرفته توسط محقق‌های مختلف، که از چند نمونه دانه‌بندی رسوب در آزمایش‌های خود استفاده کرده‌اند، به طور مختصر اشاره می‌گردد: ش<sup>۵</sup> (۱۹۶۹) بر اساس داده‌های به دست آمده از آزمایش‌های خود، که اندازه قطر و عرض پایه‌های پل بین ۵۰ تا ۱۵۲ میلی‌متر و اندازه مواد بستر بین ۰/۱۷ تا ۰/۶۸ میلی‌متر متغیر بود، حداکثر عمق آبشستگی در شرایط آب زلال را بررسی نمود و در مطالعه‌های خود به این نتیجه رسید که تأثیر عرض و قطر پایه در میزان آبشستگی خیلی بیشتر از فاصله بین پایه‌ها است و ذرات هر چه به سمت ریزتر شدن می‌روند عمق آبشستگی را محسوس‌تر نشان می‌دهند و فرمولی را ارائه کرد که فقط برای ذرات با قطر کمتر از ۰/۶۸ میلی‌متر مناسب می‌باشد و در هنگام استفاده از این فرمول برای شرایط بستر زنده باید بسیار محتاط بود. تیت<sup>۶</sup> و همکاران<sup>۷</sup> (۱۹۸۹) یک سری آزمایش بر روی مدل پل هردینگ با مقیاس (۱:۶۵)، به منظور تعیین تأثیر عمق جریان بالادست و قطر ذرات ماسه بر روی عمق آبشستگی اطراف پایه‌های پل انجام دادند. بستر کانال با ماسه به قطر ۰/۱۶، ۰/۲۴، ۰/۳۲، ۰/۴۸ و ۰/۶۸ میلی‌متر در مراحل مختلف آزمایش‌ها پر شد. نتایجی که به آن‌ها رسیدند به شرح زیر است: حداکثر عمق آبشستگی در نوک پایه اتفاق می‌افتد و عمق آبشستگی در اطراف پایه‌ها با افزایش قطر ذرات رسوبی بستر در حدود ۵ تا ۱۵ درصد کاهش می‌یابد، عمق جریان در بالادست، تأثیر مستقیم روی عمق آبشستگی در نوک پایه دارد، نسبت عمق آبشستگی به عمق جریان با سرعت جریان رابطه مستقیمی دارد. برای پیش‌بینی عمق آبشستگی به منظور طراحی صحیح و مناسب، مطالعه‌های سیستماتیکی توسط لارسن (۱۹۹۶) در آزمایشگاه آیوا<sup>۸</sup> (آمریکا) صورت گرفته است. آزمایش‌های او بر روی ذرات ۰/۴۶ تا ۲/۲ میلی‌متر صورت پذیرفت و نشان داد که تأثیر اندازه ذرات حائز اهمیت است، همچنین مشخص گردید که شکل پایه و جهت پایه نسبت به جریان، روی عمق آبشستگی موضعی تأثیر می‌گذارد و عمق جریان در بالادست پایه، اثر مستقیم بر روی آبشستگی دارد. سعیدی نژاد و همکاران (۱۳۹۱) به بررسی اثر دانه‌بندی مصالح یکنواخت بر حداکثر عمق آبشستگی اطراف پایه پل با مقطع دایره‌ای شکل پرداختند و نشان دادند که مصالح یکنواخت و قطر پایه‌های پل مؤثر بر میزان عمق آبشستگی می‌باشند. لسی و همکاران<sup>۹</sup> (۲۰۰۱) اطلاعات آبشستگی اطراف پایه‌های پل را از ۱۳ منطقه در هندوستان جمع‌آوری کردند. میزان دبی عبوری از این پل‌ها بین ۲۹۰۶۳ تا ۲۲۵۰۰۰ فوت مکعب بر ثانیه بوده و قطر

5- Shen  
6- Teeter *et.al.*  
7- Iowa  
8- Lacy *et.al.*

1- Down flow  
2- Horse show vortex  
3- Wake vortex  
4- Raudkivi

## مواد و روش‌ها

## تحلیل ابعادی

پارامترهای متعددی که در پدیده آبهستگی مؤثر می‌باشند، مشخص نموده و با تجزیه و تحلیل ابعادی رابطه کلی شامل پارامترهای بدون بعد استخراج گردید. پارامترهای مؤثر در رابطه (۱) ارائه شده‌اند:

$$f(d_s, y, D, D_{50}, V, g, t, C_D, \mathcal{G}, \rho, \rho_s) = 0 \quad (1)$$

که در آن  $d_s$ : عمق آبهستگی،  $y$ : عمق جریان،  $D$ : قطر پایه پل،  $D_{50}$ : قطر متوسط ذرات رسوبی،  $V$ : سرعت جریان،  $g$ : شتاب ثقل،  $t$ : زمان،  $C_D$ : ضریب شکل پایه،  $\mathcal{G}$ : لزوجت سینماتیکی سیال،  $\rho$ : جرم واحد حجم آب و  $\rho_s$ : جرم واحد حجم رسوب می‌باشند. با تجزیه و تحلیل ابعادی و با استفاده از روش پای باکینگهام رابطه (۲) به دست می‌آید:

$$d_s/D = f(R_e, F_r, D_{50}/D, G_s) \quad (2)$$

لازم به توضیح است که عدد رینالدز  $R_e = \frac{\rho V y}{\mu}$  از ترکیب

$$\text{این دو عدد بدون بعد } \pi_1 = \frac{v}{g^2 y^2} \text{ و } \pi_2 = \frac{\rho}{g^2 y^2}$$

دست آمده است و همان طور که مشاهده می‌شود مشخصه طولی در عدد رینالدز، عمق جریان است. با توجه به اینکه عدد رینالدز در محدوده انجام این آزمایش‌ها بیشتر از ۲۰۰۰ می‌باشد، بنابراین جریان در محدوده آشفته بوده و می‌توان از عدد رینالدز صرف نظر کرد (چاو، ۱۹۵۹).

زمان تمامی آزمایش‌ها (برای به دست آوردن زمان تعادل شرایط بستر و پایان هر آزمایش، تغییرات بدون بعد عمق آبهستگی به قطر پایه در محدوده هر کدام از پایه‌ها نسبت به زمان ثبت شد) ثابت در نظر گرفته شد، به همین دلیل پارامتر زمان از آزمایش‌ها حذف گردید. همچنین طبق بررسی‌های انجام شده، گرداب نعل اسبی که نقش مؤثری در فرسایش اطراف پایه را بر عهده دارد، در پایه‌های دماغه پهن نظیر استوانه‌ای تشکیل می‌شود (خداشناس و همکاران، ۱۳۸۸). از این رو، کلیه پایه‌های پل به شکل استوانه‌ای و از جنس چوب ساخته شده بودند، به همین دلیل مقدار  $C_D$  نیز ثابت می‌باشد و با توجه به ثابت بودن چگالی نسبی ذرات رسوبی ( $G_s = \rho_s/\rho$ ) در تمامی آزمایش‌ها، رابطه بدون بعد به صورت رابطه (۳) قابل ارائه می‌باشد:

ذرات بستر بین ۰/۱۷ تا ۰/۳۹ میلی‌متر بوده است. عمق جریان که در آن نواحی آبهستگی رخ داده است بین ۲۵ تا ۱۱۵ فوت بوده است. همچنین بر اساس مطالعه‌های صورت پذیرفته، تأثیر اندازه ذرات را قابل ملاحظه می‌دانند. ونگ<sup>۱</sup> (۲۰۰۸) به این نتیجه رسید که حداکثر عمق آبهستگی با کاهش اندازه مصالح بستر در مقادیر ثابت  $V/V_c$  نزدیک به واحد افزایش می‌یابد. کایا<sup>۲</sup> (۲۰۰۹) به بررسی آبهستگی در پایه پل و تأثیر سرعت و قطر متوسط دانه‌بندی بستر پرداخت و مطالعه‌های خود را با شبکه مصنوعی قابل پیش‌بینی دانست. پاسوک و استینگر<sup>۳</sup> (۲۰۱۰) در شرایط آب زلال با استفاده از سه نمونه رسوب به قطرهای ۰/۲، ۰/۴۶ و ۰/۸۶ میلی‌متر به بررسی حرکت ذرات رسوب در اطراف پایه پل پرداختند و به این نتیجه رسیدند که در شرایط یکنواخت حرکت دانه‌ها به شدت جریان گردابه اطراف پایه بستگی دارد. لی و استورم<sup>۴</sup> (۲۰۱۲) بررسی‌های گسترده‌ای روی اندازه قطر مصالح بر حداکثر عمق آبهستگی پایه پل انجام دادند. آن‌ها آزمایش‌هایی در قطر مصالح مختلف ۰/۵۳، ۱/۱، ۳/۲ میلی‌متر و پایه پل‌های به قطرهای ۲۷، ۳۶ و ۴۵ سانتی‌متر انجام دادند و نتیجه گرفتند که حداکثر عمق آبهستگی به نسبت قطر پایه پل و اندازه مصالح بستر وابسته می‌باشد و نشان دادند که با افزایش  $D/D_{50} < 25$  مقدار  $d_s/D$  افزایش می‌یابد و در شرایط کمتر از ۲۵ این نسبت نیز کاهش می‌یابد. نتایج آزمایش‌های گراد<sup>۵</sup> (۲۰۱۳) مؤید آن است که اندازه قطر مصالح بستر بر میزان حداکثر عمق آبهستگی در جریان آب زلال مؤثر و در جریان با حرکت رسوب بی‌تأثیر است و عنوان کرد که فرسایش مصالح ریزتر بیش‌تر می‌باشد. تحقیق حاضر، تأثیر دو دانه‌بندی یکنواخت رسوب بستر بر آبهستگی موضعی در اطراف پایه پل‌های استوانه‌ای با استفاده از مدل آزمایشگاهی را مورد توجه قرار داده است. همان طور که ذکر شد، بین محققین مختلف در مورد اثر و اندازه مصالح رسوبی بر آبهستگی اختلاف نظر وجود دارد. از این رو، آزمایش‌ها با دو اندازه متفاوت، برای مصالح بستر صورت پذیرفت. عمق‌های آبهستگی اطراف پایه‌هایی به قطرهای ۱۰، ۲۰ و ۴۰ میلی‌متر در سه دبی جریان مختلف، متناظر با اعداد فرود بالادست (در شرایط آب زلال) برای هر یک از دانه‌بندی‌های مصالح بستر اندازه‌گیری شد، و نتایج حاصل را بر مبنای تجزیه و تحلیل ابعادی صورت پذیرفته به روش پای باکینگهام به کمیت‌های بدون بعد تبدیل نموده و رابطه نهایی مربوط، با استفاده از نرم‌افزار برازش غیرخطی استخراج و با روابط ارائه شده توسط تنی چند از محققین مقایسه گردید.

- 1- Wong
- 2- Kaya
- 3- Paisok & Stinger
- 4- Lee & Sturm
- 5- Grade

رئسی و قمشی: آبخستگی موضعی پیرامون پایه پل استوانه‌ای...

$$d_s/D = f(F_r, D_{50}/D) \quad (۳)$$

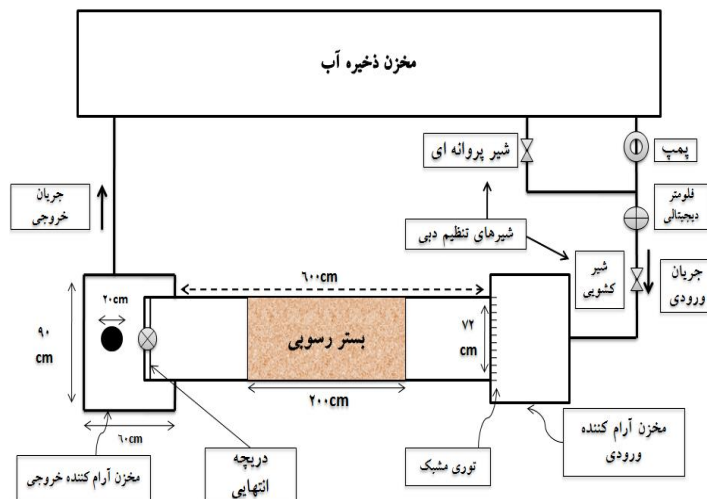
۷۲ و ۶۰ سانتی‌متر بود. شیب کف کانال آزمایشگاهی قابل تغییر بوده و برای انجام آزمایش‌ها روی شیب نزدیک به صفر تنظیم شد. کانال در قسمت ابتدایی و انتهایی دارای مخزن آرام‌کننده است. برای اندازه‌گیری دبی از یک فلومتر نصب شده در ابتدای کانال استفاده شد. آب مورد نیاز به وسیله‌ی یک پمپ با حداکثر دبی ۲۵ لیتر بر ثانیه از مخزن اصلی به کانال منتقل می‌شد و به منظور حذف تلاطم جریان ورودی از یک توری مشبک بلافاصله پس از مخزن آرام‌کننده ورودی استفاده شده است. یک دریچه کشویی به منظور کنترل و تنظیم سطح آب در انتهای پائین دست این کانال طراحی گردیده است که از طریق آن امکان برگشت آب به مخزن و زهکشی یا چرخش در سیستم وجود دارد. در شکل (۱) نمایی از کانال و تجهیزات آزمایشگاهی نشان داده شده است.

نکته حائز اهمیت اینکه مطابق رابطه (۴) می‌توان  $F_r$  و  $D_{50}/D$  را با هم ترکیب نمود و از عدد فرود ذره  $(Fr_g = V/\sqrt{g(G_s-1)D_{50}})$  برای استخراج رابطه مورد نظر در تحقیق حاضر استفاده کرد:

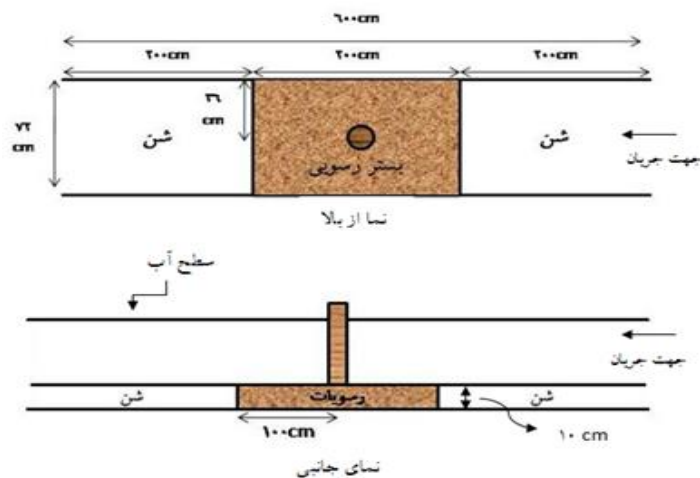
$$d_s/D = f(Fr_g) \quad (۴)$$

#### امکانات آزمایشگاه و روش انجام آزمایش

به منظور انجام آزمایش‌های آبخستگی، از یک کانال مستطیلی با دیواره شیشه‌ای در آزمایشگاه مدل‌های فیزیکی و هیدرولیکی دانشکده مهندسی علوم آب دانشگاه شهید چمران اهواز استفاده شد. طول کانال ۶ متر، عرض و ارتفاع آن به ترتیب



شکل ۱- پلان کانال و تجهیزات آزمایشگاهی



شکل ۲- جانمایی پایه پل استوانه‌ای در بستر رسوبی کانال آزمایشگاهی

طبق نظر اتما<sup>۶</sup> (۱۹۸۰) در جریان‌های کم عمق، گرداب موج کمانی در سطح آب تولید می‌گردد که علت آن گردش در خلاف جهت جریان است که با جریان تداخل یافته و موجب کاهش جریان رو به پائین می‌گردد و کاهش عمق آبستنگی را در پی دارد. از این نقطه نظر، باید انتخاب عمق جریان به گونه‌ای صورت پذیرد که اثر این پدیده بر عمق آبستنگی از بین برود. بررسی‌ها حاکی از این است که عمق جریان باید بیش از سه برابر قطر پایه باشد.

