

«یادداشت تحقیقاتی»

بررسی آزمایشگاهی پدیده آبستگي در اطراف پایه‌های مخروطی و هرمی شکل

معصومه پورااحمدی¹، حبیب حکیم زاده^{2*}

1- دانش‌آموخته کارشناسی ارشد سازه‌هایی دریایی، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی سهند تبریز

2- استاد دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی سهند، تبریز

* تبریز، صندوق پستی 51335 - 1996

hakimzadeh@sut.ac.ir

چکیده- تحقیق حاضر به بررسی اثر پایه‌های مخروطی و هرمی شکل در کاهش پدیده آبستگي می‌پردازد. در این مقاله، اثر پایه‌هایی با قطرهای متفاوت در سطح آب و بستر (شیب‌های جانبی متفاوت بین 1:60 تا 1:10) و سطح انسداد ثابت مورد آزمایش قرار گرفته است. نتایج داده‌های آزمایشگاهی برای دو شدت جریان (نسبت سرعت جریان به سرعت جریان بحرانی) 0/92 و 0/86 نشان می‌دهند عمق آبستگي در اطراف پایه‌های مخروطی و هرمی در مقایسه با پایه‌های استوانه‌ای و مکعبی کمتر است. همچنین، مشاهده شد که برای شدت جریان 0/92 با ایجاد شیب بسیار ملایمی (1:60) در پایه‌های مخروطی عمق آبستگي مطلق (بیشترین عمق آبستگي اندازه‌گیری شده) و نسبی (نسبت حداکثر عمق آبستگي اندازه‌گیری شده به قطر پایه روی بستر) به ترتیب حدود 15/8% و 25/1% نسبت به پایه‌های استوانه‌ای کاهش داشتند. برای همان شرایط در مورد پایه‌های هرمی نیز عمق آبستگي مطلق و نسبی به ترتیب حدود 8/9% و 18/4% نسبت به پایه‌های مکعبی کاهش نشان داد. ولی برای پایه‌های با شیب تندتر و قطر بیشتر بر روی بستر، علی‌رغم در نظر گرفتن معیارهای محققان مختلف، دیواره‌های جانبی و گردابه‌های برخاستگی در پشت پایه در روند آزمایش تغییر ایجاد کرده و روند کاهش عمق آبستگي متوقف شد.

کلیدواژگان: بررسی آزمایشگاهی، آبستگي موضعی، مقطع متغیر، دیواره ی جانبی، گردابه‌های برخاستگی.

1- مقدمه

در روند طراحی بسیار حائز اهمیت است. مطالعات آزمایشگاهی و عددی زیادی با هدف بررسی پدیده آبستگي صورت گرفته است که از جمله آنها می‌توان به (Breusers (1977)، Breusers (1991)، Chiew (1987)، (1987)، (Dargahi (1982)، (Dey (1995)، Melville (2000)، (2004)، Muzzammil (1983)، Raudkivi اشاره

پل‌ها از سازه‌های بسیار با اهمیتی هستند که در معرض خطرهای مختلفی قرار دارند و سالانه تعداد زیادی از آنها در سرتاسر جهان در اثر پدیده آبستگي تخریب می‌شوند. از این‌رو توجه به کنترل دقیق پدیده آبستگي

کرد. بطور عموم روش‌های کاهش و کنترل آبستگي در اطراف پایه‌ها به دو دسته تقسیم می‌شوند: روش‌های مسلح کردن و روش‌های انحراف جریان (Johnson, 2001; Melville, 1999). روش‌های مسلح کردن شامل حفاظت پایه‌ها در مقابل تنش برشی است، در حالی که در روش دوم جریان در اطراف پایه‌ها منحرف می‌شود، به طوری که نیروی فرساینده جریان رو به پایین و گردابه‌های نعل اسبی¹ و در نتیجه سرعت جریان را در نزدیکی پایه‌ها کاهش می‌دهد. روش‌های مسلح کردن شامل سنگ چین، بلوک‌های بتنی پیش ساخته و گابیون است. ابزارهای انحراف جریان شامل استفاده از سپری، طوقه‌ها و شکاف‌های ایجاد شده بر روی پایه‌ها است.

