

The Experimental Study of the Effects of River Mining Holes on the Bridge Piers

RASOUL DANESHFARAZ^{*1}, JAFAR CHABOKPOUR², MEHDI DASINEH³, AMIR GHADERI⁴

1. Associate Professor Dr., Department of Civil Engineering, Faculty of engineering, University of Maragheh, Maragheh, Iran
 2. Assistant Professor Dr. ,Department of Civil Engineering,, Faculty of engineering, University of Maragheh, Maragheh, Iran
 3. Graduated study of the hydraulic structures, Civil engineering department, Faculty of engineering, University of Maragheh, Maragheh, Iran
 4. Ph.D student of hydraulic structures, Faculty of Engineering, University of Zanjan, Zanjan, Iran.
- (Received: Jan. 28, 2019- Revised: Feb. 21, 2019- Accepted: March. 5, 2019)

ABSTRACT

The easiness of mining from the rivers and its low cost have increased use of these resources. In the present study, the effects of pit migration and development on the bridge inline piers were investigated experimentally. The circular and sharp rectangular shapes of the piers have been employed in this study. The results showed that the pit holes are developed to the downstream and upstream bridge piers in order to achieve sediment balance, which causes piers scouring at downstream and upstream. Also, the development of the holes towards upstream pier is more than the downstream pier. Regarding to aero-dynamical shape of the rectangular sharp nose bridge, the magnitude of the scouring hole at the up and downstream is reduced 24.5 and 31.55% respectively as compared to circular piers. Finally, the empirical relationships related to the maximum length and depth of scouring were derived. By using these relationships, the geometric and effective statistical parameters on the pier scouring, as well as the relative error percentage and RMSE of the obtained functions were evaluated and the depended graphs were depicted. It was found for both sediment dimensions, by reduction of the hole depth and Fr number, the dimensionless parameter of the H/y (the pit holes depth to flow depth) is decreased and the L/y and B/y (the pit holes length and width to flow depth) parameters are increased. Finally, the parameters affecting the maximum length and depth of the pit scouring were identified and introduced for both sharp piers.

Keywords: river sand and gravel mining, pit hole, scouring length and depth, bridge piers, empirical relationships

بررسی آزمایشگاهی اثرات حفره برداشت شن و ماسه رودخانه‌ای بر روی پایه‌های پل مجاور

رسول دانشفراز^{۱*}، جعفر چابکپور^۲، مهدی دسینه^۳ و امیر قادری^۴

۱. دانشیار، گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه مراغه، مراغه، ایران

۲. استادیار، گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه مراغه، مراغه، ایران

۳. فارغ‌التحصیل کارشناسی ارشد سازه‌های هیدرولیکی، گروه مهندسی عمران، دانشگاه مراغه، مراغه، ایران

۴. دانشجوی دکتری سازه‌های هیدرولیکی، گروه مهندسی عمران، دانشگاه زنجان، زنجان، ایران

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۱۱/۸ - تاریخ بازنگری: ۱۳۹۷/۱۲/۲ - تاریخ تصویب: ۱۳۹۷/۱۲/۱۴)

چکیده

سهولت برداشت مصالح باکیفیت از رودخانه‌ها و هزینه‌های پایین آن، استفاده از این منابع را بیشتر نموده است. در این تحقیق به بررسی آزمایشگاهی تأثیر انتقال و توسعه گودال‌های ایجاد شده ناشی از برداشت مصالح رودخانه‌ای بر روی پایه‌های پل مجاور احداثی در مسیر جریان آب پرداخته و از پایه‌های پل دایره‌ای شکل و مستطیلی نوک‌تیز استفاده گردید. نتایج آزمایش‌ها نشان داد که حفره برداشت شده برای رسیدن به تعادل رسوب ورودی و خروجی تا پایه‌های پل مستقر در مجاورت گودال ادامه یافته و باعث فرسایش در اطراف هر دو پایه پل در بالادست و پایین‌دست محل خود می‌گردد. همچنین تأثیر حفره برداشت بر روی آبشستگی اطراف پایه پل بالادست بیشتر از پایه پل پایین‌دست می‌باشد. با توجه به شکل آئرودینامیکی دماغه پایه پل مستطیلی نوک‌تیز مقدار حداکثر عمق آبشستگی در اطراف پایه پل بالادست و پایین‌دست به ترتیب ۲۴/۵۰ و ۳۱/۵۵ درصد نسبت به پایه پل دایره‌ای شکل کاهش می‌یابد. در نهایت با ارائه روابط تجربی برای حداکثر طول و عمق آبشستگی حفره برداشت، عوامل هندسی و مؤثر بر روی آبشستگی پایه‌ها و درصد خطای نسبی و RMSE روابط بدست آمده ارزیابی و نمودارهای مربوط به آن‌ها جهت بررسی استخراج گردید. مشاهده گردید که در هر دو دانه‌بندی با کاهش عمق گودال‌ها و همچنین با کاهش Fr ، نسبت بی‌بعد H/y (نسبت ارتفاع گودال به عمق جریان) کاهش و نسبت‌های بی‌بعد B/y ، L/y (نسبت طول و عرض گودال به عمق جریان) افزایش می‌یابد. در نهایت پارامترهای تأثیرگذار در حداکثر طول و عمق آبشستگی گودال برای هر دو پایه پل دایره‌ای و مستطیلی نوک‌تیزی شناسایی و معرفی گردید.

واژه‌های کلیدی: برداشت مصالح رودخانه‌ای، گودال، عمق و طول آبشستگی، پایه‌های پل، روابط تجربی

مقدمه

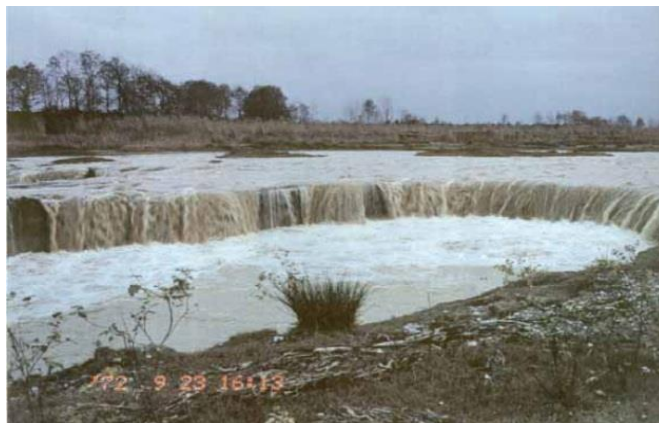
انسان به واسطه دخالت در عملکرد طبیعی رودخانه‌ها نظیر انجام فعالیت‌های عمرانی همانند سدسازی و انحراف آب به صورت مستقیم روی رودخانه‌ها تأثیرگذار می‌باشد. یکی از فعالیت‌های مخربی که بر رودخانه‌ها تحمیل می‌شود، برداشت شن و ماسه از بستر آن‌ها برای فعالیت‌های عمرانی است. برداشت شن و ماسه از رودخانه به دلیل قرار گرفتن در مسیر جریان آب و حذف مواد ضعیف و سست آن‌ها توسط سایش، منابع مطلوبی از مصالح بشمار می‌روند. گودال‌های ناشی از برداشت شن و ماسه ممکن است تا کیلومترها در مسیر رودخانه اصلی و شاخه‌های فرعی آن توسعه یابد و باعث ایجاد آثار منفی در برهم زدن تعادل طبیعی رودخانه-ها، ایجاد ناپایداری و ریزش کناره‌های رودخانه گردد که اولین نمود آن تعریض رودخانه می‌باشد. کف‌کنی و ریزش هم‌زمان کناره‌ها در نهایت موجب زیرشویی پایه پل‌ها و سایر سازه‌های

هیدرولیکی و حفاظتی موجود در مسیر رودخانه و تخریب آن‌ها می‌شود (Salehi Neishabouri & Ghodsiyan, 2005). در ایران در اثر برداشت شن و ماسه از مکان‌های نامناسب، پل‌های زیادی از قبیل پل بالارود، پل تاریخی پایلا و پل کهنک در استان خوزستان و پل تالار و علوی در استان مازندران تخریب شده که اهمیت بررسی بیشتر این پدیده را خاطر نشان می‌سازد (شکل ۱). در مورد اثرات برداشت شن و ماسه رودخانه‌ای تحقیق‌های متعددی صورت گرفته است. Lee et al. (1993) و Lee and Chen (1996) به مطالعه آزمایشگاهی اثرات برداشت شن و ماسه رودخانه‌ای پرداخته و نتایج آزمایش‌ها را به صورت معادلات رگرسیون برای ماکزیمم عمق آبشستگی و سرعت انتقال، طول مؤثر و شکل گودال‌ها ارائه نمودند. Neyshabouri et al. (2002) به بررسی جابجایی گودال مستطیلی شکل و تغییرات پروفیل طولی ناشی از برداشت شن و ماسه رودخانه‌ای با دانه‌بندی

را بیشتر بر روی اثرات دینامیکی برداشت شن و ماسه و تثبیت بستر با استفاده از درصد‌های مختلف کائولیت گذاشتند. Rezaie *et al.* (2018) به تأثیر افزودن رس و پلی‌اکریل‌آمید کاتیونی بر آبشستگی پایه‌های پل و گودال‌های ایجاد شده تحت اثر برداشت مصالح رودخانه پرداختند. نتایج آنان حاکی از تأثیر مثبت رس و پلی‌اکریل‌آمید کاتیونی در کاهش طول و عمق آبشستگی بود. نتایج آنان، نتایج تحقیقات Ghaderi *et al.* (2019) و Rezaie *et al.* (2018) در کنترل و کاهش فرسایش و آبشستگی تحت اضافه شدن مواد افزودنی به بستر متحرک را تأیید می‌کند. در سال‌های اخیر روش‌های استفاده از سازه‌های الحاقی نیز برای کنترل آبشستگی مورد توجه محققان مختلف بوده است. از مهمترین این روش‌ها می‌توان به استفاده از زبری، اسکرین‌های قائم در حوضچه‌های آرامش و تکنیک‌های مختلف مانند استفاده از کابل در پایه‌های پل اشاره نمود (Sadeghfam *et al.*, 2019; Daneshfaraz *et al.* 2017, 2019b, c, d, e).

Majedi Asl *et al.* (2019) به بررسی تأثیر گودال حاصل از برداشت مصالح در میزان آبشستگی اطراف گروه‌پایه‌ها پرداخته و برای کاهش اثر منفی این برداشت، از گروه‌پایه‌هایی با دورپیچ کابل به عنوان مسلح‌کننده استفاده کردند.