ملویل و چیو<sup>۷</sup> (۱۹۹۹) عنوان کردند برای تعیین عمق جریان، حداکثر تنش برشی باید در شرایط آب زلال تعیین گردد. زمانی که سرعت جریان در محدوده  $V_c < V < 0.3V_c$  باشد آبستنگی در شرایط آب زلال رخ می‌دهد و اگر سرعت متوسط جریان ( $V$ ) بیش‌تر از سرعت آستانه حرکت ( $V_c$ ) باشد آبستنگی در شرایط بستر زنده صورت می‌پذیرد.

در آزمایش‌های این تحقیق، آبستنگی در شرایط آب زلال انجام پذیرفته است. با توجه به موارد فوق، برای تعیین سرعت آستانه حرکت ذرات رسوبی، در کانال آزمایشگاهی بر روی بستر رسوبی و بدون حضور پایه، عمق‌های متفاوتی با تنظیم حداکثر دبی، ۲۵ لیتر بر ثانیه اندازه‌گیری شد تا بتوان حرکت یا عدم حرکت رسوب‌های بستر را با چشم مشاهده نمود. بدین‌گونه که سرعت آستانه حرکت ذرات متأثر از عمق جریان می‌باشد، لذا در همین دبی با کاهش تدریجی عمق جریان  $V_c$  تعیین گردید. پس از اندازه‌گیری‌های صورت پذیرفته در نهایت، مقدار متوسط جریان برای آستانه حرکت رسوب‌های ۰/۵ میلی‌متری و ۰/۷ میلی‌متری به ترتیب ۰/۲۱ و ۰/۲۳ متر بر ثانیه تعیین گردید. بر این اساس عمق ثابت، به ترتیب ۱۶ و ۱۵ سانتی‌متر برای دانه‌های ذکر شده انتخاب شد. جدول (۱) شرایط جریان حاکم بر آزمایش‌ها را نشان می‌دهد.

پدیده آبستنگی در اطراف پایه پل‌ها، فرآیندی است که با گذشت زمان توسعه یافته و در نهایت به تعادل می‌رسد. شناخت این فرآیند و تخمین عمق آبستنگی در طی زمان و به خصوص در زمان رسیدن حفره آبستنگی به حالت تعادل برای طراح پل حائز اهمیت می‌باشد. از این رو، به منظور تعیین زمان مناسب برای انجام آزمایش‌ها، یک آزمایش ۳۰۰ دقیقه‌ای با دبی ۲۵ لیتر بر ثانیه (سرعت نسبی:  $V/V_c = 0.95$ ) انجام گرفت و در طی آزمایش‌های صورت پذیرفته، عمق آبستنگی در جلو هر پایه پل در زمان‌های مشخص اندازه‌گیری می‌شد و زمانی که حداکثر توسعه حفره آبستنگی ایجاد و پس از آن تغییرات حفره آبستنگی نسبت به زمان ناچیز شد، به عنوان زمان انجام آزمایش‌ها تعیین گردید. با توجه به شکل‌های (۳) و (۴) زمان انجام آزمایش‌ها ۱۸۰ دقیقه برای رسوب ۰/۵ میلی‌متر و ۱۲۵ دقیقه برای رسوب ۰/۷ میلی‌متر در نظر گرفته شد.

اولین گام در مراحل انجام آزمایش‌ها تعیین ابعاد مدل و نیز تعیین مقادیر پارامترهای مجاز که بر عمق آبستنگی مؤثرند، می‌باشد. لذا در طرح ابعاد مدل به اثر دیواره‌های کانال بر عمق آبستنگی بایستی توجه شود. طبق معیار رادکیوی و اتما<sup>۱</sup> (۱۹۸۳) برای از بین رفتن تأثیر دیواره‌های کانال بر آبستنگی اطراف پایه بایستی نسبت فاصله محور پایه تا دیواره کانال به قطر پایه بزرگ‌تر از ۶/۲۵ باشد. از این رو، با توجه به ابعاد کانال و نحوه قرارگیری انتخاب شده برای پایه‌ها، قطر پایه‌ها به ترتیب ۱۰، ۲۰ و ۴۰ میلی‌متر انتخاب شدند. براساس تحقیق‌های صورت پذیرفته، در شرایطی که نسبت قطر پایه به میانگین قطر ذرات رسوبی ( $D/D_{50}$ ) بیش از ۵۰ باشد، اندازه ذرات بستر بر عمق آبستنگی بی‌اثر می‌باشند (چیو و ملویل<sup>۲</sup>، ۱۹۸۷). همچنین برای حذف اثر غیریکنواختی رسوب بر کاهش آبستنگی موضعی مطابق پیشنهاد چیو و ملویل (۱۹۸۷) میزان انحراف معیار هندسی ذرات رسوبی

باید از  $\sigma = \sqrt{\frac{D_{84.1}}{D_{15.9}}}$  کمتر باشد که در این رابطه  $d_{84}$  و  $d_{16}$  به ترتیب قطر ذراتی است که ۸۴ و ۱۶ درصد ذرات از آن ریزتر است. نکته حائز اهمیت اینکه، موج<sup>۳</sup> در شکل بستر (ریپل) در رسوب غیرچسبیده با اندازه متوسط ۰/۰۵ تا ۰/۷ میلی‌متر تشکیل می‌شود.

از این رو، طبق نظر بروزرز و رادکیوی<sup>۴</sup> (۱۹۹۱) برای ممانعت از تشکیل ریپل در سرعت‌های نزدیک به آستانه حرکت، باید  $D_{50} \geq 0.7mm$  باشد. اما برای رسوب با  $D_{50} < 0.7mm$ ، ریپل‌ها در سرعت‌های جریان بیش از  $0.6V_c$  تشکیل می‌شوند. برای رفع این مشکل، انحراف معیار هندسی ذرات رسوبی باید در محدوده ۱/۱ تا ۱/۵ باشد. در این محدوده از انحراف معیار، ذرات درشت‌تر سطح بستر را پوشانده و لایه مسلح ایجاد می‌شود، ولی این ذرات به قدر کافی بزرگ نیستند تا حفره آبستنگی را ببوشانند، زیرا شدت آشفتگی جریان در این ناحیه زیاد است. بنابراین، در این حالت آبستنگی در شرایط آب زلال همانند شرایط مربوط به ذراتی که ایجاد ریپل نمی‌کنند رخ می‌دهد (رادکیوی و اتما<sup>۵</sup>، ۱۹۹۹). از این رو با توجه به شرایط ذکرشده، در تحقیق حاضر از دو نمونه رسوب غیرچسبیده استفاده گردید: نمونه اول رسوب مورد استفاده، از ماسه باقی‌مانده بین الک با شماره‌های ۳۰ و ۴۰ در محدوده اندازه ذرات ۰/۵۹ تا ۰/۴۲ میلی‌متر، با انحراف معیار هندسی ۱/۱۸ و نمونه دوم رسوب استفاده شده، از ماسه باقی‌مانده بین الک‌های ۲۰ و ۳۰ در محدوده ذرات ۰/۸۳ تا ۰/۵۹ میلی‌متر و با انحراف معیار هندسی ۱/۲۲ می‌باشند. بستر کانال آزمایشگاهی در بازه‌ای ۲ متری به ضخامت ۱۰ سانتی‌متر از مصالح رسوبی با قطر متوسط ذرات ۰/۵ میلی‌متر و ۰/۷ میلی‌متر پوشانده شد (شکل ۲).

