

## Experimental Investigation of the River Materials Mining Effect on the Scouring Around Armed Pier Groups

MEHDI MAJEDI-ASL<sup>1\*</sup>, RASOUL DANESHFARAZ<sup>2</sup>, SAEIDEH VALIZADEH<sup>3</sup>

1. Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, University of Maragheh, Maragheh, Iran.
2. Associate Professor, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, University of Maragheh, Maragheh, Iran.
3. M.Sc. Student, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, University of Maragheh, Maragheh, Iran.

(Received: Dec. 3, 2018- Revised: Jan. 13, 2019- Accepted: Jan. 21, 2019)

### ABSTRACT

The scouring phenomenon around the bridge piers depends on the hydraulic properties of the flow, shape, and spacing of the pier relative to each other, the material and grading of the rivers bed. The purpose of this study was to investigate the effect of cavity, caused by materials mining, on scouring around the pier groups. Therefore, in order to reduce the negative effect of this mining, pier groups armed with cable were used. Pier groups were performed of three consecutive piers in the direction of flow. The experiments were carried out in two simple and armed modes (v shape), in sand bed with a median grain size of 0.78 mm, with a length of 4.25 meters, in a canal with 13 meters in length and 1.2 meters in width. The effect of materials mining on scouring in upstream and downstream of the mentioned pier groups was investigated under subcritical flow conditions (range 0.25-0.5). The results showed that in all experiments, materials mining from the upstream of the pier group reduced the scour maximum depth, but mining from the downstream of the pier group increased the scour maximum depth. Also, with increasing the Froude number from 0.25 to 0.5, the scour depth was significantly increased in all piers and for two beds; without a pithole bed (a) and with a pithole bed (b). So that the least increase in scouring for A and B conditions was about 44 and 66%, respectively for the last pier in downstream pier group and the most increase in scouring was observed to be 75 and 76%, respectively for the first pier in upstream pier group.

**Keywords:** pier group, armed, pithole, scour

## بررسی آزمایشگاهی تاثیر برداشت مصالح در آبستگي اطراف گروه پایه‌های مسلح شده

مهدی ماجدی اصل<sup>۱\*</sup>، رسول دانشفراز<sup>۲</sup>، سعیده ولی زاده<sup>۳</sup>

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

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

۳. دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه مراغه، ایران

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۹/۱۲ - تاریخ بازنگری: ۱۳۹۷/۱۰/۲۳ - تاریخ تصویب: ۱۳۹۷/۱۱/۱)

### چکیده

پدیده آبستگي اطراف پایه‌های پل به خصوصیات هیدرولیکی جریان، شکل و فاصله قرارگیری پایه‌ها نسبت به هم، جنس و اندازه دانه‌بندی بستر رودخانه‌ها بستگی دارد. هدف از تحقیق حاضر بررسی تاثیر گودال حاصل از برداشت مصالح در میزان آبستگي اطراف گروه پایه‌ها است. بنابراین برای کاهش اثر منفی این برداشت، از گروه پایه‌هایی با دورپیچ کابل به عنوان مسلح‌کننده استفاده گردید. گروه پایه‌ها از سه پایه متوالی در راستای جریان تشکیل شده‌اند. آزمایش‌ها در دو حالت ساده و مسلح‌شده (۷ شکل)، در بستر ماسه‌ای با دانه‌بندی ۰/۷۸ میلی‌متر به طول ۴/۲۵ متر، درون کانالی به طول ۱۳ متر و عرض ۱/۲ متر انجام گرفته است. تاثیر برداشت مصالح بر میزان آبستگي در هر دو قسمت بالادست و پایین‌دست گروه پایه‌های مذکور در شرایط جریان زیر بحرانی (محدوده عدد فرود ۰/۲۵ و ۰/۵) مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که در تمام آزمایش‌ها، برداشت مصالح از بالادست گروه پایه باعث کاهش و برداشت از پایین‌دست گروه پایه، موجب افزایش عمق آبستگي بیشینه گردید. همچنین با افزایش عدد فرود از ۰/۲۵ به ۰/۵، در تمام پایه‌ها و برای هر دو بستر بدون گودال (الف) و با گودال (ب)، عمق آبستگي افزایش چشم‌گیری داشته است. بطوریکه کمترین افزایش آبستگي برای حالت (الف) و (ب) به ترتیب حدوداً برابر ۴۴ و ۶۶ درصد، مربوط به پایه آخر از گروه پایه پایین‌دست و بیشترین افزایش آبستگي به ترتیب ۷۵ و ۷۶ درصد در پایه اول از گروه پایه بالادست مشاهده گردید.