یکنواخت پرداختند. آن‌ها برای گودال با عمق ثابت نشان دادند که با افزایش طول یا عرض گودال، میزان پرشدگی گودال افزایش می‌یابد که در این راستا اثرات عرض گودال مهم‌تر از اثرات طول آن می‌باشد. Sadeghi *et al.* (2008) به مطالعه اثرات برداشت شن و ماسه بر روی رسوبات بستر رودخانه در استان مازندران پرداختند. نتایج آزمایش‌ها نشان داد که مقادیر D_{90}, D_{50}, D_{10} رسوبات موجود در بستر رودخانه پس از برداشت شن و ماسه، کاهش یافته است. (Daneshfaraz *et al.* (2019a) به بررسی حداکثر عمق و طول انتقال گودال‌های ایجاد شده تحت اثر برداشت مصالح رودخانه‌ای پرداخته و نتایج تحقیق آنها نشان داد که با کاهش عدد فرود و کاهش عمق گودال‌ها و همچنین با ایجاد جریان ثانویه در داخل گودال‌ها، نسبت بی‌بعد ارتفاع گودال به عمق جریان کاهش، طول و عرض گودال به عمق جریان افزایش می‌یابد (Cantelli and Muto (2014) به بررسی اثرات برداشت شن و ماسه در شرایط آزمایشگاهی با بستر رسوبی برای جریان فوق‌بحرانی پرداختند. نتایج آزمایش‌ها نشان داد که برداشت شن و ماسه از بستر رودخانه باعث برهم زدن تعادل رودخانه و کاهش سطح تراز بستر می‌شود. (Grimaud *et al.* (2016) به مطالعه آزمایشگاهی اثرات برداشت شن و ماسه در یک میکروفلوم با بستر چسبیده متشکل از سیلیکا و کائولیت پرداختند. آن‌ها تمرکز خود



شکل ۱. نمایی از گودال ایجاد شده ناشی از برداشت شن و ماسه در رودخانه تالار و آبشستگی پایه‌های پل رودخانه تالار

اثر گودال‌های ایجاد شده بر روی سازه‌های در مجاورت و مسیر جریان آب، حفر گردید. تغییرات عمق آب نیز برای نقاط مختلف بالادست و پایین‌دست و اطراف گودال‌ها برای هر دو دانه‌بندی قرائت و مدت زمان لازم برای هر آزمایش ۲/۵ ساعت (برای رسیدن به زمان تعادل) در نظر گرفته شد. طبق مطالعات Raudkivi & Ettema (1983) زمان تعادل مدت زمانی معرفی شد که در دو یا سه ساعت متوالی بیش از ۱ میلی‌متر آبشستگی رخ ندهد. در آزمایش‌های انجام شده در این پژوهش از معیار Raudkivi & Ettema (1983) برای تعیین زمان تعادل استفاده شد. برای این منظور، ابتدا آزمایشی به مدت ۳ ساعت (معادل ۱۸۰ دقیقه) انجام و تغییرات عمق آبشستگی با استفاده از سنسور لیزری با دقت ۰/۵ میلی‌متر اندازه‌گیری شد. با مقایسه نتایج حاصل از آبشستگی‌های اندازه‌گیری شده، زمان تعادل ۲/۵ ساعت (معادل ۱۵۰ دقیقه) حاصل گردید. هر ۳۰ دقیقه، عمق آب برای نقاط مختلف ثبت و اسکن برداری از پروفیل بستر با استفاده از اسکنر سه بعدی لیزری انجام شد. این روند برای هر آزمایش در زمان‌های ۵ تا ۳۰ دقیقه تکرار شده است. برای مقایسه تغییرات عمق گودال و انتقال آن به سمت پایه‌های پل در زمان‌های مختلف ابتدا برای زمان $t=0$ قبل از وارد شدن جریان به کانال، اسکن برداری انجام گرفت. اسکنر سه بعدی استفاده شده در تحقیق حاضر شامل یک سنسور لیزری و یک سنسور التراسونیک است. سنسور لیزری می‌تواند فاصله ۲۰۰ الی ۱۰۰۰۰ میلی‌متری را با دقت یک میلی‌متر اندازه‌گیری نماید. شکل (۲) اسکنر سه بعدی، شکل (۳) گودال‌های ایجاد شده در بستر فلوم و شکل (۴) نمای شماتیک از گودال‌های ایجاد شده در کف بستر متحرک به همراه پایه‌های پل را نشان می‌دهند.

در جدول (۱) شرایط هیدرولیکی و هندسی برای انجام آزمایش‌ها ارائه شده است.

اکثر تحقیق‌ها و آزمایش‌های انجام شده توسط محققین بر روی نحوه و اثرات جابجایی حفره ناشی از برداشت شن و ماسه بدون در نظر گرفتن وجود پایه‌های پل در مجاورت این گودال‌ها بوده است. تحقیق حاضر به بررسی اثرات انتقال و توسعه گودال ایجاد شده ناشی از برداشت مصالح رودخانه‌ای بر روی سازه‌های احداثی در مجاورت و مسیر جریان آب از جمله پایه‌های پل با اشکال مختلف، برای دانه‌بندی‌های یکنواخت و غیریکنواخت در شرایط جریان زیربحرانی، با عمق گودال‌ها و دبی‌های مختلف پرداخته است. همچنین یک سری روابط تجربی نیز برای پیش‌بینی حداکثر عمق و طول آبشستگی انتقال گودال با وجود پایه‌های پل ارائه گردید.

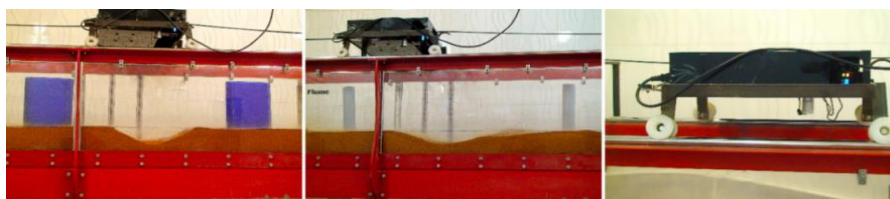
مواد و روش‌ها

مدل آزمایشگاهی

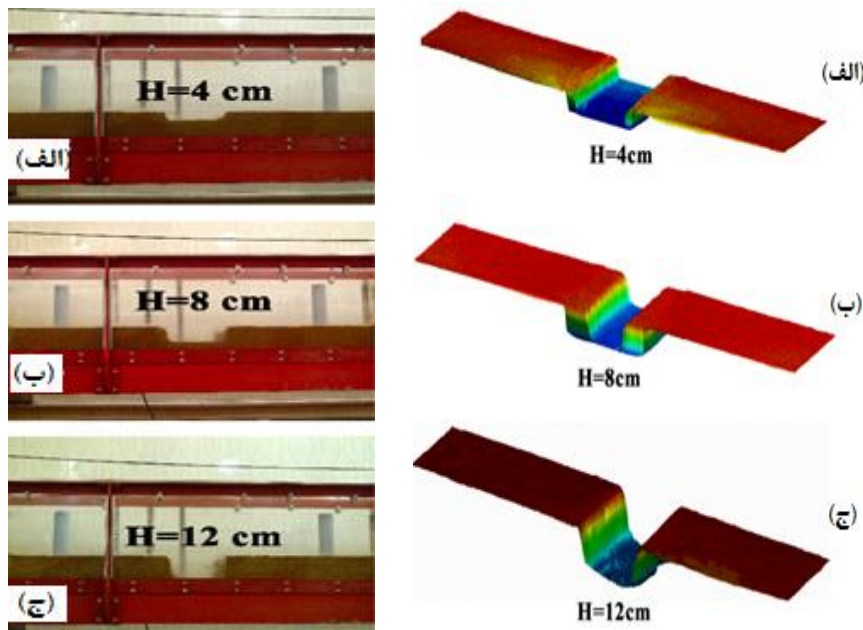
آزمایش‌های این تحقیق در یک فلوم آزمایشگاهی با مقطع مستطیلی شکل به طول ۵ متر، عرض ۰/۳ متر و ارتفاع ۰/۴۵ متر با شیب ثابت در آزمایشگاه هیدرولیک دانشگاه مراغه انجام شده است. جریان در کانال توسط دو پمپ که هر کدام با حداکثر دبی ۷/۵ لیتر بر ثانیه متصل به یک مخزن در ابتدای کانال است، تأمین گردید. دبی جریان نیز توسط شیرهای متصل به دو روتامتر منصوب در خروجی پمپ‌ها اندازه‌گیری شد. برای انجام آزمایش‌ها ابتدا در کف فلوم دو کف‌بند از جنس پلی‌اتیلن با زبری نزدیک به پلکسی‌گلس با ارتفاع ۱۲ سانتی‌متر و فاصله ۱۵۰ سانتی‌متر از همدیگر ایجاد شد. سپس مابین این دو کف‌بند با استفاده از سنگ‌دانه‌هایی با ذرات رسوبی ۰/۱۵ و ۰/۶ میلی‌متر، بستر متحرک ایجاد شد. در سطح این بستر، گودال‌هایی به شکل مستطیل به عمق‌های ۴، ۸ و ۱۲ سانتی‌متر و به طول ۲۲ سانتی‌متر و هم‌عرض با عرض کانال (۳۰ سانتی‌متر) برای بررسی

جدول ۱. شرایط هیدرولیکی و هندسی تحقیق حاضر

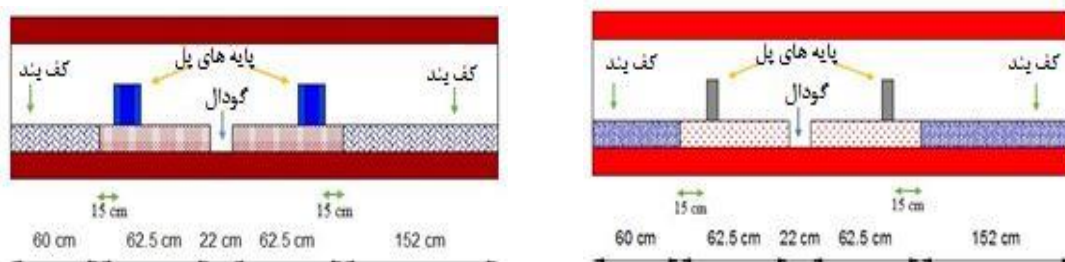
دبی (لیتر بر ثانیه)	عمق نرمال (سانتی‌متر)	سرعت نسبی (بی‌بعد)	عدد فرود (بی‌بعد)	طول گودال (سانتی‌متر)	عرض گودال (سانتی‌متر)	عمق گودال (سانتی‌متر)
۳	۲/۲	۰/۸۳	۰/۹۷	۲۲	۳۰	۴-۸-۱۲
۴	۲/۸	۰/۸۹	۰/۹۱	۲۲	۳۰	۴-۸-۱۲
۵	۳/۳	۰/۹۴	۰/۸۹	۲۲	۳۰	۴-۸-۱۲
۶	۴	۱	۰/۸۰	۲۲	۳۰	۴-۸-۱۲



شکل ۲. اسکنر سه بعدی برای برداشت پروفیل بستر متحرک



شکل ۳. گودال‌های ایجاد شده در کف بستر



شکل ۴. نمای شماتیک از گودال‌های ایجاد شده در کف بستر

پایه‌های پل، در فاصله ۱۵ سانتی‌متری از کف‌بند ایجاد شده در بالادست و پایین دست واقع شده است. ابعاد پایه پل نباید بیشتر از ۱۰ درصد عرض کانال باشد تا از اثرات دیواره کانال بر روی آبشستگی جلوگیری نماید (Chiew and Milvelli, 1987). در این تحقیق عرض کانال مورد آزمایش ۱۰ برابر بزرگ‌تر از ابعاد پایه پل می‌باشد که تمام ضوابط داده شده توسط محققین را برآورده می‌کند. شکل (۵) نحوه قرارگیری پایه‌های پل در بستر متحرک را نشان می‌دهد.