- 1- Raudkivi and Ettema
- 2- Chiwe and Melville
- 3-Fluctuation
- 4-Breusers and Raudkivi
- 5- Raudkivi and Ettema

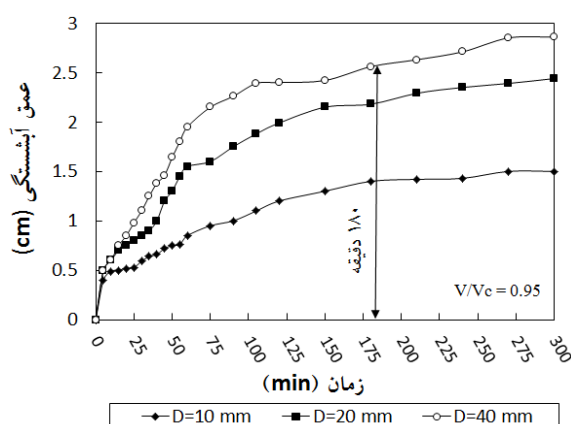
- 6- Ettema
- 7- Melville and Chiew

رئیی و قمشی: آبهستگی موضعی پیرامون پایه پل استوانه‌ای...

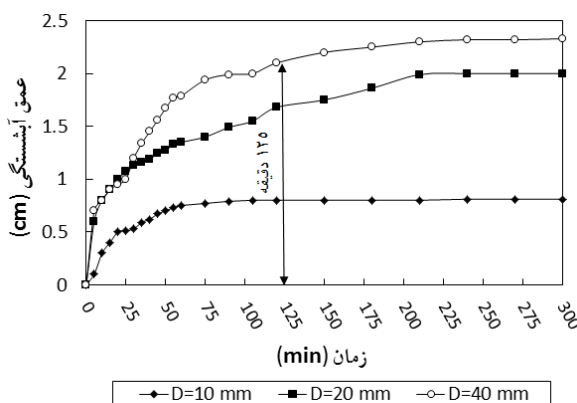
جدول ۱- شرایط هیدرولیکی حاکم بر آزمایش‌ها

اندازه رسوب (میلی‌متر)	$Re$	$Fr_g$	$Fr$	$Q \left( \frac{m^3}{s} \right)$	$y \text{ (m)}$	$B \text{ (m)}$	$v \left( \frac{m}{s} \right)$	$\left( \frac{V}{V_c} \right)^*$
۰/۵	۲۲۰۰۰	۲/۲۲	۰/۱۶	۰/۰۲۵	۰/۱۶	۰/۷۲	۰/۲	۰/۹۵
۰/۷	۱۹۹۵۰	۱/۷۸	۰/۱۵	۰/۰۲۱	۰/۱۵	۰/۷۲	۰/۱۹	۰/۸۶
۰/۷	۱۷۸۵۰	۱/۵۹	۰/۱۴	۰/۰۱۸	۰/۱۵	۰/۷۲	۰/۱۷	۰/۷۶

\*  $V/V_c$  بیانگر سرعت نسبی جریان است.



شکل ۳- منحنی توسعه زمانی حفره آبهستگی (رسوب ۰/۵ میلی‌متر)



شکل ۴- منحنی توسعه زمانی حفره آبهستگی (رسوب ۰/۷ میلی‌متر)

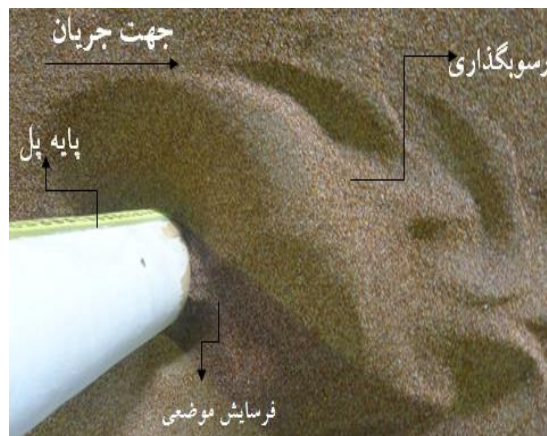
روی دریاچه ریزش کند، دریاچه را به آهستگی گشوده تا اینکه دبی و ارتفاع آب درون کانال در مقدار مورد نظر تنظیم گردد. عمق جریان در کانال با استفاده از خط‌کش نصب شده در جداره کانال با دقت  $\pm 1$  میلی‌متر اندازه‌گیری شد. پس از برقراری جریان در طول مدت زمان آزمایش‌ها، پمپ خاموش می‌شد و پس از گذشت مدت زمان کوتاهی آب موجود در کانال به آرامی زهکشی می‌شد تا توپوگرافی بستر تغییر نکند و در نهایت توپوگرافی بستر در

در شروع هر آزمایش دریاچه کشویی در انتهای مجرای کانال به طور کامل بسته شده و آب به آرامی به درون کانال هدایت شد تا از ایجاد فرسایش اولیه در سطح بستر و ایجاد خطا در آزمایش جلوگیری به عمل آید. پس از بالا آمدن سطح آب، به طوری که در حدود ۱ سانتی‌متر از سطح رسوب‌های بستر را می‌پوشاند، پمپ با دبی حداقل راه اندازی و جریان ورودی با سرعت بسیار کم وارد کانال می‌گردید تا سطح آب همچنان بالا بیاید. پیش از آنکه آب از

مقابل جریان دارد. بر اساس نتایج آزمایشگاهی صورت پذیرفته، چنانچه قدرت جریان بیشتر از شرایط آستانه حرکت گردد، فرم بستر تشکیل خواهد شد. از این رو، لازم است تا ارتفاع آن را برای تخمین عمق آبستنگی در پایه‌های پل مورد نظر قرار داد. به طور تقریبی یک دوم ارتفاع فرم بستر به عمق آبستنگی اضافه می‌شود، تا حداکثر عمق آبستنگی در این محل‌ها بدست آید (شفاعی بجستان، ۱۳۹۲).

اطراف پایه‌ها در یک شبکه  $2 \times 2$  سانتی‌متری به وسیله عمق سنج لیزری با میزان دقت  $\pm 2$  میلی‌متر برداشت می‌گردید. شکل (۵) نمایی از توپوگرافی ایجاد شده در بستر رسوبی پایان آزمایش مربوط به دبی ۲۵ لیتر بر ثانیه با قطر پایه ۴۰ میلی‌متر و اندازه مصالح ۰/۵ میلی‌متر را نشان می‌دهد.