واژه‌های کلیدی: گروه پایه پل، مسلح شده، گودال برداشت مصالح، آبستگي

### مقدمه

محققین مختلفی آبستگي حول پایه‌های پل در بستر ماسه‌ای را مورد بررسی قرار داده و روابطی برای تخمین عمق آبستگي حول این پایه‌ها ارائه داده‌اند (Kothyari *et al.*, 1992; Sheppard and Miller, 2006; Melville, 1997). همچنین تحقیقاتی نیز در زمینه بررسی آبستگي پایه پل در بسترهای رسی با درصدهای رس مختلف توسط محققین مختلف انجام گرفته و روابطی برای تخمین عمق آبستگي در بستر رسی ارائه شده است (Rambabu *et al.*, 2003; Ansari *et al.*, 2002; Ting *et al.*, 2001; Debnath and Chaudhari, 2010). بررسی تاثیر زمان در میزان آبستگي پایه پل در مطالعات (Chang *et al.*, 2004) و (Elsebaie, 2013) مشاهده می‌گردد. ایشان با بررسی میزان عمق آبستگي حول تک پایه قائم با گذشت زمان به ارائه رابطه تجربی برای تخمین زمان تعادل آبستگي پرداخته‌اند. مطالعه الگوی جریان در گودال آبستگي اطراف پایه‌های پل نیز توسط (Graf and Istiarto, 2002) انجام گرفته و

امروزه با پیشرفت علم و صنعت و نیاز بیش از پیش به مصالح ساختمانی، برداشت شن و ماسه از رودخانه‌ها به امری اجتناب ناپذیر تبدیل گشته است. از آنجایی که این برداشت نقش عمده‌ای در تخریب بستر رودخانه‌ها و در نتیجه فرسایش پایه‌های پل ایفا می‌کند، جای خالی اصول و قوانین برداشت مصالح از رودخانه‌ها، در آیین‌نامه‌ها به وضوح احساس می‌شود. بنابراین ارائه راهکارهایی برای کاهش تاثیرات منفی برداشت مصالح از رودخانه‌ها و پیدا کردن منطقه‌ای مناسب با پتانسیل بالا برای این برداشت، بیش از پیش مورد توجه محققین هیدرولیک بوده است. مطالعاتی که تا به امروز در زمینه آبستگي پایه پل‌ها انجام گرفته است، به تاثیر خصوصیات هیدرولیکی جریان در میزان آبستگي، بررسی الگوی جریان و الگوی آبستگي در بستر رسی و ماسه‌ای، استفاده از تدابیری از جمله شکاف، طوقه، استفاده از کابل و استفاده از گروه پایه به جای پایه با قطر بزرگ و بسیاری روش‌های دیگر برای کنترل آبستگي، خلاصه گردیده است.

ضمن عمق آبشستگی با افزایش قطر کابل و تعداد دوره‌های آن در اطراف پایه کاهش می‌یابد (Khwairakpam and Mazumdar, 2009). با بررسی میزان آبشستگی حول تک پایه در حضور توامان کابل و طوقه نشان دادند که با افزایش قطر کابل و کاهش زاویه طوقه، آبشستگی کاهش می‌یابد.

در زمینه بررسی استفاده از گروه پایه در کاهش آبشستگی، Aghli (2012) به بررسی تاثیر توام طوق و کابل بر روی عمق آبشستگی گروه پایه‌های پل در قوس رودخانه پرداخته و نشان داد که بکارگیری توام طوق و کابل، کارایی بهتری نسبت به استفاده تک تک آن‌ها داشته و بستن کابل در جهت ساعت‌گرد عملکرد بهتری از خود نشان داده است. بررسی آبشستگی حول گروه پایه‌های پل تحت آب زلال حول یک گروه سه تایی از پایه‌های استوانه‌ای که مجموع قطر آن‌ها برابر تک پایه اصلی بود با آرایش ۱۲۰ درجه، نشان داد استفاده از گروه پایه به جای تک پایه باعث کاهش آبشستگی به میزان حدود ۴۰ درصد گردیده است (Vittal et al., 1994). (Özalp and Bozkus, 2013) دو آرایش به صورت گروه پایه که آرایش اول دارای سه پایه و آرایش دوم دارای چهار پایه بود را مورد تحلیل قرار دادند. نتایج نشان داد که استفاده از گروه پایه منجر به کاهش آبشستگی شده و اطراف پایه‌های مایل بیشتر از پایه‌های قائم دچار آبشستگی شده‌اند. در یک مطالعه آزمایشگاهی، اثرات گروه پایه پل با اندازه‌های مختلف و آرایش پشت سر هم آنها بر روی آبشستگی و گودال آبشستگی در یک کانال مستقیم مورد بررسی قرار گرفت. نتایج حاکی از آن بود که وجود گروه پایه پل در کاهش آبشستگی نقش مؤثری ایفا می‌کند (Beg and Beg, 2014).