مدل پایه‌های پل

در این تحقیق، از مدل پایه‌های پل دایره‌ای شکل و مستطیلی نوک‌تیز به ترتیب با اندازه‌هایی به قطر ۳ سانتی‌متر و نسبت طول به عرض ۳ با ارتفاع پایه پل ۴۸ سانتی‌متری در تمام آزمایش‌ها استفاده شده است. جنس پایه‌های پل به دلیل نزدیکی به زبری پلکسی‌گلس و پلی‌اتیلن از PVC برای مدل پایه پل دایره‌ای شکل و پلی‌اتیلن برای مدل مستطیلی نوک‌تیز انتخاب شده است. نحوه قرارگیری پایه پل برای هر دو مدل در کف بستر متحرک به گونه‌ای است که برای نشان دادن بهتر اثرات آبشستگی در اطراف



شکل ۵. مدل پایه‌های پل

(الف) دایره‌ای شکل، (ب) مستطیلی نوک‌تیز

مشخصات ذرات رسوبی تشکیل دهنده بستر:

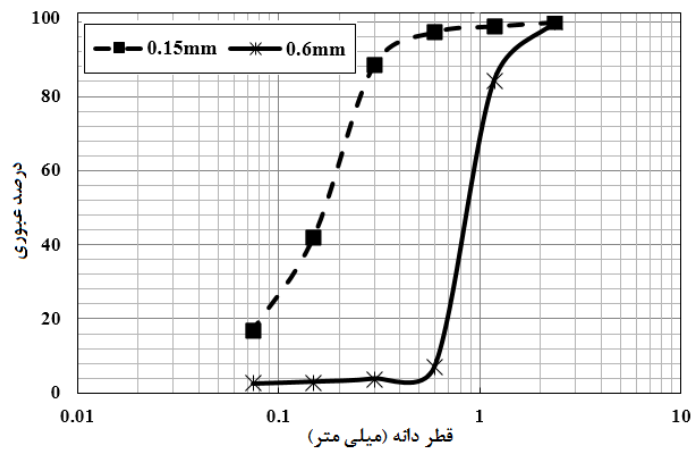
در این تحقیق، نتایج دانه‌بندی با استفاده از الک‌های استاندارد نشان می‌دهد که اندازه متوسط ذرات بستر (d_{50}) برای هر دو دانه‌بندی به ترتیب برابر ۰/۱۵ و ۰/۶ میلی‌متر می‌باشد. شکل (۶) منحنی دانه‌بندی را برای هر دو دانه‌بندی ذکر شده نشان می‌دهد. انحراف معیار استاندارد هندسی اندازه دانه‌ها با توجه به رابطه $\sigma_g = (d_{84}/d_{16})^{0.5}$ برای دانه‌بندی‌های ۰/۱۵ و ۰/۶ میلی‌متر به ترتیب برابر ۱/۹۳ و ۱/۳۷ می‌باشد. در این رابطه، اگر انحراف معیار استاندارد هندسی کوچک‌تر از ۱/۵ باشد مصالح به صورت یکنواخت و اگر بزرگ‌تر از ۱/۵ باشد، مصالح به صورت غیریکنواخت محسوب می‌شود (Shafaei Bejestan, 2005). در این آزمایش‌ها مصالح بکار رفته برای دانه‌بندی‌های ۰/۱۵ و ۰/۶ میلی‌متری به ترتیب به صورت غیریکنواخت و یکنواخت است. این ذرات طوری انتخاب شده‌اند که حداکثر مقدار آبهستگی ایجاد شود. اگر نسبت عرض یا قطر پایه پل به اندازه دانه‌ها ($D/d_{50} > 25$) از حدود ۲۵ تجاوز کند شرط ذکر شده برقرار است (Melville, 1997; Oliveto & Hager, 2002). در این

آزمایش‌ها، نسبت D/d_{50} برای دانه‌بندی‌های ۰/۱۵ و ۰/۶ میلی-متر به ترتیب ۲۰۰ و ۵۰ می‌باشد. همچنین برای ممانعت از تشکیل ریپل^۲ در سرعت‌های نزدیک به آستانه حرکت، قطر رسوبات باید از ۰/۶ میلی‌متر بیشتر باشد (Raudkivi & Ettema, 1983) تا شرایط گفته شده توسط محققین برآورده شود.

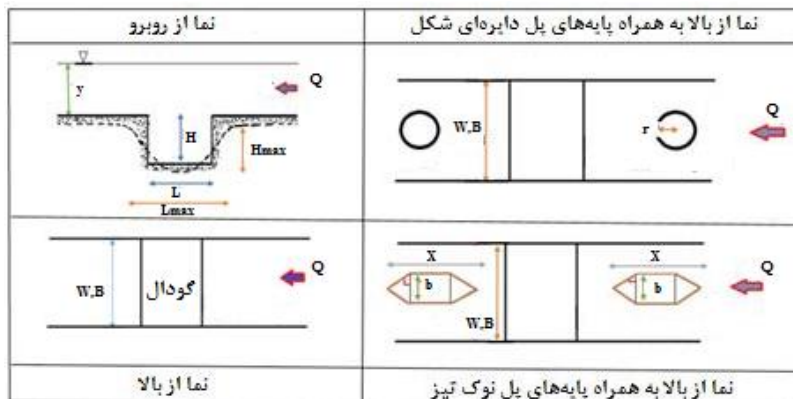
آنالیز ابعادی

برای بیان موقعیت و ابعاد گودال ایجاد شده ناشی از برداشت شن و ماسه و اثرات آن بر روی پایه‌های پل دایره‌ای شکل و مستطیلی نوک‌تیز، حداکثر عمق و طول آبهستگی به عنوان متغیرهای وابسته در نظر گرفته شدند. لذا مطابق شکل (۷) پارامترهای مؤثر برای آنالیز ابعادی عبارت‌اند از:

- (۱) مشخصات هندسی گودال و پایه‌های پل شامل $(H, L, B, r, X/b, \alpha)$
- (۲) مشخصات هیدرولیکی شامل (y, V, g, u_{*cr}, ϕ)
- (۳) مشخصات مربوط به آب و رسوب شامل $(d_{50}, \gamma_s, \gamma_w, \nu)$ می‌باشد.



شکل ۶. منحنی دانه‌بندی رسوبات تشکیل دهنده بستر



شکل ۷. نمایی از گودال‌ها و پایه‌های پل ایجاد شده

$$\frac{H_{max}}{H} = f_3\left(\frac{H}{y}, \frac{L}{y}, \frac{B}{y}, \frac{r}{y}, \frac{u_{scr}}{V}, \phi, \frac{d_{50}}{y}, Fr^2\right) \quad (\text{رابطه ۳})$$

با روشی مشابه برای حداکثر طول آبستگي (L_{max}) نیز معادلات بی بعد به صورت زیر به دست آمد:

$$\frac{L_{max}}{H} = f_4\left(\frac{H}{y}, \frac{L}{y}, \frac{B}{y}, \frac{r}{y}, \frac{u_{scr}}{V}, \phi, \frac{d_{50}}{y}, Fr^2\right) \quad (\text{رابطه ۴})$$

همچنین برای محاسبه ماکزیمم عمق آبستگي (H_{max}) پایه پل مستطیلی نوک تیز، با استفاده از روش پی باکینگهام و صرف نظر کردن از عدد رینولدز و مقدار ثابت G_s تابعی به صورت زیر تعریف شد:

$$\frac{H_{max}}{H} = f_5\left(\frac{H}{y}, \frac{L}{y}, \frac{B}{y}, \frac{X}{b}, \alpha, \frac{u_{scr}}{V}, \phi, \frac{d_{50}}{y}, Fr^2\right) \quad (\text{رابطه ۵})$$

با روشی مشابه برای حداکثر طول آبستگي (L_{max}) نیز تابع بدون بعد زیر ارائه گردید:

$$\frac{L_{max}}{H} = f_6\left(\frac{H}{y}, \frac{L}{y}, \frac{B}{y}, \frac{X}{b}, \alpha, \frac{u_{scr}}{V}, \phi, \frac{d_{50}}{y}, Fr^2\right) \quad (\text{رابطه ۶})$$

نتایج

بررسی مکانیزم و نحوه انتقال و توسعه گودال‌های ایجاد شده به پایه‌های پل مجاور شکل (۸) انتقال حفره برداشت مصالح به پایه‌های پل مستقر در بالادست و پایین دست را نشان می‌دهد.