مکانیزم شروع آبستگي در اطراف پایه‌ها را از گذشته جریان رو به پایین در بالادست پایه و تشکیل گردابه‌ها در پایین دست آن می‌دانند (Muzzammil, 2004). با کاهش سرعت جریان از سطح آب تا بستر، فشار دینامیکی روی سطح پایه کاهش یافته و این گرادیان فشار، جریان رو به پایینی مانند جت قائم ایجاد می‌کند. این جریان روی بستر اثر کرده و در نزدیکی قاعده پایه گودالی ایجاد می‌کند. برخورد جریان رو به پایین به بستر عامل اصلی ایجاد پدیده آبستگي است (Melville, 1977). حرکت شدید گردابه‌ها که به دلیل وجود پایه ایجاد می‌شود، باعث به دنبال خود کشیدن رسوبات بستر در نزدیکی قاعده پایه می‌شود. سپس گردابه‌ها در امتداد کناری پایه در اطراف قاعده پایه توسعه می‌یابند. این گردابه‌ها را به دلیل شباهتی که به نعل اسب دارند، گردابه‌های نعل اسبی می‌نامند (Breusers, 1977). از این رو گردابه‌های نعل اسبی در نتیجه جدایی جریان در بالادست گودال آبستگي که در اثر جریان رو به پایین ایجاد شده، توسعه می‌یابند. گردابه‌های نعل اسبی در انتقال ذرات رسوب بالادست پایه بسیار مؤثرند. این گردابه‌ها نتیجه پدیده آبستگي هستند نه عامل ایجاد آن (Breusers, 1991). با افزایش

عمق آبستگي از قدرت گردابه‌های نعل اسبی کاسته می‌شود، که این امر سبب کاهش در نرخ انتقال رسوب از قاعده پایه می‌شود (Richardson, 2001). همچنین علاوه بر گردابه‌های نعل اسبی در نزدیکی قاعده پایه، گردابه‌هایی با محوریت قائم در عمق در پایین دست پایه وجود دارند که به آنها گردابه‌های برخاستگی² می‌گویند. این گردابه‌ها پایدار نیستند و بطور متناوب در دو سمت پایین دست پایه ایجاد شده و به تدریج از بین می‌روند. قدرت گردابه‌های برخاستگی با فاصله گرفتن از پایین دست پایه کاهش می‌یابد و دلیل نشست مواد رسوبی که درست در پایین دست پایه اتفاق می‌افتد، همین مطلب است (Ettema, 1998). مکانیزم آبستگي در اطراف پایه‌هایی با مقطع متغیر بسیار مشابه، اما با یک تفاوت عمده است. برای پایه‌هایی همراه با شیب جانبی شدت جریان رو به پایین با رویارویی با صفحه مایل کاهش می‌یابد و به سمت بالادست منعکس می‌شود. بنابراین شیب جانبی باعث استهلاک انرژی می‌شود (Besharati, 2010). در این ارتباط بروز و رودکیوی در سال 1991 به بررسی آبستگي در اطراف پایه‌هایی با مقطع متغیر³ پرداختند و نشان دادند که پایه‌های با شیب معکوس حرکت قوی گردابه‌ها را به دلیل اثر بیشتر جریان رو به پایین تجربه خواهند نمود و نتیجه امر افزایش آبستگي در اطراف این نوع پایه‌ها خواهد بود (Breusers, 1991). سرانجام اینکه، اثر شیب پایه‌های پل روی عمق آبستگي نیز توسط برخی از پژوهشگران مورد بررسی قرار گرفته است (Bozkus, 2004).

هدف این مطالعه، تعیین میزان کارآمدی پایه‌های مخروطی و هرمی در کاهش عمق آبستگي و قرار دادن آن‌ها در دسته ابزارهای انحراف جریان است. در خصوص این موضوع چند مورد بررسی محدود به صورت مطالعه عددی و آزمایشگاهی منتشر شده است (Besharati,