Kondolf (1997) به بررسی اثرات برداشت شن و ماسه بر رژیم جریان و انتقال بار رسوبی در رودخانه راین پرداخت. نتایج حاکی از آن بود که پس از برداشت دراز مدت شن و ماسه از بستر رودخانه، انتقال بار معلق از بالادست افزایش یافته و رسوبات دانه-درشت کناره‌ها و بستر رودخانه در پایین دست مستعد فرسایش خواهند بود. بررسی آزمایشگاهی و صحرایی نحوه جابجایی گودال‌های ناشی از برداشت مصالح رودخانه‌ای حاکی از آن است که سرعت جابجایی گودال‌ها با طول گودال و دبی جریان نسبت مستقیم و با عمق گودال‌ها نسبت معکوس دارد. همچنین از بین پارامترهای مورد بررسی، عمق گودال بیشترین تاثیر را بر جابجایی داشته است (Amini, 2002). تأثیر انتقال گودال‌های ایجاد شده تحت اثر برداشت مصالح رودخانه‌ای از گودال‌های برداشت مصالح به طول ۰/۲۲ و عرض ۰/۳ متر با ارتفاع‌های مختلف ۰/۰۴، ۰/۰۸ و ۰/۱۲ متر در یک تحقیق بررسی گردید

به تحلیل گردابه‌های ایجاد شده در پشت و جلوی پایه منجر شده است. بررسی هندسه گودال آبشستگی در زمان تعادل حول پایه پل در بستر ماسه‌ای در مطالعات (Diab et al., 2010) نشان داد که آبشستگی در بستر ماسه‌ای برای پایه مستطیلی کندتر از پایه استوانه‌ای است. (Najafzadeh and Barani, 2014) با بررسی آزمایشگاهی آبشستگی موضعی حول پایه‌های قائم در خاک چسبنده نشان دادند که عمق آبشستگی حول پایه پل می‌تواند تحت تاثیر پارامترهایی از جمله مقاومت برشی، عدد فرود، درصد رطوبت و درصد رس باشد. همچنین عمق آبشستگی نهایی با افزایش مقاومت برشی خاک کاهش می‌یابد.

برای اولین بار (Chiew, 1992) از شکاف - سوراخ در درون پایه به عنوان یکی از روش‌های پیشگیری و کاهش آبشستگی استفاده کرد. نتایج نشان داد که چنانچه شکاف نزدیک بستر باشد با ایجاد جهت جریان افقی، جریان رو به پایین که عامل اصلی ایجاد گرداب نعل اسبی و یکی از عوامل فرسایش اطراف پایه است را به فاصله‌ای دورتر از پایه منحرف کرده و باعث کاهش عمق آبشستگی می‌شود. همچنین در پژوهشی دیگر، حفاظت گروه پایه‌های استوانه‌ای شکل در برابر آبشستگی موضعی با استفاده از شکاف مورد بررسی قرار گرفت و نشان داد که عملکرد شکاف در پایه‌های عقبی با فاصله چهار برابر قطر پایه بیشتر از پایه‌های جلویی و تک پایه می‌باشد (Heidarpour et al., 2008).