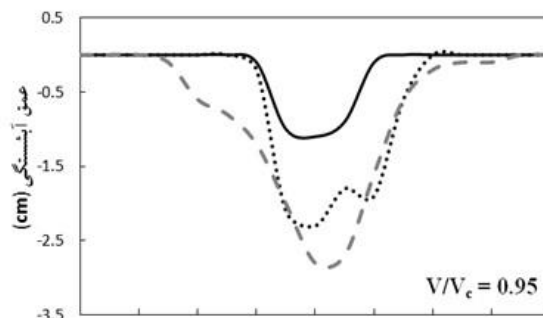
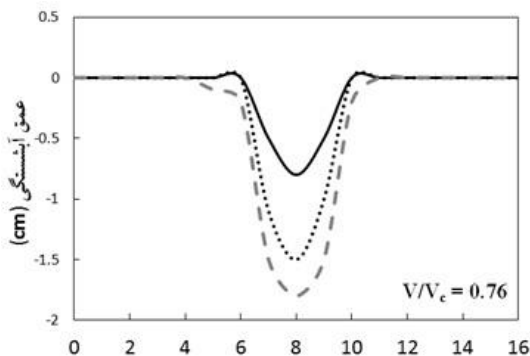
لازم به توضیح است، فرم بستر، به شکل‌های مختلف ناهمواری‌های بستر گفته می‌شود که در اثر حرکت جریان به وجود می‌آید و تأثیر مستقیمی روی زبری بستر و در نتیجه مقاومت در



شکل ۵- نمایی از توپوگرافی ایجاد شده در بستر رسوبی

جدول ۲- نسبت حداکثر عمق حفره آبستنگی بستر با قطر ۰/۵ mm به ۰/۷ mm (در شرایط هیدرولیکی ثابت برای هر پایه)

$V/V_c = 0.95$	$V/V_c = 0.86$	$V/V_c = 0.76$	قطر پایه پل (میلی‌متر)
۱/۵	۳	۴	۱۰
۲/۵	۳/۸	۴	۲۰
۱/۲	۱/۹۲	۲/۲۵	۴۰



شکل ۶- توسعه عرضی حفره آبستنگی پیرامون پایه پل استوانه‌ای بر حسب سانتی‌متر (رسوب ۰/۵ میلی‌متر)

رئیی و قمشی: آبشستگی موضعی پیرامون پایه پل استوانه‌ای...

## نتایج و بحث

در کلیه آزمایش‌ها پس از تنظیم دبی و عمق جریان، بلافاصله در اطراف پایه گردابه‌ها تشکیل و آبشستگی با سرعت بسیار بالا آغاز می‌شد. با شکل‌گیری حفره آبشستگی رسوب‌های برخاسته از حفره به سمت پائین دست منتقل شده و پس از مدتی از شروع آزمایش، رسوب‌های برخاسته از حفره آبشستگی به محدوده رسیدند که تأثیر پایه بر آن محدوده، کاهش یافته و اثر گردابه‌های نعل اسبی پشت پایه ناچیز می‌شد. پس از توسعه حفره آبشستگی و عمیق شدن آن امکان جابجایی ذرات رسوب توسط گردابه‌ها کاهش می‌یابد و رسوب‌ها تنها درون حفره آبشستگی حرکت کرده و دیگر به پائین دست انتقال نمی‌یابند. از این رو، در این مرحله ۱۸ آزمایش، برای دو نمونه رسوب ۰/۵ و ۰/۷ میلی‌متر در سرعت‌های نسبی  $(V/V_c)$  ۰/۹۵، ۰/۸۶ و ۰/۷۶ در سه قطر پایه پل انجام گرفت. نسبت عمق حداکثر حفره آبشستگی در آزمایش‌های تحقیق حاضر با استفاده از رابطه (۵) محاسبه و در جدول ۲ آورده شده است. در این رابطه  $d_1$ : حداکثر عمق آبشستگی هر یک از پایه‌های پل در رسوب ۰/۵ میلی‌متر و  $d_2$ : حداکثر عمق آبشستگی همان پایه پل در رسوب ۰/۷ میلی‌متر (در شرایط هیدرولیکی ثابت) می‌باشد.

$$R = d_1/d_2 \quad (2)$$

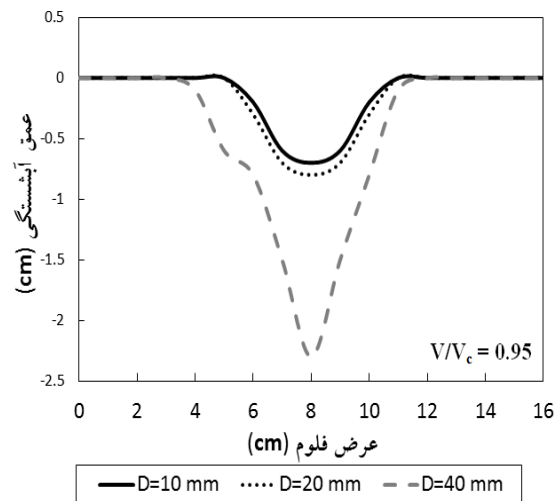
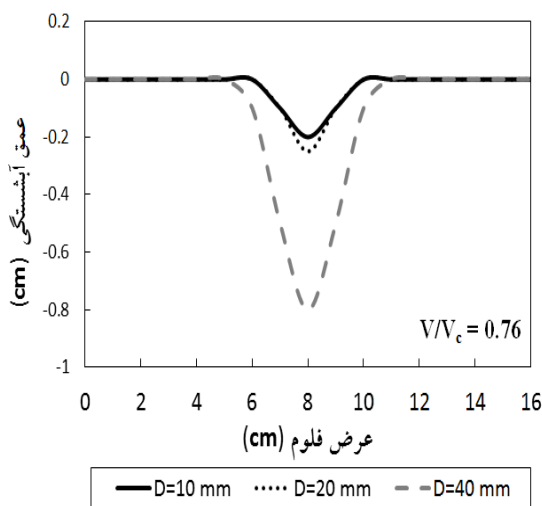
در ادامه با بهره‌گیری از تجزیه و تحلیل ابعادی صورت پذیرفته، نتایج مربوط به جدول (۲) در دو بخش مورد بررسی قرار می‌گیرند:

## تأثیر $D_{50}/D$ بر $d_s/D$ در توسعه آبشستگی

### اطراف پایه پل استوانه‌ای

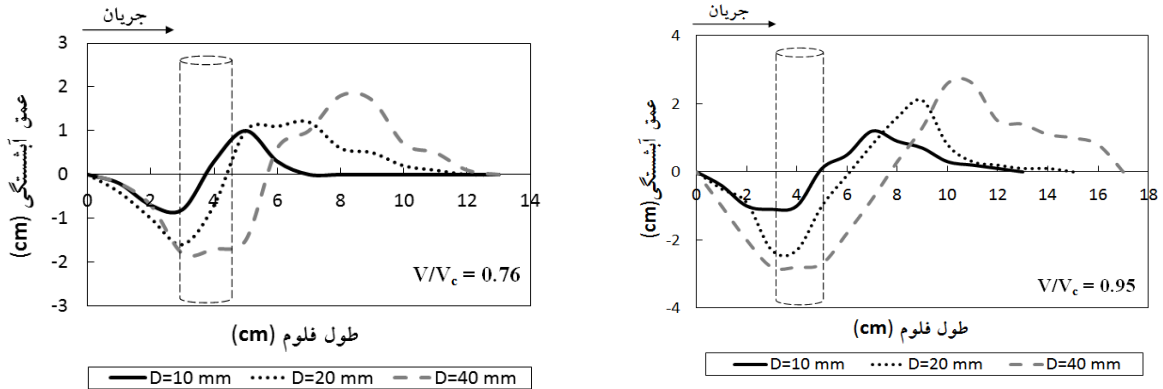
نصب پایه‌های پل در دو نمونه رسوب ۰/۵ و ۰/۷ بر توپوگرافی بستر و هم بر میزان آبشستگی تأثیر قابل ملاحظه‌ای داشت. شکل‌های (۶) و (۷) توسعه عرضی حفره آبشستگی برای پایه‌های پل در دو نمونه رسوب مذکور را، در سرعت‌های نسبی ۰/۹۵ و ۰/۷۶ نشان می‌دهند. به طور نمونه پایه ۱۰ میلی‌متر در  $V/V_c = 0.95$  و رسوب ۰/۵ میلی‌متر، عمق حفره آبشستگی آن ۱۱ میلی‌متر و در همین سرعت نسبی برای رسوب ۰/۷ میلی‌متر به میزان ۷ میلی‌متر می‌رسد، به عبارتی میزان عمق حفره آبشستگی برای این پایه، در شرایط هیدرولیکی مشابه با افزایش اندازه قطر متوسط رسوب بستر به میزان ۱/۵ برابر کاهش می‌یابد. پس در رسوب ۰/۵ میلی‌متر میزان عمق آبشستگی برای پایه پل‌های با قطر ۱۰، ۲۰، ۴۰ میلی‌متر، بیش از عمق حفره در رسوب ۰/۷ میلی‌متر می‌باشد.