2. Wake Vortex

3. Tapered Piers

1. Horseshoe Vortex

انتخاب شده است که اثر جانبی دیواره‌ها قابل صرف‌نظر کردن باشد. همچنین براساس مطالعات ملویل و چیو (1999)، در صورتی که نسبت قطر پایه به اندازه متوسط دانه‌های رسوبی بیش از پنجاه باشد، اندازه دانه‌های رسوبی بر عمق آبستگي بی‌تأثیر خواهد بود (Melville and Chiew, 1999). بر اساس مطالعات ملویل و ساترلند در سال 1988، این نسبت می‌تواند بیشتر از 25 نیز در نظر گرفته شود. در مطالعه حاضر این نسبت بین 25/6 تا 44/87 در نظر گرفته شده است. همچنین به منظور کاهش اثر انقباض، اندازه پایه‌ها طوری انتخاب شده‌اند که سطح انسداد بیشتر از 12% مقطع جریان نباشد. معیارهای دیگری نیز توسط پژوهشگران مختلف ارائه شده‌اند. به عنوان مثال، بر اساس مطالعات رودکیوی و اتما دیواره‌های جانبی بر عمق آبستگي در صورت: $(D/b) < 16\%$ (که در آن b عرض فلوم و D عرض پایه هستند) بی‌تأثیر خواهند بود (Raudkivi and Ettema, 1983). همچنین، بعضی از محققان معیارهای محدود کننده‌تری را پیشنهاد نموده‌اند که از جمله آنها می‌توان به معیار پیشنهادی زراتی و همکاران ($(D/b) < 6.6\%$) اشاره کرد (Zarrati et al., 2004). از این رو مدل‌های انتخاب شده برای آزمایش بر اساس معیارهای رودکیوی و اتما (1983) واجد شرایط هستند، در حالی که معیار زراتی و همکاران (2004) را ارضا نمی‌کنند. همه آزمایش‌ها در عمق 15 سانتی‌متر انجام شده‌اند که با در نظر گرفتن قطر پایه‌ها تا حدود زیادی از معیار سومر و فردسو (2002) تبعیت می‌کنند. بر اساس معیار آنها نسبت عمق آب به قطر پایه باید بیشتر از 5 باشد. برای هر مدل پایه، دو نرخ شدت جریان برای آزمایش طوری انتخاب شده‌اند که نسبت‌های سرعت برشی بستر به سرعت برشی بحرانی به ترتیب برابر 0/92 و 0/86 باشند. بعد از هر آزمایش گستره گودال آبستگي توسط لمینی متر (ترازسنج) با دقت $\pm 0/1$ میلی‌متر اندازه‌گیری شده است. دیاگرام شماتیک پایه‌ها در شکل 1 نشان داده شده است.

(Sumer, 1994; 2010). در این مطالعات، در مدل‌های پایه انتخاب شده سطح انسداد (سطح تصویر شده مانع در مقابل جریان) با افزایش شیب جانبی سازه کاهش یافته، در حالی که در مطالعه حاضر ضریب انسداد (نسبت سطح انسداد به سطح مقطع جریان) برای همه پایه‌ها با شیب‌های جانبی متفاوت، ثابت نگه داشته شده است و این موضوع تفاوت اصلی کار تحقیق حاضر با موارد ذکر شده قبلی است. در خصوص توجیه ساخت این نوع پایه‌های با مقطع متغیر در عمق باید گفت که نمونه‌ای از آنها برای خط آهن در استان Tyrol کشور اتریش ساخته شده و در بهار سال 2012 میلادی به اتمام رسیده است (Plankensteiner, 2012). در این تحقیق، به منظور کاهش و منحرف کردن موضعی جریان، تعداد 14 پایه با شیب‌های سازه‌ای جانبی متفاوت (متغیر از 1:60 تا 1:10) با دو مقطع دایره‌ای و مربعی مورد بررسی قرار گرفته‌اند.

2- مواد و روش‌ها

آزمایش‌ها در فلومی به طول 10 متر، عرض 30 سانتی‌متر و عمق 50 سانتی‌متر روی شیب افقی انجام شده است. محل مواد رسوبی به منظور انجام تحقیق دارای طول 2 متر، عرض 30 سانتی‌متر و عمق 15 سانتی‌متر می‌باشد که در فاصله 4 متر از خروجی کانال قرار گرفته است.

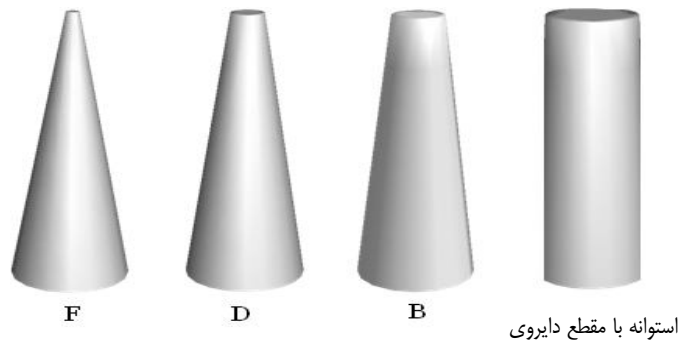
میانگین اندازه دانه‌ها (d_{50}) 0/78 میلی‌متر می‌باشد و انحراف استاندارد هندسی دانه‌بندی رسوبات که به صورت زیر تعریف می‌شود، برابر 1/24 بوده است:

$$\sigma_g = \left(\frac{d_{84}}{d_{16}} \right)^{0.5} = 1/24 \quad (1)$$

که در آن d_{84} اندازه دانه‌های رسوبی است که 84 درصد ذرات از آن ریزتر باشد. وزن مخصوص نسبی ماسه‌ها $S = 2/65$ می‌باشد. مدل‌ها شامل 6 پایه مخروطی، 6 پایه هرمی (با شیب‌های 1:60 تا 1:10)، یک پایه استوانه‌ای و یک پایه مکعبی است. در جدول 1 جزئیات مدل‌های فیزیکی استفاده شده در آزمایش‌ها آمده است. عرض پایه‌ها بر اساس معیارهای ارائه شده در ادبیات فنی طوری