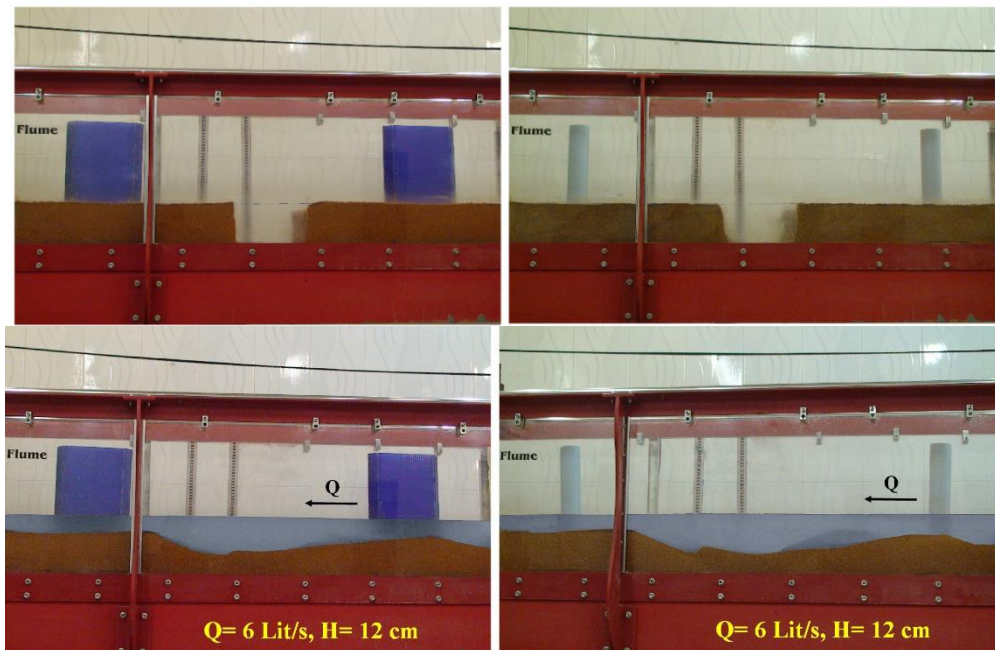
که در آن B عرض گودال، L طول گودال، H ارتفاع گودال، r شعاع پایه پل دایره‌ای شکل، X/b نسبت بی بعد طول پایه پل مستطیلی نوک تیز به عرض آن، α زاویه بین رأس پایه با راستای قائم، g شتاب گرانش، y عمق جریان، V سرعت جریان، u_{scr} سرعت برشی بحرانی ذرات رسوبی، ϕ زاویه ایستایی مصالح داخل آب، γ_w وزن مخصوص آب، γ_s وزن مخصوص ذرات رسوبی، d_{50} قطر ذرات رسوبی و v لزجت سینماتیکی آب می‌باشند. لذا برای محاسبه ماکزیمم عمق آبستگي (H_{max}) پایه پل دایره‌ای شکل، تابعی به صورت زیر تعریف شد:

$$H_{max} = f_1(H, L, B, r, y, V, u_{scr}, \phi, \gamma_w, \gamma_s, d_{50}, v, t) \quad (\text{رابطه ۱})$$

عمق آبستگي (H_{max}) پس از رسیدن به زمان تعادل، تابعی از t نبوده و با استفاده از روش پی باکینگهام می‌توان معادله وابسته و معادلات بی بعد را به صورت زیر نوشت:

$$\frac{H_{max}}{H} = f_2\left(\frac{H}{y}, \frac{L}{y}, \frac{B}{y}, \frac{r}{y}, \frac{u_{scr}}{V}, \phi, \frac{\gamma_s}{\gamma_w} = G_s, \frac{d_{50}}{y}, \frac{Vy}{v}, \frac{V^2}{gy}\right)$$

عبارت Vy/v معادل عدد بی بعد رینولدز می‌باشد و با محاسبه عدد رینولدز که در تمام آزمایش‌ها از مقدار ۹۱۰۰ بیشتر می‌باشد و آشفتگی بودن نوع جریان در همه آزمایش‌ها و از طرفی دیگر با توجه به مقدار ثابت G_s در تمام آزمایش‌ها از هر دو عبارت فوق صرف نظر شد:



شکل ۸. انتقال حفره برداشت مصالح به پایه‌های پل مستقر در بالادست و پایین دست

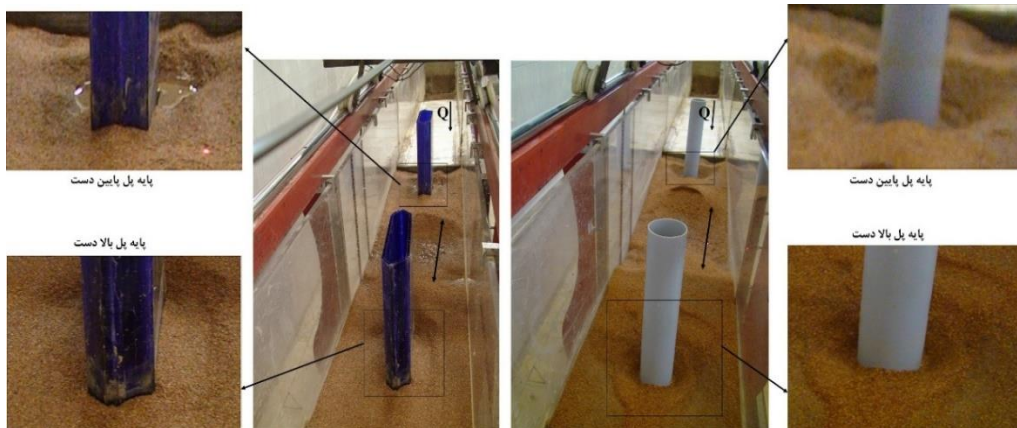
گودال، به دلیل افزایش شیب و ایجاد جریان بحرانی در بالادست حفره، نیمرخ m^2 ایجاد شده و با کاهش عمق و افزایش سرعت در بالادست و قبل از ورود به گودال برداشت مصالح رودخانه، لبه

با توجه به شکل (۸) مشاهده می‌گردد که با برداشت شن و ماسه رودخانه‌ای و ایجاد حفره، تعادل قبلی بین میزان آورد رسوب و ظرفیت انتقال آن بهم‌خورده به طوری که با ایجاد

می‌باشد که منجر به ناپایداری سازه و بعضاً تخریب پایه‌های پل می‌گردد. مطابق شکل حفره برداشت شده برای رسیدن به تعادل رسوب ورودی و خروجی، به پایه پل پایین دست رسیده و باعث فرسایش در اطراف هر دو پایه پل در بالادست و پایین دست محل خود شده است. همچنین مشخص گردید که تأثیر حفره برداشت بر روی آبشستگی اطراف پایه پل بالادست بیشتر از پایه پل پایین دست می‌باشد.

تأثیر شکل پایه و عمق گودال بر آبشستگی اطراف پایه‌های مجاور در اثر انتقال و توسعه حفره برداشت شن و ماسه
 شکل (۹) آبشستگی ایجاد شده در اطراف پایه‌های پل دایره‌ای شکل و مستطیلی نوک‌تیز در بالادست و پایین دست گودال برداشت را نشان می‌دهد.

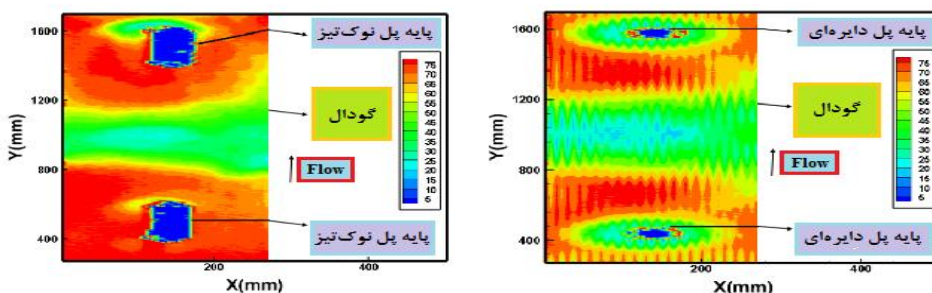
بالادست گودال به سمت بالادست حرکت می‌کند. ولی به هنگام وارد شدن جریان همراه با بار بستر به داخل گودال عمق جریان آب افزایش و سرعت کاهش می‌یابد، بنابراین جریان قادر به حمل رسوبات بزرگ‌تر نبوده، در نتیجه رسوبات بزرگ‌تر در دیواره بالادست و داخل گودال ته‌نشین می‌شوند. چنانچه میزان رسوبی که به همراه جریان از محل گودال می‌گذرد کمتر از ظرفیت حمل رسوب باشد، موقعی که به مکان پایین‌تری می‌رسد، مقدار بیشتری از رسوبات را برمی‌دارد که این امر باعث شستگی و از بین رفتن بستر پایین دست و حرکت به سمت پایین دست می‌شود. این پدیده تا جایی که میزان رسوب ورودی و خروجی در محل به تعادل برسد و محل بازسازی شود ادامه دارد. یکی از آثار مستقیم رسوب‌گذاری در بالادست و فرسایش در پایین دست حفره به‌صورت آبشستگی در پایه‌های پل در مجاورت حفره برداشت



شکل ۹. توسعه گودال و آبشستگی اطراف پایه‌های پل مجاور

جریان به پایه‌ها خود عاملی برای آبشستگی اطراف پایه‌ها می‌باشد. ولی در این تحقیق ارزیابی در شرایط وجود گودال برداشت مصالح انجام شده است. همچنین توسعه آبشستگی (دامنه و محدوده آبشستگی) در پشت پایه مستطیلی نوک‌تیز نسبت به پایه دایره‌ای شکل کمتر می‌باشد. شکل (۱۰) تغییرات دو بعدی انتقال گودال برای پایه‌های پل دایره‌ای شکل و مستطیلی نوک‌تیز در بالادست و پایین دست گودال را برای دبی حداکثر ۶ لیتر بر ثانیه نشان می‌دهد.

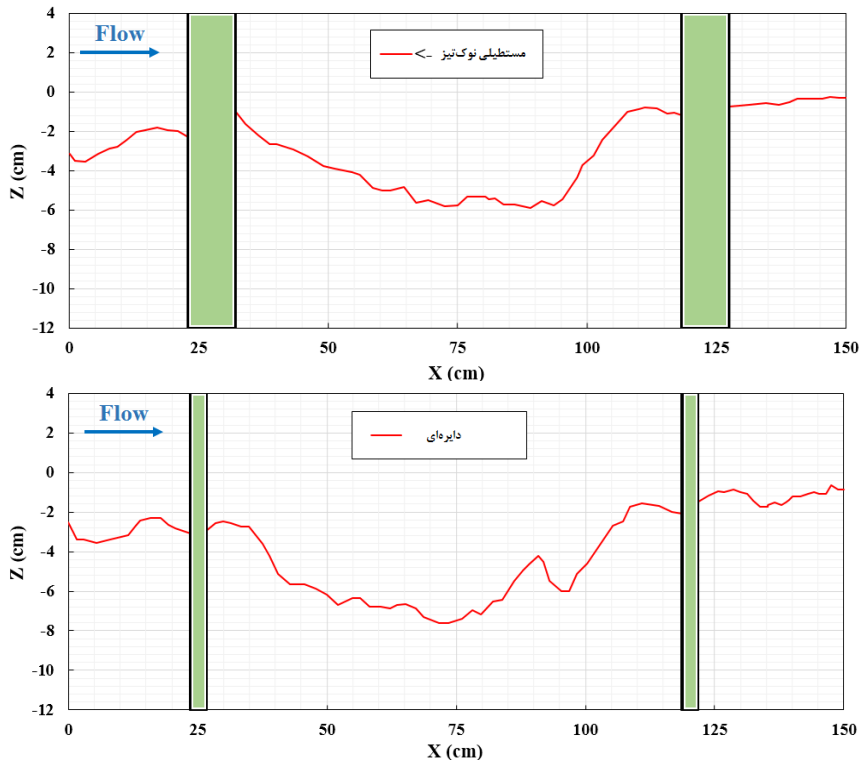
مشاهده می‌گردد که گودال برداشت مصالح برای رسیدن به تعادل رسوبات ورودی و خروجی به سمت هر دو پایه پل توسعه یافته است که شدت آن در پایه پل بالادست بیشتر می‌باشد. همچنین به دلیل شکل تیز و آئرودینامیکی دماغه پایه پل مستطیلی نوک‌تیز، آبشستگی اولیه در جلوی دماغه شدت کمتری نسبت به پایه دایره‌ای شکل دارد. علت این امر کاهش و کنترل قدرت گردابه‌های نعل اسبی توسط دماغه پایه پل مستطیلی نوک‌تیز می‌باشد. نکته قابل ذکر اینکه در هر دو پایه برخورد



شکل ۱۰. تغییرات دو بعدی انتقال و توسعه گودال برداشت برای هر دو شکل پایه‌های پل مجاور

بیشتر از پایه‌های پل مستطیلی نوک‌تیز می‌باشد. برای تفهیم بهتر، شکل (۱۱) پروفیل طولی آبشستگی پایه‌های پل دایره‌ای شکل و مستطیلی نوک‌تیز را در اثر توسعه و انتقال گودال برداشت برای دبی ۵ لیتر بر ثانیه نشان می‌دهد.