با ترسیم توسعه طولی حفره آبشستگی برای پایه پل‌های ۱۰، ۲۰ و ۴۰ میلی‌متر در رسوب ۰/۵ و ۰/۷ میلی‌متر با سرعت نسبی ۰/۹۵ و ۰/۷۶ مشاهده می‌شود، توسعه حفره آبشستگی برای پایه‌ها در رسوب ۰/۵ میلی‌متر بیش‌تر از توسعه طولی حفره برای همین پایه‌ها در رسوب ۰/۷ میلی‌متر می‌باشد. همچنین حداکثر عمق آبشستگی در جلو پایه رخ می‌دهد و در دو سمت به صورت متقارن امتداد یافته و رو به پائین دست از عمق آن کاسته شده و در پشت پایه، مواد جدا شده از جلو پایه انباشته می‌گردند (شکل‌های ۸ و ۹).

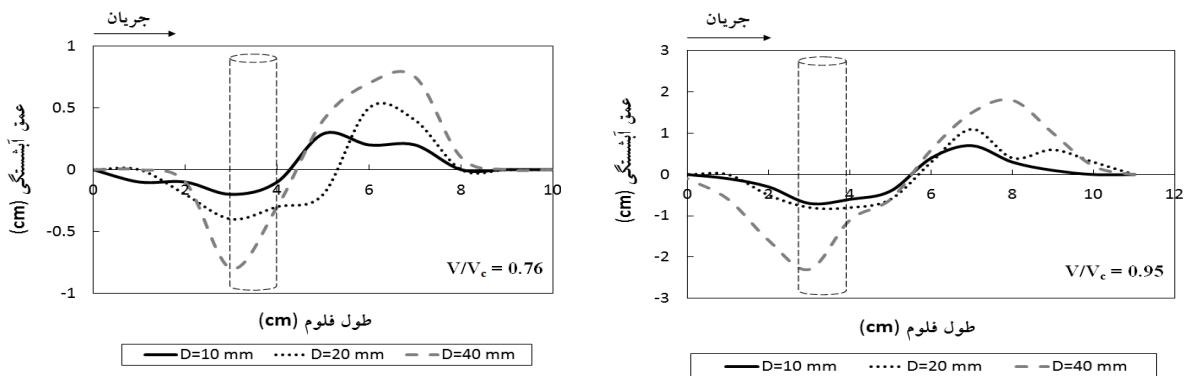


شکل ۷- توسعه عرضی حفره آبشستگی پیرامون پایه پل استوانه‌ای بر حسب سانتی‌متر (رسوب ۰/۷ میلی‌متر)

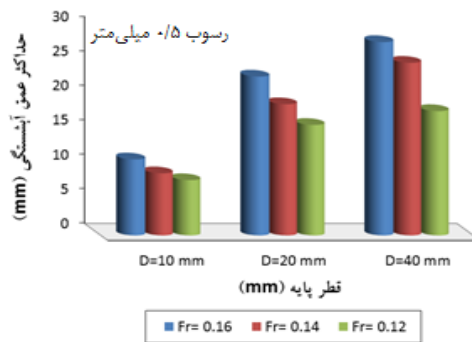




شکل ۸- توسعه طولی حفره آبخستگی پیرامون پایه پل استوانه‌ای بر حسب سانتی‌متر (رسوب ۰/۵ میلی‌متر)



شکل ۹- توسعه طولی حفره آبخستگی پیرامون پایه پل استوانه‌ای بر حسب سانتی‌متر (رسوب ۰/۷ میلی‌متر)

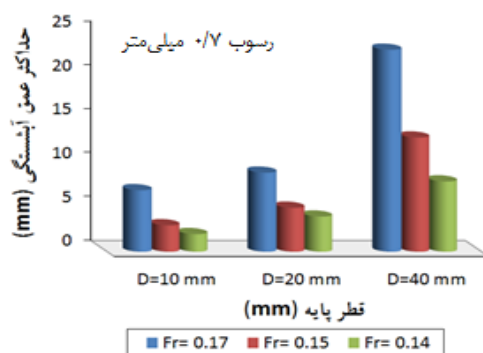


شکل ۱۰- حداکثر عمق آبخستگی با تغییر قطر پایه پل (رسوب ۰/۵ میلی‌متر)

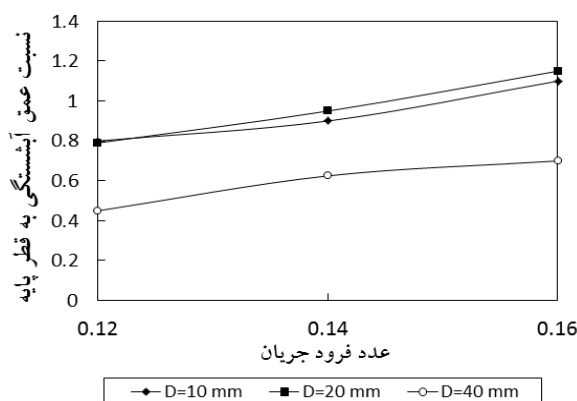
و ۲۰ میلی‌متر به ترتیب به میزان ۷ و ۹ میلی‌متر می‌رسد. از این رو، پایه با قطر ۴۰ میلی‌متر در رسوب ۰/۵ و ۰/۷ میلی‌متر، عمق آبخستگی آن بیش از پایه‌های ۱۰ و ۲۰ میلی‌متری در همین نمونه‌های رسوب می‌باشد. همچنین توسعه طولی و عرضی حفره آبخستگی برای این پایه، بیش از دو پایه‌ی دیگر است و تپه رسوبی در پائین‌دست پایه پل استوانه‌ای، به دلیل قدرت بالای گرداب‌های برخاستگی در فاصله دورتری نسبت به پایه قرار می‌گیرد پس با کاهش قطر پایه از میزان عمق حفره آبخستگی و توسعه آن در هر دو نمونه رسوب کاسته می‌شود. در ادامه شکل‌های (۱۰) و (۱۱) گویای مطالب ذکر شده می‌باشند.