جدول 1 جزئیات مدل‌های فیزیکی

نوع پایه	قطر (بعد) در بستر (cm)	قطر (بعد) در سطح آب (cm)	نسبت قطر (بعد) پایه در مقابل جریان به عرض بستر (%)	شیب جانبی پایه‌ها (زاویه بر حسب درجه)
پایه استوانه‌ای (مکعبی)	2	2	6/6	-
مخروطی و هرمی A	2/25	1/75	7/5	0/95 (1:60)
مخروطی و هرمی B	2/5	1/5	8/3	1/15 (1:50)
مخروطی و هرمی C	2/75	1/25	9/2	1/43 (1:40)
مخروطی و هرمی D	3	1	10	1/9 (1:30)
مخروطی و هرمی E	3/25	0/75	10/8	2/86 (1:20)
مخروطی و هرمی F	3/5	0/5	11/6	5/7 (1:10)



شکل 1 دیاگرام شماتیک بعضی از پایه‌های مخروطی و استوانه‌ای

3- برنامه آزمایش و صحت‌سنجی

برنامه آزمایش‌ها به دو دسته A و B تقسیم گردید که در هر دسته، سری کاملی از آزمایش‌ها صورت گرفته است. اولین دسته آزمایش‌ها (سری A) به منظور مطالعه عملکرد پایه‌های مخروطی تحت شرایط آب زلال و شدت جریان‌های 0/92 و 0/86 طراحی شده است. در دسته دوم (سری B) نیز به بررسی عملکرد پایه‌های هرمی شکل تحت شرایط آب زلال و با شدت جریان 0/92 و 0/86 پرداخته می‌شود و نهایتاً نتایج با پایه‌های متناظر استوانه‌ای و مکعبی مقایسه شده‌اند.

ابتدا آزمایش‌های مرجع و اولیه ای انجام شد و بیشینه عمق آبشستگی در مدت 24 ساعت بررسی گردید. سپس از روی نتایج آزمایشگاهی مشخص شد که برای یک دوره 24 ساعته، بیشترین درصد عمق آبشستگی بعد از 8

ساعت اتفاق می‌افتد. بعلاوه، بر اساس یافته‌های برخی از محققان، 90% عمق تعادل پس از 7 یا 8 ساعت برای بیشتر آزمایش‌ها به وجود می‌آید (Ataie-Ashtiani, 2006). به طور مشابه، محققان دیگر دریافته‌اند که بیشترین بخش آبشستگی در 3 یا 4 ساعت اول آبشستگی به وجود می‌آید (Mia, 2003). بنابراین تمام آزمایش‌های اصلی در طول زمان 8 ساعت صورت گرفته است. هر آزمایش 3 بار تکرار شده و میانگین نتایج 3 آزمایش، ارائه شده است. همچنین، مطالعات آزمایشگاهی عمق آبشستگی به وسیله فرمول تجربی ملویل و چپو (1999) صحت‌سنجی شده است (شکل 2). اگرچه در این فرمول‌بندی که در ذیل آمده است مقادیر آبشستگی و زمان تعادل از روابط جداگانه تجربی محاسبه می‌شوند، ولی در اینجا برای رعایت اختصار، مقادیر اندازه‌گیری

برای ملایم‌ترین شیب جانبی (1:60) پایه مخروطی، بیشینه عمق مطلق آبستگي حدود 15/8% کاهش داشته است. بنابراین انتظار می‌رود که با افزایش شیب جانبی، کاهش بیشتری در بیشینه عمق آبستگي بوجود آید. در حالی که این حالت در آزمایش‌ها اتفاق نیفتاده و با افزایش شیب جانبی، عمق آبستگي شروع به افزایش می‌کند. بخشی از این اتفاق ممکن است ناشی از افزایش اثر جداره‌های فلوم همزمان با افزایش شیب جانبی و قطر پایه در کف باشد. بنابراین علی‌رغم در نظر گرفتن معیارهای بیشتر محققان، این اثر در مورد پایه‌های باشیب تند E و F چشمگیر بوده و عمق آبستگي افزایش می‌یابد، به گونه‌ای که عمق مطلق آبستگي در دو حالت اخیر بیش از عمق آبستگي متناظر مربوط به استوانه است.