مشاهده می‌شود علاوه بر انتقال گودال به پایه‌های پل، جریان گردابی ایجاد شده در پایه‌های پل دایره‌ای شکل به دلیل سطح مقطع پایه، بیشتر از پایه‌های پل مستطیلی نوک‌تیز است. به همین دلیل آبشستگی در اطراف پایه‌های پل دایره‌ای شکل



شکل ۱۱. پروفیل طولی آبشستگی پایه‌های مجاور گودال برداشت در دبی ۵ لیتر بر ثانیه

و گردابه‌های نعل اسبی و برخاستگی می‌باشد. با افزایش دبی، تأثیر توسعه و انتقال گودال برداشت بر روی آبشستگی اطراف پایه‌های پل بخصوص در پایه پل بالادست مشهود می‌باشد. شکل (۱۳) تأثیر عمق گودال برداشت بر روی پروفیل طولی آبشستگی ایجاد شده در اطراف پایه‌های پل مجاور (دایره‌ای و مستطیلی نوک‌تیز) را در دبی ۶ لیتر بر ثانیه نشان می‌دهد. با دقت بر روی شکل (۱۳) مشاهده می‌گردد که در شرایط هیدرولیکی جریان یکسان، هر چه عمق برداشت مصالح بیشتر باشد، روند انتقال و توسعه گودال برای رسیدن به تعادل بیشتر بوده و تأثیر بیشتری بر روی پایه‌های مجاور بخصوص پایه پل بالادست خواهد داشت.

بررسی حداکثر عمق و طول آبشستگی گودال با حضور پایه‌های پل

معادلات تجربی برای حداکثر عمق آبشستگی گودال و انتقال آن به پایه‌های پل دایره‌ای شکل و مستطیلی نوک‌تیز در هر دو دانه-بندی به ترتیب به صورت رابطه (۷) و (۸) ارائه شد:

در شکل ۱۱ به وضوح مشخص است که پایه پل مستطیلی نوک‌تیز در کنترل و کاهش قدرت گردابه‌های نعل اسبی در جلوی دماغه و همچنین حذف گردابه‌های برخاستگی در پشت دماغه پل نسبت به پایه پل دایره‌ای شکل بهتر عمل کرده و مقادیر عمق آبشستگی و توسعه پروفیل آبشستگی در اطراف پایه مستطیلی نوک‌تیز کمتر از پایه پل دایره‌ای شکل می‌باشد. به طوری که در شرایط یکسان مقدار حداکثر عمق آبشستگی در اطراف پایه پل بالادست و پایین‌دست به ترتیب ۲۴/۵۰ و ۳۱/۵۵ درصد با وجود پایه پل مستطیلی نوک‌تیز نسبت به پایه پل دایره‌ای شکل کاهش می‌یابد. شکل (۱۲) نحوه انتقال و توسعه گودال برداشت مصالح به همراه پروفیل طولی آبشستگی اطراف پایه‌های پل مجاور (دایره‌ای و مستطیلی نوک‌تیز) را در دبی‌های مختلف و عمق برداشت ۸ سانتی‌متر نشان می‌دهد.

مشاهده می‌گردد که در دبی‌های پایین، تأثیر گودال برداشت مصالح بر روی آبشستگی اطراف پایه‌های پل کم بوده و آبشستگی موضعی اطراف آن بیشتر در اثر برخورد جریان با پایه‌ها

(رابطه ۷)

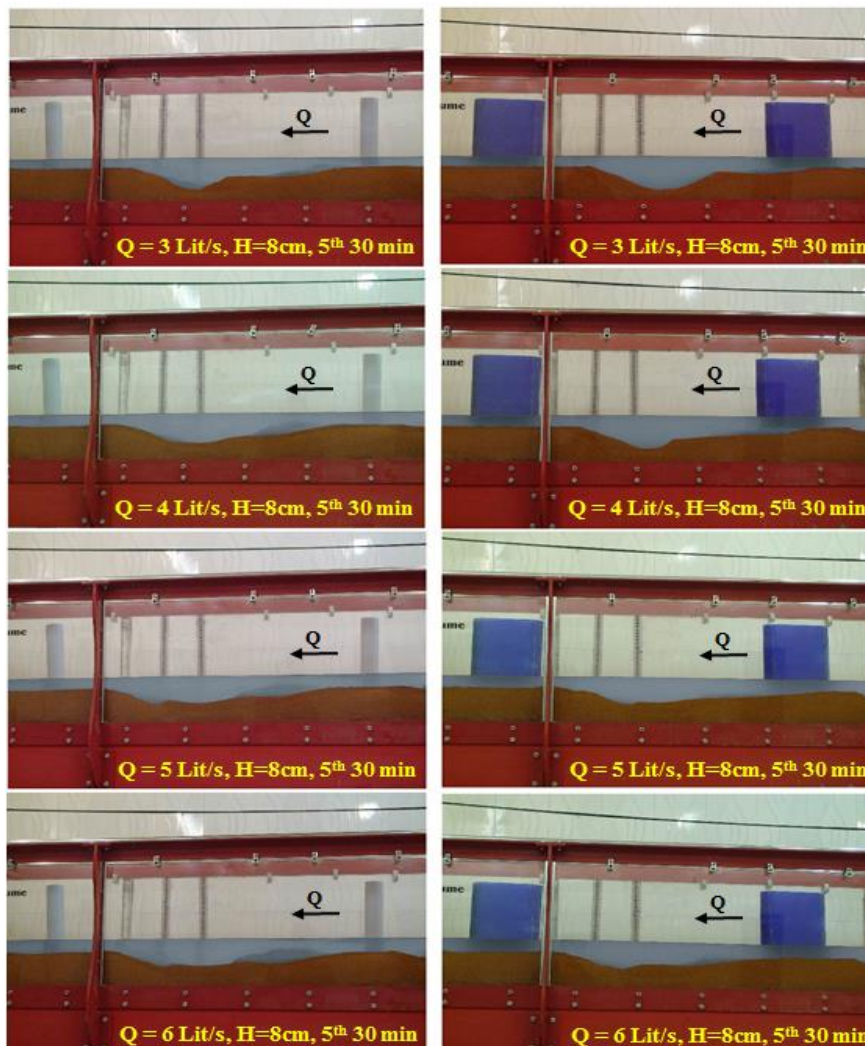
$$\frac{H_{max}}{H} = 0.1645 \left(\frac{H}{y}\right)^{-0.66} \left(\frac{L}{y}\right)^{0.34} \left(\frac{B}{y}\right)^{0.37} \left(\frac{L}{y}\right)^{0.15} (Fr)^{-0.204} \left(\frac{u_{*cr}}{V}\right)^{0.34} (\phi)^{0.95} \left(\frac{d_{50}}{y}\right)^{-0.113}$$

طبق رابطه (۷) مشاهده می‌شود حداکثر عمق آبستگی گودال (H_{max}/H) در حضور پایه‌های پل دایره‌ای شکل، با پارامترهای بدون بعد L/y , B/y , u_{*cr}/V و ϕ رابطه مستقیم و با پارامترهای بدون بعد H/y , d_{50}/y و Fr رابطه عکس دارد. همچنین از بین پارامترهای ذکر شده در بالا ϕ بیشترین تأثیر را در افزایش H_{max}/H و همچنین H/y بیشترین تأثیر را در کاهش H_{max}/H دارد. با استفاده از قانون ۷۰ به ۳۰، ۷۰ درصد داده‌ها برای استخراج ضرایب و توان روابط و ۳۰ درصد باقیمانده برای صحت‌سنجی روابط بکار برده شد. درصد خطای نسبی و همچنین خطای RMSE به ترتیب ۱۰/۸۳٪ و ۰/۲۳ برای حالت استفاده از پایه‌های پل دایره‌ای شکل در بالادست و پایین دست گودال می‌باشد که بیانگر تطابق خوبی بین داده‌های آزمایشگاهی و محاسباتی می‌باشد.