آبشستگی موضعی حول تک پایه با طوقه در فلولم آزمایشگاهی با خم ۱۸۰ درجه توسط (Masjedi et al., 2010) مورد بررسی قرار گرفت و مشاهده گردید که عمق آبشستگی با گذشت زمان افزایش یافته و کمترین آبشستگی مربوط به طوقه مستطیلی با عرضی سه برابر عرض پایه می‌باشد. همچنین (Karimaee and Zarrati, 2012)، به مطالعه آزمایشگاهی توسعه زمانی و گستردگی حفره آبشستگی در اطراف پایه پل استوانه‌ای شکل پرداختند. به این منظور آزمایش‌هایی را بر روی پایه پل محافظت نشده و محافظت شده با طوق انجام دادند. آنها نشان دادند که استفاده از طوق باعث کاهش عمق آبشستگی و در عین حال افزایش گستردگی گودال آبشستگی اطراف پایه پل می‌شود. یکی دیگر از روش‌های کنترل آبشستگی استفاده از کابل است که در مطالعه صورت گرفته توسط (Dey et al., 2006)، زاویه بستن کابل دور پایه برای دو زاویه ۱۵ و ۳۰ درجه مورد مطالعه قرار گرفت. دست‌آورد پژوهش آنها نشان داد با افزایش زاویه، میزان عمق آبشستگی بیشتر می‌شود. همچنین در پژوهشی اثر پیچش کابل در اطراف پایه‌های پل مورد بررسی قرار گرفت و به این نتیجه رسیدند که نقش کابل در منحرف کردن جریانات رو به پایین و تضعیف قدرت گردابه‌های نعل اسبی مؤثر بوده و در

زبری به همراه گروه پایه برای تغییر الگوی جریان در اطراف پایه‌ها، جهت کنترل این تاثیر منفی مورد بررسی قرار گرفت. در ادامه نیز با بررسی برداشت مصالح در هر دو قسمت بالادست و پایین دست گروه پایه، میزان تاثیر این برداشت در آبستگي گروه پایه‌ها تحليل گرديد. همچنين رابطه‌ای برای تخمین عمق آبستگي ارائه و با روابط سایر محققین مورد مقایسه و بررسی قرار گرفت.

### مواد و روش‌ها

برای بررسی آبستگي گروه پایه‌های پل، در تحقیق حاضر آزمایش‌ها با شرایط آزمایشگاهی یکسان در کانالی با مقطع مستطیلی به طول ۱۳، عرض ۱/۲ و عمق ۰/۸ متر در آزمایشگاه هیدرولیک دانشگاه مراغه مورد آزمایش قرار گرفت. در تمام آزمایش‌ها عمق آبستگي با استفاده از دستگاه عمق سنج با دقت  $\pm 0.1$  میلی‌متر اندازه‌گیری شد. دبی‌های مورد نظر توسط دستگاه دبی‌سنج التراسونیک با دقت ۰/۰۱ قرائت شد. پروفیل بستر بالادست و پایین دست و پروفیل گودال بعد از اتمام آزمایش‌ها و خشک شدن آب بستر، توسط اسکنر سه‌بعدی برداشت گردید (شکل ۱).

و در نهایت روابطی برای طول و عمق آبستگي ارائه گردید. پارامترهایی که بیشترین و کمترین تاثیر را در این روابط داشتند استخراج و با استفاده از آنالیز حساسیت، صحت سنجی شدند (Dasine, 2018). همچنین بررسی تاثیر استفاده از رس و پلی اکریل آمید کاتیونی بر آبستگي پایه‌های پل و گودال‌های برداشت مصالح، نشان داد که این ماده تاثیر مثبتی بر کاهش عمق آبستگي پایه‌ها پل داشته است. بطوریکه بهترین عملکرد مربوط به استفاده از مخلوط رس و ۱۰ درصد پلی اکریل آمید بوده است (Rezaei et al., 2018).

با توجه به تحقیقات پیشین در زمینه آبستگي پایه‌های پل مشاهده گردید که استفاده از تعدادی پایه با قطر کمتر به عنوان گروه پایه به جای تک پایه با قطر بزرگ، در کاهش آبستگي حول پایه‌ها تاثیر بسزایی دارد. همچنین مشاهده گردید که استفاده از کابل در سطح پایه‌ها، آبستگي را به مقدار قابل توجهی کاهش می‌دهد. از طرفی با توجه به اینکه مطالعات انجام گرفته در زمینه برداشت شن و ماسه از رودخانه‌ها، صرف بررسی نحوه انتقال گودال و تاثیر آن بر بستر رودخانه محدود شده است، لذا در تحقیق حاضر بررسی میزان تاثیر منفی برداشت مصالح بر آبستگي پایه‌های پل و استفاده از کابل دورپیچ به عنوان المان