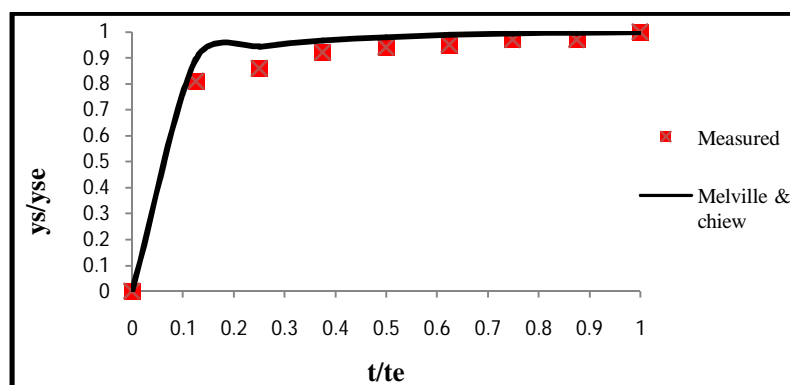
شده در آزمایش جایگزین آنها شدند. همچنین متوسط خطای نسبی در این اعتبارسنجی کمتر از پنج درصد و برابر 4/54 درصد بوده است.

$$\frac{y_s}{y_{se}} = \exp \left[-0.03 \left| \frac{u_c}{u} \ln \left(\frac{t}{t_e} \right) \right|^{1.6} \right] \quad (2)$$

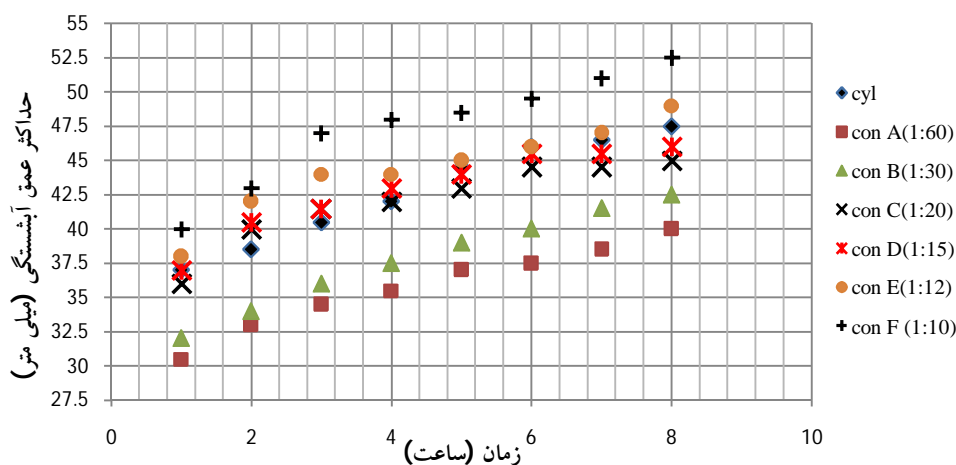
4- نتایج و بحث

4-1- سری A. پایه‌های مخروطی

نتایج آزمایش‌ها نشان می‌دهد استفاده از پایه‌های مخروطی سبب کاهش عمق آبستگي در مقایسه با پایه‌های استوانه‌ای می‌شود. شکل 3 توسعه زمانی عمق آبستگي در بالادست پایه‌ها را تحت شدت جریان 0/92 نشان می‌دهد. همان‌طور که از روی شکل نیز مشاهده می‌شود،



شکل 2 مقایسه داده‌های آزمایشگاهی (پایه استوانه‌ای، شدت جریان=0/86) با معادله تجربی ملویل و چویو (1999)



شکل 3 توسعه زمانی عمق آبستگي در بالادست پایه‌های مخروطی و استوانه‌ای (شدت جریان =0/92)

اگر چه روند کلی نتایج مانند سری نخست می‌باشد. شکل 5 توسعه زمانی عمق آبستگي در بالادست پایه‌ها را برای شدت جریان $0/92$ نشان می‌دهد. نتایج مشابهی نیز برای شدت جریان $0/86$ حاصل شده است.

به طور مشابه، شکل 6 مقایسه عمق نسبی آبستگي (نسبت بیشینه عمق آبستگي به قطر پایه روی بستر) برای شدت‌های جریان $0/92$ و $0/86$ را نشان می‌دهد. به طور واضح دیده می‌شود که پایه مکعبی بیشترین عمق نسبی آبستگي و پایه هرمی F کمترین عمق نسبی آبستگي را دارند.

همان گونه که از روی شکل 6 مشاهده می‌شود، برای شدت جریان $0/92$ نسبت S/D در مورد پایه مکعبی $2/75$ و برای پایه‌های هرمی A تا F به ترتیب $2/24$ ، $2/14$ ، $2/02$ ، $1/9$ ، $1/83$ و $1/74$ است. از این رو مشاهده می‌شود که با افزایش شیب جانبی، کاهش قابل ملاحظه‌ای در نسبت عمق نسبی آبستگي بوجود می‌آید، به گونه‌ای که این کاهش از مقدار $18/4\%$ در مورد پایه هرمی A به مقدار $36/6\%$ برای پایه F افزایش می‌یابد.