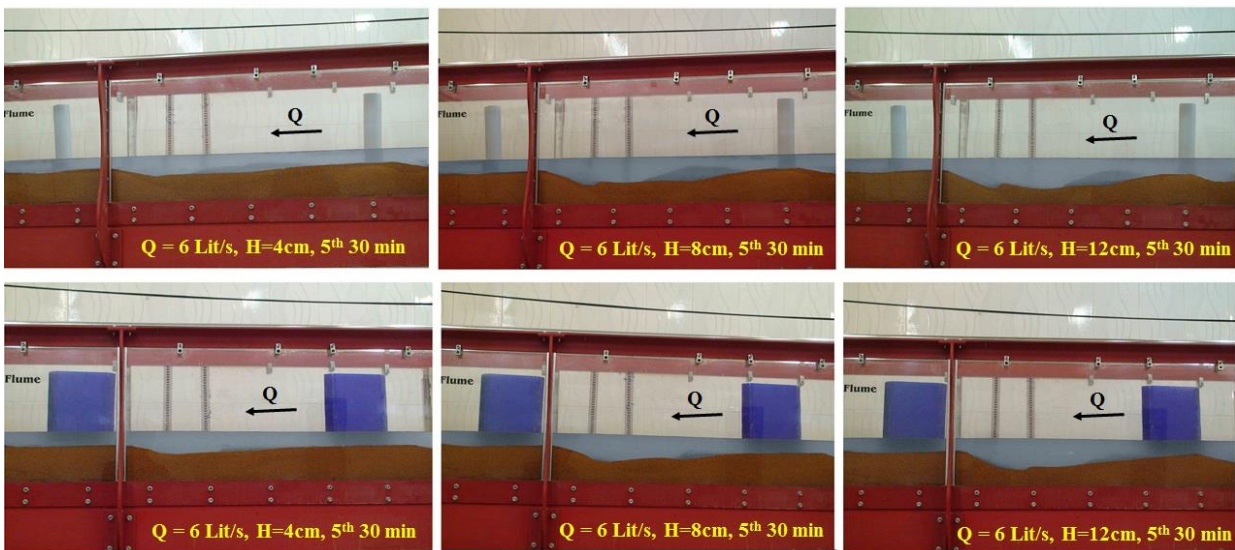
(رابطه ۸)

$$\frac{H_{max}}{H} = 1.18 \left(\frac{H}{y}\right)^{-0.741} \left(\frac{L}{y}\right)^{-0.0732} \left(\frac{B}{y}\right)^{0.77} \left(\frac{X}{b}\right)^{0.9} (\alpha)^{1.017} (Fr)^{-0.88} \left(\frac{u_{*cr}}{V}\right)^{0.48} (\phi)^{1.009} \left(\frac{d_{50}}{y}\right)^{-0.0414}$$

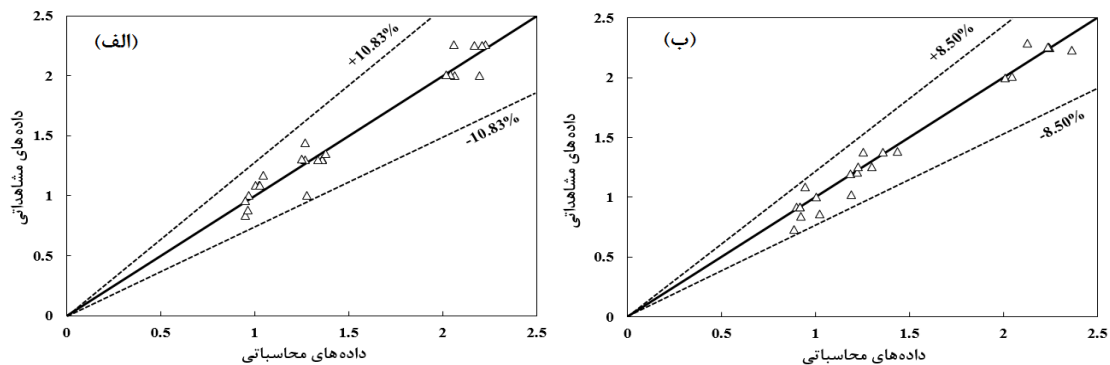
طبق رابطه (۸) مشاهده می‌شود حداکثر عمق آبستگی گودال (H_{max}/H) در حضور پایه‌های پل مستطیلی نوک‌تیز، با پارامترهای بدون بعد X/b , B/y , u_{*cr}/V و α و ϕ رابطه مستقیم و با پارامترهای بدون بعد H/y , L/y , d_{50}/y و Fr رابطه عکس دارد. از بین پارامترهای ذکر شده در بالا α و ϕ بیشترین تأثیر را در افزایش H_{max}/H و همچنین Fr نیز بیشترین تأثیر را در کاهش H_{max}/H دارد. درصد خطای نسبی و همچنین خطای RMSE به ترتیب ۰/۸۵٪ و ۰/۱۳ برای حالت استفاده از پایه‌های پل مستطیلی نوک‌تیز در بالادست و پایین دست گودال می‌باشد که بیانگر تطابق خوبی بین داده‌های آزمایشگاهی و محاسباتی می‌باشد. شکل (۱۴) نشان‌دهنده تغییرات H_{max}/H آزمایشگاهی به H_{max}/H محاسباتی (حالت کلی) می‌باشد.



شکل ۱۲. تأثیر دبی بر روی آبستگی ایجاد شده در اطراف پایه‌های پل در اثر توسعه گودال برداشت مصالح



شکل ۱۳. تأثیر عمق گودال برداشت بر روی پروفیل طولی آبشستگی ایجاد شده در اطراف پایه‌های پل مجاور



شکل ۱۴. تغییرات H_{max}/H آزمایشگاهی به H_{max}/H محاسباتی (حالت کلی)

(الف) پایه پل دایره‌ای شکل، (ب) پایه پل مستطیلی نوک تیز

حالت پایه‌های پل دایره‌ای شکل محاسبه شد. با توجه به رابطه (۱۰) مشاهده می‌شود حداکثر طول آبشستگی گودال (L_{max}/H) در حضور پایه‌های پل مستطیلی نوک-تیز، با پارامترهای L/y ، d_{50}/y ، Fr ، ϕ و α رابطه مستقیم و با پارامترهای H/y ، B/y ، X/b ، u_{cr}/V رابطه عکس دارد. از بین پارامترهای ذکر شده Fr بیشترین تأثیر را در افزایش L_{max}/H و همچنین u_{cr}/V بیشترین تأثیر را در کاهش L_{max}/H دارد.

(رابطه ۱۰)

$$\frac{L_{max}}{H} = 0.000402 \left(\frac{H}{y}\right)^{-1.18} \left(\frac{L}{y}\right)^{0.033} \left(\frac{B}{y}\right)^{-0.35} \left(\frac{X}{b}\right)^{-2.6} (\alpha)^{1.63} (Fr)^{2.74} \left(\frac{u_{cr}}{V}\right)^{-5.35} (\phi)^{2.12} \left(\frac{d_{50}}{y}\right)^{0.488}$$

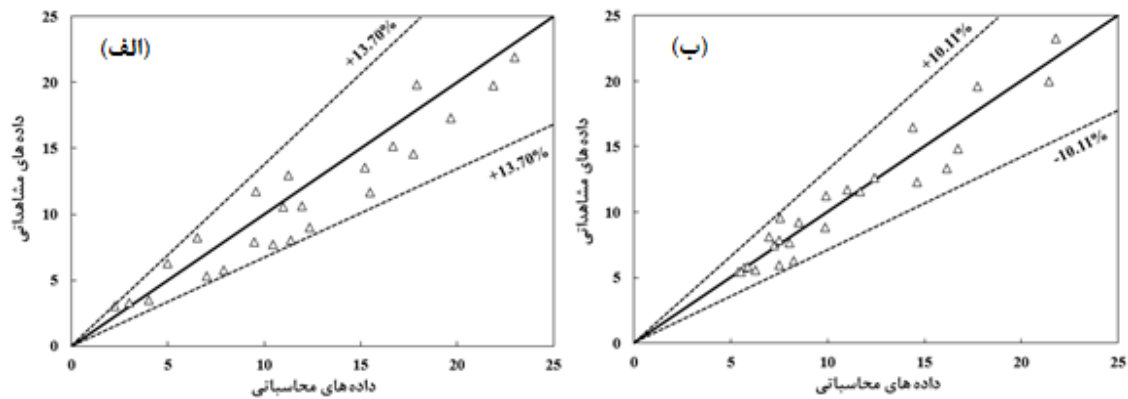
درصد خطای نسبی و همچنین خطای RMSE به ترتیب ۱۱/۱۰٪ و ۳/۷ برای حالت استفاده از پایه‌های پل مستطیلی نوک تیز در بالادست و پایین دست گودال می‌باشد که بیانگر تطابق خوب بین داده‌های آزمایشگاهی و محاسباتی می‌باشد. شکل (۱۵) نشان دهنده تغییرات L_{max}/H آزمایشگاهی به L_{max}/H محاسباتی برای پایه‌های پل دایره‌ای شکل و مستطیلی نوک تیز (حالت کلی) می‌باشد.

معادلات تجربی برای حداکثر طول آبشستگی گودال و انتقال آن به پایه‌های پل دایره‌ای شکل و مستطیلی نوک تیز در حالت کلی به ترتیب مطابق روابط (۹) و (۱۰) به صورت زیر حاصل شد:

(رابطه ۹)

$$\frac{L_{max}}{H} = 7.422 \left(\frac{H}{y}\right)^{-0.742} \left(\frac{L}{y}\right)^{0.5} \left(\frac{B}{y}\right)^{0.59} (Fr)^{-0.866} \left(\frac{u_{cr}}{V}\right)^{-0.31} (\phi)^{0.87} \left(\frac{d_{50}}{y}\right)^{0.32}$$

طبق رابطه (۹) مشاهده می‌شود حداکثر طول آبشستگی گودال (L_{max}/H) در حضور پایه‌های پل دایره‌ای شکل، با پارامترهای بدون بعد L/y ، B/y ، d_{50}/y رابطه مستقیم و با پارامترهای H/y ، Fr ، u_{cr}/V رابطه عکس دارد. از بین پارامترهای ذکر شده ϕ بیشترین تأثیر را در افزایش L_{max}/H و همچنین Fr نیز بیشترین تأثیر را در کاهش L_{max}/H دارد. مطابق نتایج قبلی در این قسمت نیز با استفاده از قانون ۷۰ به ۳۰ که در آن با ۷۰ درصد داده‌ها، ضرایب و توان روابط استخراج و با ۳۰ درصد باقیمانده به صحت‌سنجی روابط پرداخته می‌شود. درصد خطای نسبی ۱۳/۷٪ و همچنین خطای RMSE ۲/۵ برای



شکل ۱۵. تغییرات L_{max}/H آزمایشگاهی به L_{max}/H محاسباتی (حالت کلی)

(الف) پایه پل دایره‌ای شکل، (ب) پایه پل مستطیلی نوک تیز

میلی متری ارائه گردیده است. با توجه به جدول‌ها مشاهده می‌گردد که کمترین درصد خطای نسبی و خطای RMSE و همچنین بیشترین ضریب همبستگی (R^2) مربوط به پایه پل مستطیلی نوک تیز برای دانه‌بندی‌های ۰/۱۵ و ۰/۱۶ میلی متری می‌باشد.