با توجه به شکل‌های بالا، با افزایش قطر پایه، عمق آبخستگی در اطراف پایه به دلیل افزایش حجم رسوب‌های شسته شده ناشی از فعالیت جریان‌های گردابی و ایجاد منطقه پرفشار وسیع‌تر، افزایش می‌یابد. به طور کلی با افزایش قطر پایه، تأثیر لایه مرزی در جدایی جریان از یک سو و افزایش قدرت جریان‌های ثانویه از سوی دیگر، سبب بزرگ شدن حفره در اطراف پایه و توسعه طولی و عرضی آن می‌شود. همان‌طور که از توسعه طولی و عرضی پایه‌ها در رسوب ۰/۵ و ۰/۷ میلی‌متر مشخص است، در رسوب ۰/۷ میلی‌متر و  $V/V_c = 0.95$  برای پایه ۴۰ میلی‌متر میزان عمق حفره ۲۳ میلی‌متر است و برای پایه‌های ۱۰

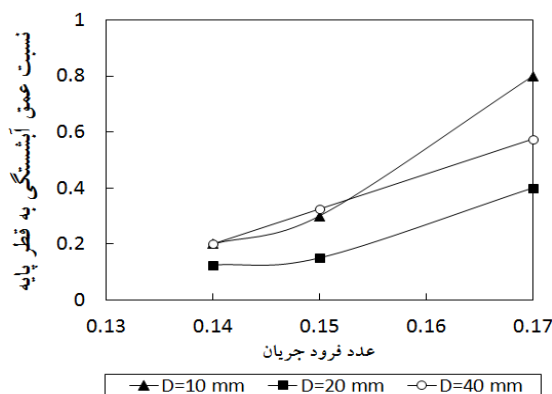
رئیی و قمشی: آبشستگی موضعی پیرامون پایه پل استوانه‌ای...



شکل ۱۱- حداکثر عمق آبشستگی با تغییر قطر پایه پل (رسوب ۰/۷ میلی‌متر)



شکل ۱۲- نسبت عمق آبشستگی به قطر پایه با تغییر عدد فرود جریان (رسوب ۰/۵ میلی‌متر)



شکل ۱۳- نسبت عمق آبشستگی به قطر پایه با تغییر عدد فرود جریان (رسوب ۰/۷ میلی‌متر)

پایه ۱۰ میلی‌متر در رسوب ۰/۷ میلی‌متر و  $V/V_c = 0.95$  میزان عمق حفره ۷ میلی‌متر است، و در  $V/V_c = 0.76$  به ۲ میلی‌متر می‌رسد و به مقدار ۳/۵ برابر کاهش را در پی داشته است و حداقل میزان عمق آبشستگی را دارد. شکل‌های (۱۲) و (۱۳) گویای این است که برای هر یک از پایه‌های پل در رسوب ۰/۵ و ۰/۷ میلی‌متر با کاهش عدد فرود جریان، سرعت جریان کاهش یافته و از این رو میزان عمق و توسعه حفره آبشستگی نیز کاهش می‌یابد.

**تأثیر  $F_r$  بر  $d_s/D$  در توسعه آبشستگی اطراف پایه پل استوانه‌ای**

با توجه به شکل‌های (۱۲) و (۱۳) مشاهده می‌شود، بین عمق حفره آبشستگی و عدد فرود جریان رابطه مستقیمی وجود دارد. عمق حفره آبشستگی با افزایش عدد فرود جریان، افزایش می‌یابد. پایه‌ی ۴۰ میلی‌متر در رسوب ۰/۵ میلی‌متر و سرعت نسبی ۰/۹۵ حداکثر میزان عمق آبشستگی را دارا می‌باشد که مقدار آن ۲۸ میلی‌متر است در حالی که در همین رسوب و  $V/V_c = 0.76$  این مقدار به ۱۸ میلی‌متر می‌رسد و به میزان ۱/۵ برابر کاهش می‌یابد.

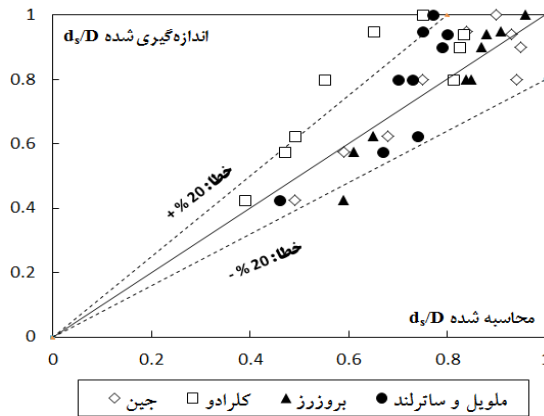
دانشگاه ایالتی کلرادو (۱۹۹۹)، جین (۱۹۸۱) و بروزرز (۱۹۷۷) که در نشریه ۵۴۹ وزارت نیرو این روابط ذکر شده‌اند؛ را نشان می‌دهد (بی‌نام، ۱۳۹۱). این شکل‌ها با علم به اینکه آزمایش‌ها در شرایط مختلف آزمایشگاهی و دامنه‌های مختلف پارامترها انجام شده‌اند، استخراج شده‌اند و پراکندگی نقاط نسبت به خط ۴۵ درجه را نشان می‌دهند که مقادیر اندازه‌گیری شده و محاسباتی با استفاده از روابط محققین دارای همبستگی نسبتاً خوبی بوده و ضریب تعیین این دو مقدار (اندازه‌گیری شده و محاسباتی) با استفاده از روش‌های آماری به ترتیب ۷۰ درصد، ۷۱ درصد، ۸۲ درصد و ۹۴ درصد برای رسوب ۰/۵ میلی‌متر و ۸۵ درصد، ۸۴ درصد، ۷۸ درصد و ۹۷ درصد برای رسوب ۰/۷ میلی‌متر در سطح ۰/۰۵- معنی‌دار می‌باشد. در مشاهده‌های آزمایشگاهی، رسوب ۰/۵ میلی-متر عمق آبستتگی را بیش از رسوب ۰/۷ میلی‌متر نشان داد و با قرار دادن شرایط مختلف آزمایشگاهی در روابط مذکور و محاسبه عمق بدون بعد آبستتگی برای پایه‌های پل می‌توان همین روند را نیز برای روابط در نظر گرفت.

در ادامه بر اساس تجزیه و تحلیل ابعادی صورت پذیرفته، و به منظور بررسی اثر متقابل پارامترهای بدون بعد مؤثر بر حداکثر عمق آبستتگی و روند تغییر آن‌ها و همچنین ارائه یک رابطه ریاضی برای پیش‌بینی این مقادیر، از برازش غیرخطی استفاده شد. و در نهایت رابطه مربوط با استفاده از نرم‌افزار آماری Spss20 پس از تحلیل‌های متعدد با ضریب تعیین ( $R^2 = 0.74$ ) که در سطح پنج درصد معنی‌دار می‌باشد، مطابق رابطه ۶ استخراج گردید (نکته حائز اهمیت، مقدار عدد فرود ذره برای دو نمونه رسوب در بازه  $1.59(Fr_g(2.22))$  متغیر می‌باشد):

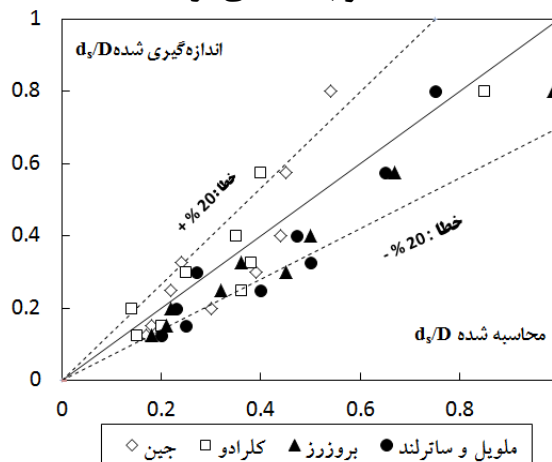
$$d_s / D = 0.345 + 0.475 Fr_g^{1.5} + 1.48 Fr_g^{0.5} \quad (۶)$$

**مقایسه نتایج با پژوهش‌های قبلی**

شکل‌های (۱۴) و (۱۵) مقایسه نتایج تحقیق حاضر ( $d_s / D$ ) مقادیر اندازه‌گیری شده در آزمایشگاه) با برخی روابط آبستتگی استخراج شده توسط محققینی چون ملویل و ساترلند (۱۹۸۸)،