5- نتیجه گیری

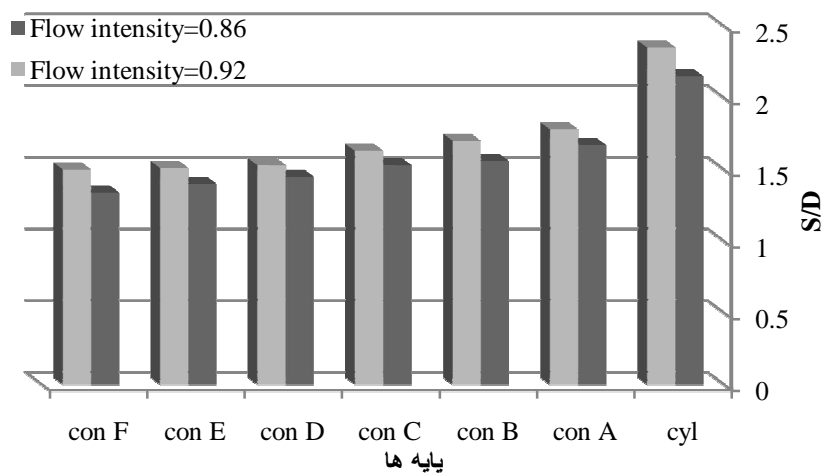
در مطالعه حاضر بررسی‌های آزمایشگاهی در ارتباط با آبستگي در اطراف پایه‌های استوانه‌ای و مکعبی و اثر کاهشی پایه‌های مخروطی و هرمی شکل با شیب‌های جانبی مختلف (از $1:60$ تا $1:10$) تحت جریان ماندگار انجام شده است. نتایج مطالعات آزمایشگاهی نشان می‌دهد که عمق نسبی آبستگي در اطراف پایه‌های مخروطی و هرمی شکل به ترتیب در مقایسه با پایه‌های استوانه‌ای و مکعبی کمتر می‌باشد، به طوری که برای شدت جریان $0/92$ ، در ملایمترین شیب ($1:60$) عمق مطلق و نسبی در مورد پایه مخروطی به ترتیب $15/8\%$ و $25/1\%$ کاهش داشته‌اند.

همچنین بخش دیگری از این اتفاق می‌تواند به قدرت شکل‌گیری نوسانی گردابه‌های برخاستگی¹ در پشت پایه‌های با قطر بیشتر در کف مربوط شود که با توجه به افزایش نسبی قطر در راستای قائم (و در نهایت بر روی بستر) دور از انتظار نیست. در مورد آزمایش پایه‌های مخروطی تحت شدت جریان $0/86$ نیز نتایج مشابهی حاصل شده است.

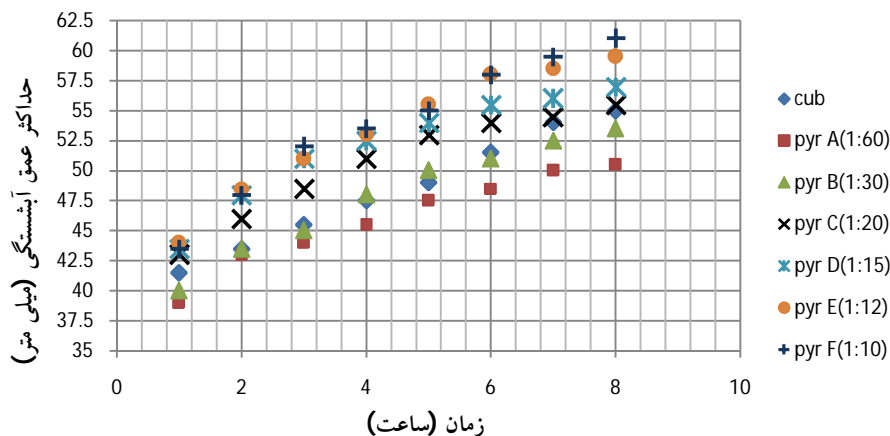
ولی از آنجا که در ادبیات فنی، به طور معمول عمق آبستگي نسبی گزارش می‌شود و این امر به دلیل لحاظ نمودن مقیاس طولی (عرض پایه بر روی بستر) در پدیده است، از این رو در این قسمت به بررسی این پارامتر مهم پرداخته می‌شود. شکل 4 مقایسه‌ای از عمق آبستگي نسبی (نسبت بیشینه عمق آبستگي به قطر پایه روی بستر) برای شدت جریان‌های $0/92$ و $0/86$ را نشان می‌دهد. به طور واضح دیده می‌شود که پایه استوانه‌ای بیشترین عمق نسبی آبستگي و پایه F کمترین میزان را داراست. همان گونه که از روی شکل 4 نیز مشاهده می‌شود، برای شدت جریان $0/92$ نسبت S/D در مورد پایه استوانه‌ای $2/37$ و برای پایه‌های مخروطی A تا F به ترتیب $1/77$ ، $1/7$ ، $1/64$ ، $1/53$ ، $1/51$ و $1/5$ می‌باشد. از این رو مشاهده می‌شود که با افزایش شیب جانبی، کاهش قابل ملاحظه‌ای در نسبت عمق نسبی آبستگي بوجود می‌آید، به گونه‌ای که کاهش مزبور از مقدار $25/1\%$ در مورد پایه مخروطی A به مقدار $36/8\%$ برای پایه F افزایش می‌یابد. در مورد آزمایش پایه‌های مخروطی تحت شدت جریان $0/86$ نیز نتایج کم و بیش مشابهی حاصل شده‌اند.