شکل ۱- اسکنر سه‌بعدی لیزری و فلو متر التراسونیک

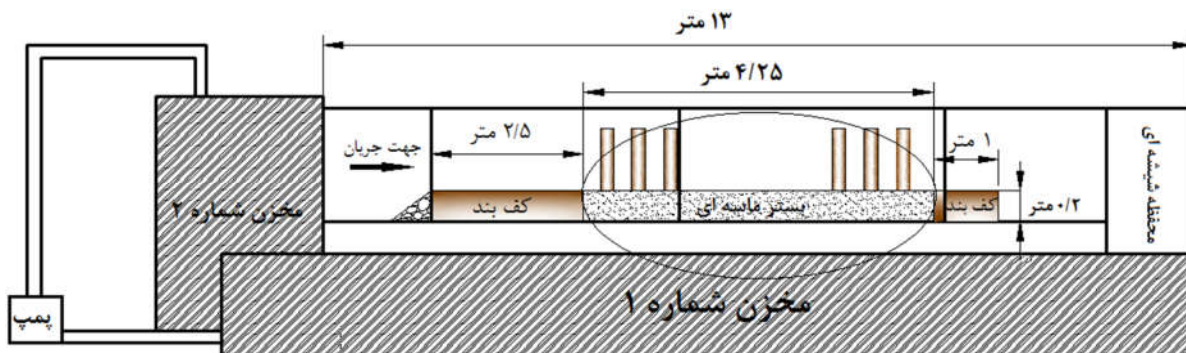
مشبک، برای کاهش بیشتر تلاطم جریان نیز استفاده گردید. دو کف کاذب شیشه‌ای در بالادست و پایین دست به فاصله ۴/۲۵ متر از هم و ارتفاع ۲۲ سانتی‌متر در میانه کانال نصب گردید. بستر متحرک ماسه‌ای در بین کف‌بندها و با همان ارتفاع واقع شده است.

دو سری گروه پایه در بالادست و پایین دست بستر با فاصله مشخص از کف‌بندها واقع شد. گروه پایه‌ها با آرایش یکسان (سه پایه متوالی در راستای جریان و با فاصله یکسان از دیواره‌های

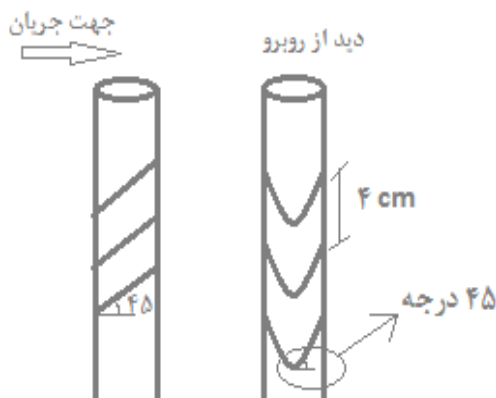
شیب کف کانال توسط یک جک قابل تغییر بود که در این تحقیق شیب برای تمام آزمایش‌ها صفر تنظیم شد. آب مورد نیاز برای آزمایش‌ها در کانال مربوطه، به صورت چرخه‌ای توسط پمپی با قدرت پمپاژ ۷ تا ۵۲ لیتر بر ثانیه تامین گردید (شکل ۲). برای آرام کردن جریان و کاهش افت انرژی هنگام ورود جریان بر روی کف‌بند از شیب استفاده شد. همچنین تلاطم جریان ابتدا توسط یک منبع آرام کننده در ابتدای کانال و سپس با عبور از دو صفحه مشبک کاهش یافت. در ادامه از یک صفحه شناور بعد از صفحات

گردید (شکل ۳). لازم به ذکر است که منظور از  $a$  فاصله بین شیارهای کابل می‌باشد. این فاصله چهار سانتی‌متری بر اساس آزمون و خطا و نتایج محققین پیشین انتخاب شد.

شیشه‌ای کانال) به فاصله مرکز به مرکز ۲۱ سانتی‌متر از هم، در دو نوع مختلف A (ساده) و B (مسلح‌شده) قرار گرفت. برای کنترل آبشستگی از کابل دورپیچ مسلح‌کننده پایه‌ها با قطر ۸ میلی‌متر و فاصله ۴ سانتی‌متر از هم ( $a/D=0.4$ )، به عنوان زبری استفاده



شکل ۲- شماتیک کانال آزمایشگاهی



شکل ۳- شماتیک پایه مسلح‌شده

بالادست و هم در پایین دست گروه پایه‌ها مورد بررسی قرار گرفت. به این صورت که در تمام آزمایش‌ها، گودال برداشت مصالح با فاصله ۵۳ سانتی‌متر از گروه پایه بالادست و پایین دست و ۲۰ سانتی‌متر از دیواره‌های کانال به عمق ۱۷ سانتی‌متر حفر گردید (شکل ۵).