شکل ۱۴- مقایسه عمق بی بعد آبستتگی به قطر پایه مقادیر اندازه‌گیری شده با روابط (رسوب ۰/۵ میلی‌متر)



شکل ۱۵- مقایسه عمق بی بعد آبستتگی به قطر پایه مقادیر اندازه‌گیری شده با روابط (رسوب ۰/۷ میلی‌متر)

## رئسی و قمشی: آبشستگی موضعی پیرامون پایه پل استوانه‌ای...

### نتیجه‌گیری

علت ریزدانه‌تر بودن رسیدن به زمان تعادل برای آن‌ها دیرتر رخ می‌دهد. علاوه بر نتایج فوق، با استفاده از رگرسیون غیرخطی چند متغیره رابطه‌ای به منظور محاسبه میزان عمق بدون بعد آبشستگی به قطر پایه ارائه گردید. لازم به توضیح است، رابطه به دست آمده با توجه به شرایط و محدوده متغیرهای این تحقیق بدست آمده است، در نتیجه با انجام آزمایش‌های دقیق‌تر و در نظر گرفتن تمامی پارامترهای مؤثر بر آبشستگی و همچنین در محدوده متغیرهایی غیر از محدوده این تحقیق شاید این رابطه دقت کافی را نداشته باشد.

با انجام تجزیه و تحلیل ابعادی، پارامترهای بدون بعد مؤثر بر پدیده آبشستگی شناسایی و آزمایش‌ها بر مبنای آن‌ها طرح‌ریزی شد. در زیر نتایج تحقیق بصورت خلاصه آورده شده است: با افزایش قطر پایه، توسعه حفره آبشستگی افزایش می‌یابد. با کاهش سرعت نسبی جریان، حفره آبشستگی توسعه کمتری دارد، به طوری که پایه ۴۰ میلی‌متر از سرعت نسبی ۰/۹۵ به ۰/۷۶ در رسوب ۰/۵ میلی‌متر ۱/۵ برابر و در رسوب ۰/۷ میلی‌متر ۲/۸۷ برابر کاهش می‌یابد. بررسی دو نمونه رسوب در شرایط هیدرولیکی یکسان نشان داد که در رسوب ۰/۵ میلی‌متر میزان حداکثر عمق آبشستگی اطراف یک پایه بیش از عمق و توسعه گودال اطراف همان پایه در رسوب ۰/۷ میلی‌متر است، به طوری که پایه با قطر ۲۰ میلی‌متر در سرعت نسبی ۰/۸۶، کاهش آبشستگی ۳/۸ برابری را در پی داشته است. رسوب ۰/۵ میلی‌متر، بیش‌تر متأثر از جریان‌های گردابی اطراف پایه می‌باشند، پس به

### سپاسگزاری

هزینه این تحقیق از محل اعتبارات پژوهانه نویسنده دوم انجام شده است که بدینوسیله از معاونت پژوهشی دانشگاه شهید چمران اهواز قدردانی می‌شود.

### منابع

- ۱- بی‌نام، ۱۳۹۱. راهنمای روش‌های محاسبه آبشستگی موضعی (نشریه شماره ۵۴۹). معاونت برنامه‌ریزی و نظارت راهبردی رئیس جمهور، تهران.
- ۲- ترابی، ع. ۱۳۹۱. مقایسه روش‌های محاسبه آبشستگی در پایه پل‌ها. پایان‌نامه دوره کارشناسی ارشد، گروه سازه‌های آبی، بخش عمران، دانشگاه شیراز.
- ۳- سعیدی نژاد، م، دهقانی، الف. و ق. علایی. ۱۳۹۱. اثر دانه‌بندی مصالح بر حداکثر عمق آبشستگی اطراف پایه پل با مقطع دایره‌ای. مجموعه مقالات پنجمین کنفرانس ملی عمران، دانشکده مهندسی دانشگاه باهنر کرمان، کرمان، ایران، ۱۹-۱۷ آبان ماه.
- ۴- خدائیان، س، اسماعیلی، ک. و ح. شریعتی. ۱۳۸۸. بررسی عملکرد طوق و شکاف در کاهش آبشستگی پایه پل. دانشگاه فردوسی مشهد، شرکت آب منطقه‌ای خراسان.
- ۵- شفاعی بجستان، م. ۱۳۹۲. مبانی نظری و عملی هیدرولیک انتقال رسوب. اداره چاپ و نشر دانشگاه شهید چمران، اهواز.
- ۶- نورزاد، ح، حیدری، م. و ر، افضل‌مهر. ۱۳۸۰. کنترل آبشستگی موضعی پایه پل با استفاده از شکاف در گروه پایه‌ها. مجموعه مقالات دومین کنفرانس هیدرولیک ایران، دانشکده فنی دانشگاه تهران، تهران، ایران، ۱۷-۱۵ آبان ماه.
- 7- Breusers, H. N. C., and A. J. Raudkivi. 1991. Scouring. Hydraulic Structures Design Manual Balkema publication, Rotterdam, Netherlands, 560 p.
- 8- Chiew, Y. M. and B. W. Melville. 1987. Local scour around bridge piers. Journal of Hydraulic Research, 25(1): 15-26.
- 9- Chow, V. T. 1959. Open channel hydraulics. McGraw-Hill Book Co, p. 680, New York, Tokyo.
- 10-Ettema, R. 1980. Scour at bridge piers. Report No. 216, p. 527, University of Auckland, Department of Civil Engineering, New Zealand.
- 11-Grade, R. J. 2013. Study of scour around bridge piers. Journal of Hydraulic Division, ASCE, 88(1): 167-175.
- 12-Kaya, V. R. 2009. Local scour around bridge piers. Journal of Hydraulic Division, ASCE, 95(12): 1982-1994.

- 13-Lacy, N., Yanmaz, A. M. and D. S. Inglis. 2001. Bridge scours data management system user's manuals. Turk Journal of Engineering Environmental Science: 127-137.
- 14-Laursen, E. M. 1996. Scour around bridge piers and abutments. Bulletin No. 4, Iowa Highways Research Board, Ames, Iowa, City. Transition ASCE, 127(10): 166-180.
- 15-Lee, S. O., and T. W. Sturm. 2012. Effect of sediment size scaling on physical modeling of bridge pier scour. Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, 135(10): 739-802.
- 16-Melville, B.W., and Chiew, Y.M. 1999. Time scale for local scour at bridge piers. Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, 125(1): 59-65.
- 17-Pasiok, R. and E. Stinger-Szydlo. 2010. Sediment particles and turbulent flow simulation around bridge piers. Archives of Civil and Mechanical Engineering, 10(2): 67-79.
- 18-Raudkivi, A. J. 1986. Function trends of scour at bridge piers. Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, 112(5): 1-3.
- 19-Raudkivi, A. J. and R. Ettema. 1983. Clear-water scour at cylindrical piers. Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, 109(3): 338-350.
- 20-Raudkivi, A.J., and Ettema, R. 1999. Effect of sediment gradation on clear water scour. Journal of Hydraulic of Division, ASCE, 116(10): 1197-1214.
- 21-Shen, H.W. 1969. Mechanics of local scour. Colorado State University, Engineering Research Center Fort Collins Co. 80523, National Bureau of Standards, Institute for applied technology, 57 p.
- 22-Teeter, A. M., Jeerly, M. and P. A. Chitale. 1989. Bridge Scour prediction for extreme flow condition. American Journal of Environmental Science, 96(18): 43-54.
- 23-Wong, W. H. 2008. Scour at bridge piers. Journal of Hydraulic Division, ASCE, 86(1): 39-54.