4-2- سری B: پایه‌های هرمی

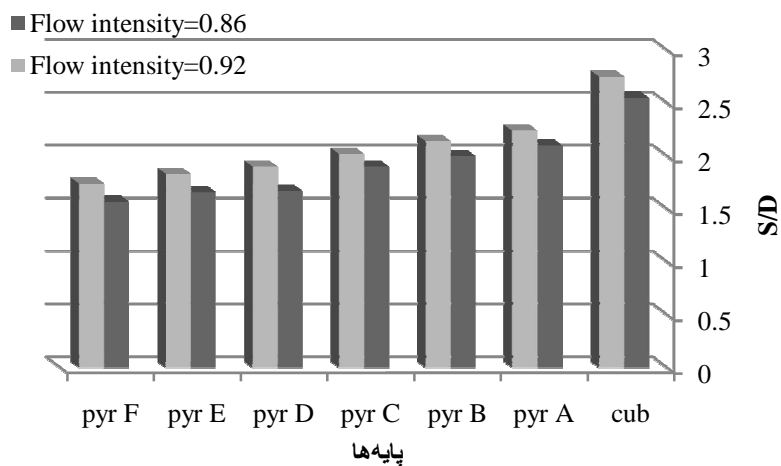
نتایج سری دوم آزمایش‌ها شبیه سری اول بوده و اندازه عمق آبستگي برای پایه‌های مکعبی و هرمی با مقدار بسیار جزئی تفاوت، بزرگتر از نتایج سری نخست است؛



شکل 4 مقایسه نسبت حداکثر عمق آبخستگی به قطر پایه روی بستر برای پایه‌های مخروطی و استوانه‌ای



شکل 5 توسعه زمانی عمق آبخستگی در بالادست پایه‌های هرمی و مکعبی (شدت جریان = 0/92)



شکل 6 مقایسه نسبت حداکثر عمق آبخستگی به قطر پایه روی بستر برای پایه‌های هرمی و مکعبی

سه بعدی الگوی جریان و تنش برشی بستر اطراف پایه های مخروطی"، نشریه مهندسی دریا، سال ششم، شماره 11، بهار و تابستان 89، ص.ص. 63-70

Ataie- Ashtiani, B., and Beheshti, A. A., (2006), "Experimental investigation of clear water local scour at pile groups", Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, 132(10), pp. 1100-1104.

Bozkus, Z. and Yildiz, O., (2004) "Effect of inclination of bridge piers on scouring depth" Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, 130(8), pp. 827-832.

Breusers, H. N. C., Nicollet, G. and Shen, H. W., (1977). "Local scour around cylindrical piers", Journal of Hydraulic Research, 15(3), pp. 211-252.

Breusers, H. N. C. and Raudkivi, A. J. (1991). "Scouring", Hydraulic structures design manual", IAHR, A. A. Balkema, Rotterdam, Vol. 2, p. 143.

Chiew, Y.M., and Melville, B.M., (1987), "Local scour around piers", Journal of Hydraulic Research, 25(1), pp. 15-26.

Dargahi, B., (1982). "Local scouring around bridge piers - a review of practice and theory", Bull. No. 114, Hydraulic Laboratory, Royal Institute of Technology, Stockholm, Sweden.

Dey, S., Bose, S.K., and Sastry, G.L.N., (1995), "Clear water scour at circular piers: A Model" Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, 121(12), pp. 869-876.

Ettema, R., Melville, B. W., and Barkdoll, B., (1998). "Scale effect in pier-scour experiments" Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, 124(6), pp. 639-642.