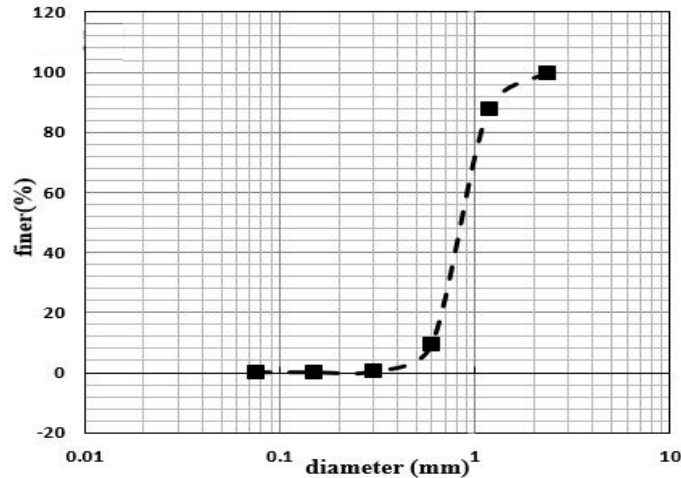
در ابتدای هر آزمایش، بستر ماسه‌ای به آرامی اشباع گردید. بدین‌صورت که ابتدا دریچه انتهایی بسته و پمپ روشن می‌شد. آب با دبی بسیار کم در بستر جریان پیدا کرده تا مانع از ناهمواری در بستر گردد. سپس به آرامی دبی به حد مورد نظر افزایش یافته و عدد فرود و عمق مورد نظر، با باز کردن دریچه تنظیم می‌شد. پس از هر آزمایش پمپ خاموش و آب کانال زهکشی می‌گردید. اندازه‌گیری‌های عمق آبشستگی در طول آزمایش ابتدا با فاصله زمانی ۳۰ دقیقه از شروع آزمایش و سپس هر یک ساعت یکبار

برای از بین بردن تاثیر دیواره کانال بر آبشستگی موضعی باید نسبت فاصله مرکز پایه تا دیواره کانال به قطر پایه، بزرگتر از ۶/۲۵ باشد (Raudkivi and Ettema, 1983). لذا در این تحقیق از پایه به قطر ۹ cm استفاده شد. برای جلوگیری از تشکیل ریب، قطر متوسط ذرات بستر نباید کمتر از ۰/۷ میلی‌متر و نسبت قطر پایه به متوسط ذرات باید بیشتر از ۲۵-۳۰ باشد (Raudkivi and Ettema, 1983). بنابراین آزمایش‌ها در بستر با قطر متوسط ۰/۷۸ میلی‌متر، ضریب یکنواختی ۱/۴۵ و انحراف استاندارد ذرات ۱/۶ مورد آزمایش قرار گرفت. منحنی دانه‌بندی رسوبات بستر در شکل (۴) مشاهده می‌گردد.

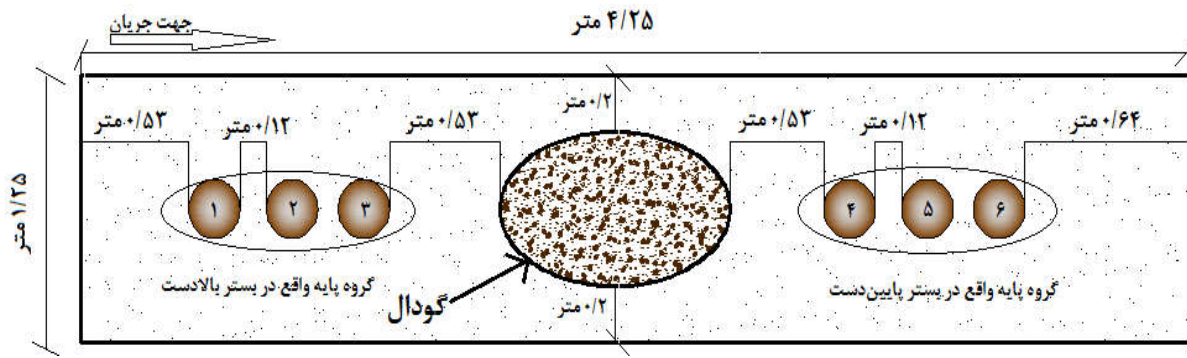
در تحقیق حاضر برای دبی ۳۰ لیتر بر ثانیه، اعداد فرود در محدوده ۰/۱ تا ۰/۵ ایجاد گردید. برای بررسی تاثیر گودال حاصل از برداشت مصالح در میزان آبشستگی، این برداشت هم در