در جدول‌های (۲) و (۳) حداکثر عمق و طول آبستنگی گودال و اثر آن بر روی پایه‌های پل دایره‌ای شکل و مستطیلی نوک تیز، درصد خطای نسبی و همچنین درصد خطای RMSE به همراه ضریب همبستگی (R^2) برای دانه‌بندی‌های ۰/۱۵ و ۰/۱۶

جدول ۲. خطاها و ضرایب همبستگی برای حداکثر عمق آبستنگی گودال و اثر آن بر روی پایه‌های پل مجاور

ضرایب همبستگی	خطای مجموع میانگین مربعات	درصد خطای نسبی (%)	قطر دانه‌ها (میلی - متر)	پایه‌های پل
۰/۹۸	۰/۳۰	۴/۳۳	۰/۱۵	دایره‌ای
۰/۹۵	۰/۳۳	۶/۹۰	۰/۶۰	دایره‌ای
۰/۹۶	۰/۲۳	۱۰/۸۳	۰/۱۰-۶۰/۱۵	حالت کلی
۰/۹۹	۰/۲۶	۴/۱۰	۰/۱۵	مستطیلی نوک تیز
۰/۹۹	۰/۷۵	۳/۷۰	۰/۶۰	مستطیلی نوک تیز
۰/۹۴	۰/۱۳	۸/۵۰	۰/۱۰-۶۰/۱۵	حالت کلی

جدول ۳. خطاها و ضرایب همبستگی برای حداکثر طول آبستنگی گودال و اثر آن بر روی پایه‌های مجاور

ضرایب همبستگی	خطای مجموع میانگین مربعات	درصد خطای نسبی (%)	قطر دانه‌ها (میلی - متر)	پایه‌های پل
۰/۹۰	۲/۳۳	۱۲/۸۵	۰/۱۵	دایره‌ای
۰/۹۵	۱/۱۹	۱۰/۸۸	۰/۶۰	دایره‌ای
۰/۸۰	۲/۵۰	۱۳/۷	۰/۱۰-۶۰/۱۵	حالت کلی
۰/۹۶	۰/۸۴	۶/۸۸	۰/۱۵	مستطیلی نوک تیز
۰/۸۶	۰/۹۶	۸/۹۴	۰/۶۰	مستطیلی نوک تیز
۰/۸۰	۱/۰۲	۱۰/۱۱	۰/۱۰-۶۰/۱۵	حالت کلی

و برای پایه‌های پل دایره‌ای شکل و مستطیلی نوک تیز نشان داده شده است.

مشاهده می‌گردد که در هر دو دانه‌بندی با کاهش ارتفاع گودال‌ها از ۱۲ به ۴ سانتی متر در دبی‌های مختلف، با کاهش عدد فرود برای حالت پایه‌های پل دایره‌ای شکل و مستطیلی نوک تیز،

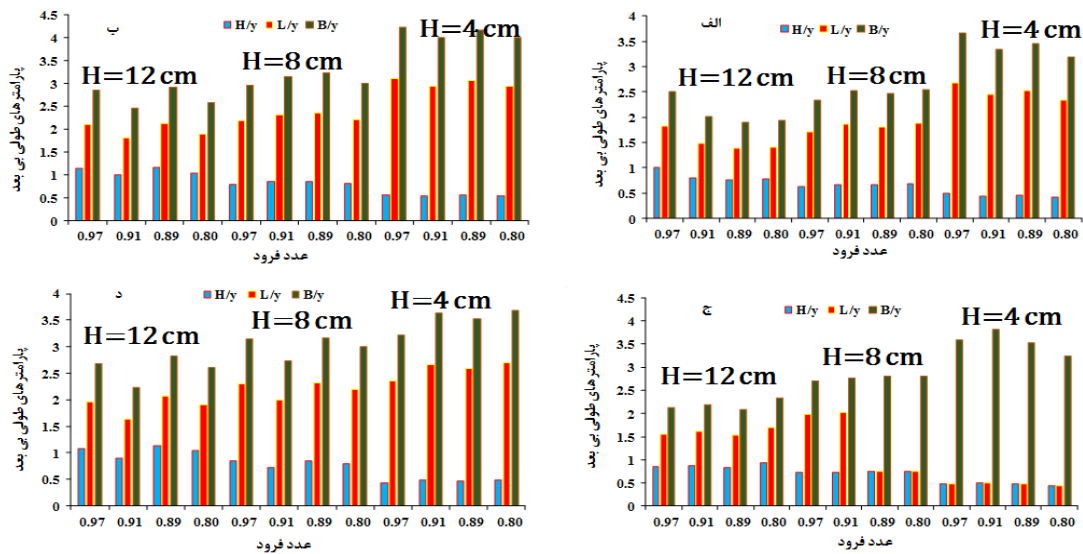
بررسی روابط بدون بعد مؤثر در حداکثر عمق و طول آبستنگی گودال

در شکل (۱۶) و (۱۷) تغییرات پارامترهای بی‌بعد اثرگذار بر حداکثر طول و عمق آبستنگی اطراف پایه‌های پل مجاور گودال برداشت نسبت به عدد فرود (Fr) برای هر دو دانه‌بندی ذکر شده

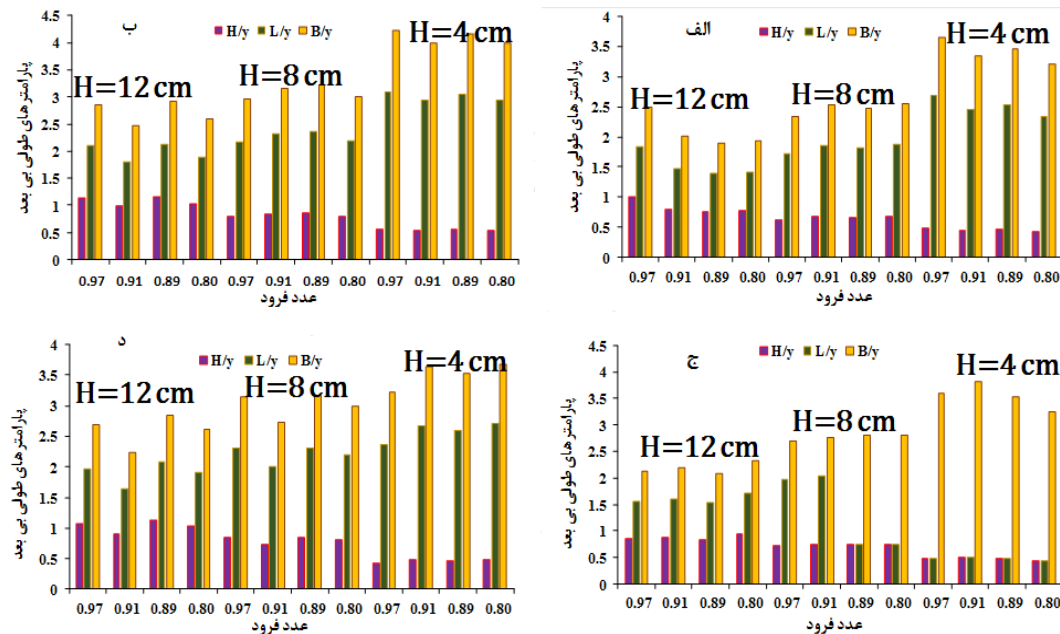
استفاده از پایه پل مستطیلی نوک تیز باعث کاهش پارامترهای بدون بعد مؤثر بر حداکثر طول و عمق آبستتگی اطراف پایه‌ها در مقایسه با پایه پل دایره‌ای شکل می‌گردد.

شکل (۱۸) نشان دهنده تغییرات u_{cr}^*/V نسبت به Fr برای H_{max}/H و L_{max}/H برای کل آزمایش‌های انجام گرفته با پایه‌های پل دایره‌ای و مستطیلی نوک تیز در دانه‌بندی‌های ۰/۱۵ و ۰/۶ میلی‌متر با سه عمق گودال و چهار دبی مختلف می‌باشد.

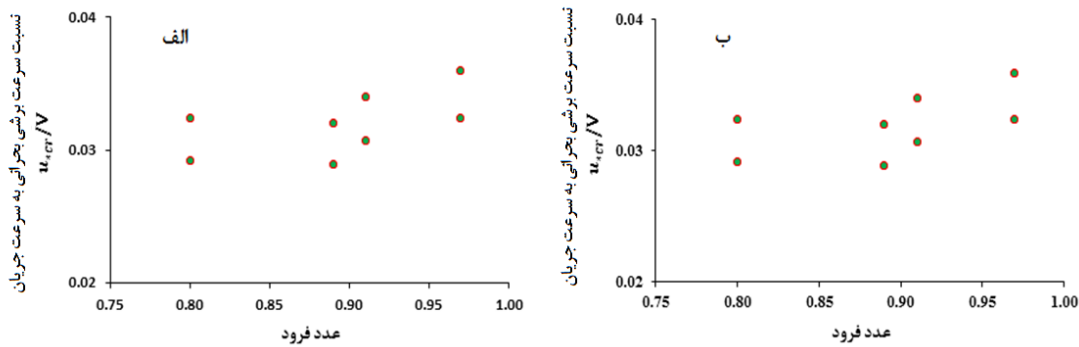
پارامتر بدون بعد H/y کاهش یافته و پارامترهای بدون بعد L/y و B/y افزایش می‌یابد. علت این امر نیز کاهش سرعت جریان و افزایش عمق آب در نتیجه کاهش عدد فرود و ایجاد جریان ثانویه در درون گودال‌ها می‌باشد که هر چه ارتفاع گودال کمتر باشد اثرات جریان ثانویه نیز کمتر خواهد شد. همچنین با افزایش قطر متوسط ذرات بستر، تأثیر هر یک از پارامترهای بدون بعد در شرایط ذکر شده کاهش می‌یابد. در ارزیابی تأثیر شکل پایه پل بر روی پارامترهای بدون بعد مورد بررسی، مشاهده می‌گردد که



شکل ۱۶. تغییرات پارامترهای بی‌بعد H/y ، L/y و B/y برای حداکثر عمق آبستتگی (الف) پایه پل دایره‌ای شکل (۰/۱۵ میلی‌متری)، (ب) پایه پل دایره‌ای شکل (۰/۰۶ میلی‌متری) (ج) پایه پل مستطیلی نوک تیز (۰/۱۵ میلی‌متری)، (د) پایه پل مستطیلی نوک تیز (۰/۰۶ میلی‌متری)



شکل ۱۷. تغییرات پارامترهای بی‌بعد H/y ، L/y و B/y برای حداکثر طول آبستتگی (الف) پایه پل دایره‌ای شکل (۰/۱۵ میلی‌متری)، (ب) پایه پل دایره‌ای شکل (۰/۰۶ میلی‌متری) (ج) پایه پل مستطیلی نوک تیز (۰/۱۵ میلی‌متری)، (د) پایه پل مستطیلی نوک تیز (۰/۰۶ میلی‌متری)



شکل ۱۸. تغییرات u^*_{cr}/V نسبت به Fr برای حداکثر عمق و طول آبشستگی گودال با حضور پایه‌های پل (الف) H_{max}/H و L_{max}/H (پایه پل مستطیلی نوک تیز) و (ب) L_{max}/H (پایه پل دایره‌ای شکل).