Johnson, P. A., Hey, R. D., Tessier, M. and Rosgen, D. L., (2001). "Use of vanes for control of scour at vertical wall abutments" Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, 127(9), pp. 772-778.

Melville, B. W., and Raudkivi, A. J. (1977), "Flow characteristics in local scour at bridge piers", Journal of Hydraulic Research. IAHR. 15(1): 373-380.

Melville, B. W. and Chiew, Y. M. (1999), "Time scale for local scour at bridge piers", Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, 125(1), pp. 59-65.

Melville, B. W., and Coleman, S. E. (2000), Bridge scour, Water Resources Publication, LLC, Highlands Ranch, Colo, p. 550.

Melville, B.W. and Hadfield, A. C. (1999), "Use of sacrificial piles as pier scour countermeasures.",

کاهش عمق نسبی مزبور در مورد پایه مخروطی با تندترین شیب (1:10) مورد آزمایش، به مقدار 36/8% افزایش می‌یابد. همچنین کاهش عمق مطلق و نسبی برای پایه هرمی در ملایمترین شیب (1:60)، به ترتیب 8/9% و 18/4% بوده است و کاهش عمق نسبی مزبور در مورد پایه هرمی با تندترین شیب (1:10) مورد آزمایش، به مقدار 36/6% افزایش می‌یابد. همچنین، نتایج بررسی توپوگرافی و پروفیل‌های بستر نشان می‌دهد که علاوه بر کاهش عمق آبستگي، حجم گودال آبستگي نیز کاهش می‌یابد. اما یافته بسیار مهم دیگر این پژوهش، انتخاب مدل‌ها با در نظر گرفتن اثر دیواره‌های جانبی است تا قابل صرف‌نظر کردن باشد. با توجه به نتایج آزمایش و معیارهای در نظر گرفته شده، معیار پیشنهاد شده توسط زراتی و همکاران (2004) شرایط دقیق‌تری را برای انجام آزمایش فراهم می‌نماید.

6- فهرست علائم

b	عرض فلوم
D	قطر پایه
d_{50}	اندازه میانگین دانه‌ها
d_{84}	اندازه رسوباتی که 84 درصد وزن ذرات از آن ریزترند.
d_{16}	اندازه رسوباتی که 16 درصد وزن ذرات از آن ریزترند.
t	زمان
t_e	زمان لازم برای رسیدن به عمق تعادل آبستگي
u^*	سرعت برشی بستر
u_c^*	سرعت برشی بحرانی
u_c	سرعت متوسط جریان در شرایط آستانه حرکت ذرات
u	سرعت متوسط جریان
y_s	عمق آبستگي موضعی در زمان t
y_{se}	عمق تعادل آبستگي موضعی در زمان تعادل
σ_g	انحراف استاندارد هندسی دانه بندی رسوبات

7- منابع

بشارتی گیوی، م.ح. و حکیم زاده، ح. (1389)، "بررسی عددی

- Hydraulic Engineering, ASCE, 109(3), pp. 338-350.
- Richardson, E. V., and Davies, S. R. (2001). "Evaluating scour at bridges" Publication No. FHWA NHI 01-001, Hydraulic Engineering Circular Federal Highway Administration, U.S. Dept. of Transportation, No. 18.
- Sumer, B. M., Fredsoe, J., Christiansen, N. and Hansen, S. B., (1994), "Bed shear stress and scour around coastal structures", Proc. 24th International Coastal Engineering Conference, ASCE, Kobe, Japan, Vol. 2, pp. 1595-1609.
- Zarrati, A. R., Gholami, H, and Mashahir, M. B, (2004), "Application of collar to control scouring around rectangular bridge piers" Journal of Hydraulic Research, IAHR, . 42(1), pp. 97-103.
- Sumer, B. M., and Fredsoe, J., (2002), "The mechanics of scour in the marine environment", Advanced Series on Ocean Engineering, World Scientific Publications, Vol. 17, p. 536.
- Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, 125(11), pp. 1221-1224.
- Melville, B. and Sutherland, A. (1988). "Design methods for local scour at bridge piers." *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, 114(10), pp. 1210-1226.
- Mia, Md. and Nago, H. (2003), "Design method of time-dependent local scour at circular bridge piers", *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, 129(6), pp. 420-427.
- Muzzammil, M., Gangadharaiah, T. and Gupta, A. K, (2004), "An experimental investigation of a horseshoe vortex induced by a bridge pier." *Water Management Journal* 157 (2), pp. 109-119.
- Plankensteiner, S., (2012), "New construction replaces Achbrucke railway bridge, Tyrol" *PORR Projects*, World of PORR, 160/2012.
- Raudkivi, A. J. and Ettema, R., (1983). "Clear water scour at cylindrical piers", *Journal of*