در شرایط یکسان مقدار حداکثر عمق آبشستگی در اطراف پایه پل بالادست و پایین دست به ترتیب $24/50$ و $31/55$ درصد با وجود پایه پل مستطیلی نوک تیز نسبت به پایه پل دایره‌ای شکل کاهش می‌یابد. علت عملکرد بهتر پایه مستطیلی نوک تیز در پایه پایین دست گودال، تأثیر بیشتر توسعه انتقال گودال برداشت بر روی پایه بالادست می‌باشد.

در دبی‌های پایین تأثیر گودال برداشت مصالح بر روی آبشستگی اطراف پایه‌های پل کم بوده و با افزایش دبی تأثیر توسعه و انتقال گودال برداشت بر روی آبشستگی اطراف پایه‌های پل بخصوص در پایه پل بالادست مشهود می‌باشد. همچنین در شرایط هیدرولیکی جریان یکسان، هر چه عمق برداشت مصالح بیشتر باشد، روند انتقال و توسعه گودال برای رسیدن به تعادل بیشتر بوده و تأثیر بیشتری بر روی پایه‌های مجاور خواهد داشت. با ارزیابی معادله تجربی ارائه شده برای حداکثر عمق و طول آبشستگی گودال برداشت مصالح با در نظر گرفتن پایه‌های پل دایره‌ای شکل مشخص گردید که حداکثر عمق و طول آبشستگی گودال برداشت مصالح با زاویه ایستایی مصالح داخل آب (ϕ) رابطه مستقیم و به ترتیب با نسبت‌های بی بعد H/y و Fr رابطه عکس دارد.

برای پایه‌های پل مستطیلی نوک تیز، حداکثر عمق آبشستگی گودال برداشت مصالح با زاویه بین رأس پایه با راستای قائم (α) رابطه مستقیم و با Fr رابطه عکس دارد. و حداکثر طول آبشستگی گودال برداشت مصالح با Fr رابطه مستقیم و با نسبت بی بعد u^*_{cr}/V رابطه عکس دارد.

در بررسی حداکثر طول و عمق آبشستگی گودال با حضور پایه‌های پل مشخص شد که کمترین درصد خطای نسبی و خطای RMSE و بیشترین ضریب همبستگی مربوط به پایه پل مستطیلی نوک تیز برای دانه‌بندی‌های $0/15$ و $0/6$ میلی‌متری می‌باشد. آزمایش‌ها نشان داد که در هر دو دانه‌بندی با کاهش

مشاهده می‌گردد که افزایش سرعت جریان و کاهش عمق آب (در بالادست گودال برداشت) باعث افزایش Fr شده و آب توانایی برداشت و حمل ذرات رسوبی بیشتری را از بستر متحرک به‌ویژه در اطراف گودال دارا خواهد بود. از طرفی دیگر با توجه به رابطه $\tau_{*cr} = \rho u^*_{cr}$ (سرعت تنش برشی بحرانی) افزایش می‌یابد. با توجه به این دو نکته هر چه قدر Fr افزایش یابد به همان نسبت نیز u^*_{cr}/V افزایش خواهد یافت.

نتیجه‌گیری

یکی از آثار منفی و بسیار محسوس برداشت مصالح از رودخانه‌ها، صدمات جبران‌ناپذیری است که به تأسیسات و سازه‌های موجود در مسیر رودخانه (از جمله پل‌ها) وارد می‌شود. در این تحقیق، به بررسی تأثیر انتقال و توسعه گودال‌های مستطیلی شکل ناشی از برداشت مصالح رودخانه‌ای بر روی پایه‌های پل مجاور در شکل‌های دایره‌ای و مستطیلی نوک تیز با دبی‌های مختلف و دانه‌بندی‌های یکنواخت و غیریکنواخت پرداخته شد. نتایج تحقیق به شرح زیر می‌باشد:

حفره برداشت شده برای رسیدن به تعادل رسوب ورودی و خروجی، تا پایه‌های پل مستقر در مجاورت گودال پیش می‌رود و باعث فرسایش در اطراف هر دو پایه پل در بالادست و پایین دست محل خود می‌گردد. همچنین تأثیر حفره برداشت بر روی آبشستگی اطراف پایه پل بالادست بیشتر از پایه پل پایین دست می‌باشد.

با توجه به شکل تیز و آئرودینامیکی دماغه پایه پل مستطیلی نوک تیز، آبشستگی اولیه در جلوی دماغه شدت کمتری نسبت به پایه دایره‌ای شکل دارد. علت این امر کاهش و کنترل قدرت گردابه‌های نعل اسبی توسط نوک تیز دماغه پایه پل مستطیلی می‌باشد. نکته قابل ذکر اینکه در هر دو پایه، برخورد جریان به پایه‌ها خود عاملی برای آبشستگی اطراف پایه‌ها می‌باشد.

رابطه‌های ارائه شده با داده‌های آزمایشگاهی صحت سنجی شدند که نتایج رضایت‌بخش بود.

عمق گودال‌ها و همچنین با کاهش عدد فرود، نسبت بی‌بعد H/y کاهش و نسبت‌های بدون بعد L/y و B/y افزایش می‌یابد.

REFERENCE

- Cantelli, A. and Muto, T. (2014). Multiple knick points in an alluvial river generated by a single instantaneous drop in base level: experimental investigation. *Earth Surface Dynamics*, 2(1), 271.
- Chiew, Y. M. and Melville, B. M. (1987). Local scour around bridge piers. *Journal of Hydraulic Research*, 25(1), 15-26.
- Daneshfaraz, R., Chabokpour, J., and Dasineh, M. (2019a). The experimental investigation of the maximum depth and length of the created pit holes due to the bed material removal under subcritical flow condition, *Journal of Water and Soil Conservation*, 26(1), 111-130 (In Farsi).
- Daneshfaraz, R., Sadeghfam, S., & Tahni, A. (2019b). Experimental Investigation of Screen as Energy Dissipators in the Movable-Bed Channel. *Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Civil Engineering*. Doi: 10.1007/s40996-019-00306-7.
- Daneshfaraz, R., Chabokpour, J., and Nezafat, H. (2019c). Experimental Investigation of the Scouring due to Hydraulic Jump in Screens. *Iranian Journal of Soil and Water Research*. 50(5), 1039-1051 (in Faersi).
- Daneshfaraz, R., Majedi Asl, M. and Mirzaee, R. (2019d). Experimental Study of Expanding Effect and Sand-Roughened Bed on Hydraulic Jump Characteristics. *Iranian Journal of Soil and Water Research*. 50(4), 885-896 (in Faersi).
- Daneshfaraz, R., Majedi Asl, M., Mirzaee, R. and Ghaderi, A. (2019e). The S-jump's Characteristics in the Rough Sudden Expanding Stilling Basin. *AUT Journal of Civil Engineering*, DOI: 10.22060/AJCE.2019.16427.5586.
- Daneshfaraz, R., Sadeghfam, S., & Ghahramanzadeh, A. (2017). Three-dimensional numerical investigation of flow through screens as energy dissipators. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 44(10), 850-859.
- Ghaderi, A., Daneshfaraz, R., Zaerkabeh, R., and Ashkan, F. (2018). Experimental Investigation of Stepped Spillways' Downstream Erosion Control using Microsilica- Structured and Nano Materials. *Amirkabir Journal of Civil Engineering*, DOI: 10.22060/CEEJ.2018.14919.5781 (In Farsi) (Accepted).
- Grimaud, J.L., Paola, C. and Voller, V. (2016). Experimental migration of knick points: influence of style of base-level fall and bed lithology. *Earth Surface Dynamics*, 4(1), 11.
- Lee, H.Y., Fu, D.T. and Song, M.H. (1993). Migration of rectangular mining pit composed of uniform sediments. *Journal of Hydraulic Engineering*, 119(1), 64-80.
- Lee, H.Y. and Chen, S.C. (1996). Migration of rectangular mining pit composed of non-uniform sediments. *Journal of the Chinese Institute of Engineers*, 19(2), 255-264.
- Majedi Asl, M., Daneshfaraz, R. and Valizadeh, S. (2019). Experimental investigating effect of river materials mining on scouring around armed pier groups, *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 50(6), 1363-1380. (in Farsi).
- Melville, B.W. (1997). Pier and Abutment Scour: Integrated Approach. *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, 123(2), 125-136.
- Neyshabouri, S. A.A. S., Farhadzadeh, A. and Amini, A. (2002). Experimental and field study on mining-pit migration. *International Journal of Sediment Research*, 17(4), 323-331.
- Oliveto, G. and Hager, W. (2002). Temporal Evolution of Clear-Water Pier and Abutment Scour. *Journal of Hydraulic Engineering*, 128(9), 811-820.
- Raudkivi A.J. and Ettema R. (1983). Clear-water scour at cylindrical piers. *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, 109(3), pp. 339-350.
- Rezaie, M., Daneshfaraz, R., and Desineh, M. (2018). Experimental Investigation of the Effect of Cationic Clay and Polyacrylamide Addition on Scouring Reduction of Bridges Piers and Pit under the Effects of River removal. *Hydraulic Scientific Research*, 13 (3), 59-70 (In Farsi).
- Rezaie, M., Gaderi, A. and Daneshfaraz, R. (2019). Experimental Investigation of Nano-clay Montmorillonite Cay Effect on Scour Reduction at Downstream of Screen, *Irrigation and Drainage Structures Engineering Research*, 19(73), 1-16. (in Farsi).
- Sadeghfam, S., Daneshfaraz, R., & Minaei, o. (2019). Experimental studies on scour of supercritical flow jets in upstream of screens and modelling scouring dimensions using artificial intelligence to combine multiple models (AIMM). *Journal of Hydroinformatics*, 21 (5): 893-907.
- Sadeghi, S.H.R., Khaledi Darvishan, A.V. and Gholami, L. (2008). Effects of sand and gravel mining on bed sediment morphometric characteristics. *Geology Engineering Journal*, 1(2), 75-86 (In Farsi).
- Salehi Neishabouri, S. A. A., Ghodsiyan, M., (2005). Guidelines for erosion and sediment studies in River Routing. Office of Standards and Technical Criteria, 383, Iran (In Farsi).
- Shafaei Bejestan, M. (2005). Hydraulic Sediment, Shahid Chamran University, Ahwaz, Iran. (In Farsi)
- Sracek, O., Bohdan, K., Martin, M., Vladimír, M., František, V., Zbyněk, V. and Imasiku, N. (2012). Mining-related contamination of surface water and sediments of the Kafue River drainage system in the Copperbelt district, Zambia: An example of a high neutralization capacity system. *Journal of Geochemical Exploration*, 112(2), 174-183.