متوسط جریان (V)، سرعت بحرانی ذرات (Vc)، سرعت برشی بحرانی ذرات (u\*<sub>c</sub>)، پارامتر شیلدز (τ\*) و عمق اولیه جریان (d<sub>0</sub>) برای این تحقیق در جدول (۱) آورده شده است.

برداشت گردید. هنگامی که میزان افزایش عمق آبستگی در یک ساعت، به ۱ میلی متر می رسد آبستگی به تعادل رسیده و آزمایش متوقف می گردید (Mia and Nago, 2003). سرعت



شکل ۴- منحنی دانه بندی رسوبات بستر



شکل ۵- پلان بستر متحرک ماسه ای

جدول ۱- پارامترهای جریان و رسوب

Fr	V <sub>c</sub> m/s	V m/s	D <sub>0</sub> m	u* <sub>c</sub>	τ*
۰/۱	۰/۲	۰/۱۳	۰/۱۸		
۰/۲۵	۰/۱۸	۰/۲۵	۰/۱	۰/۰۱۱	۰/۱۳۲
۰/۵	۰/۱۷	۰/۴۱	۰/۰۶		

g, d<sub>0</sub>, v, u\*<sub>c</sub>؛ مشخصات مربوط به آب و رسوب شامل، σ<sub>g</sub>, Y<sub>w</sub>؛ مشخصات مربوط به پایه پل شامل D، مشخصات مربوط به زمان آزمایش شامل t و t<sub>e</sub>؛ مشخصات هندسی گودال شامل H، L، B و مشخصات مربوط به کانال آزمایشگاهی شامل b، S<sub>0</sub> می باشد. g: شتاب گرانش، d<sub>0</sub>: عمق اولیه جریان، V: سرعت متوسط جریان، u\*<sub>c</sub>: سرعت برشی ذرات رسوبی، Y<sub>w</sub>: وزن مخصوص آب، Y<sub>s</sub>: وزن مخصوص ذرات رسوبی، d<sub>50</sub>: قطر متوسط ذرات رسوبی، B: عرض گودال ایجاد شده، L: طول گودال، H:

#### آنالیز ابعادی

عمق آبستگی در اطراف پایه های پل به هیدرولیک جریان، مشخصات رسوب و هندسه پایه پل بستگی دارد. بنابراین متغیرهای موثر بر عمق آبستگی مطابق رابطه (۱) معرفی می گردد.

(رابطه ۱)

$$d_{smax} = f_1(g, d_0, u^*, H, L, B, \theta, s_0, d_{50}, \sigma_g, D, t, V, \gamma_s, \gamma, b, t_e)$$

متغیرهای مستقل عبارتند از: مشخصات هیدرولیکی شامل

می توان تاثیر عدد رینولدز را نادیده گرفت (Henderson, 1966). از طرفی به دلیل اینکه قطر متوسط ذرات نسبت به عرض کانال مقدار ناچیزی می باشد پارامتر  $d_{50}/b$  از رابطه فوق حذف می گردد. لازم به ذکر است با وجود اینکه مدت زمان رسیدن عمق آبشستگی به تعادل بسیار طولانی است و تغییرات عمق آبشستگی در فواصل زمانی اندازه گیری شده ناچیز بوده است، از این رو از پارامتر  $(V \times t)/D$  نیز صرف نظر شده است (Ozalp and Bozkus, 2012). بنابراین پارامتر وابسته بدون بعد براساس پارامترهای مستقل بدون بعد بصورت زیر ارائه گردید:

$$\frac{d_{smax}}{D} = f_3(Fr, \frac{H}{d_0}, \frac{L}{d_0}, \frac{B}{d_0}, d_s, \frac{d_0}{D}, \frac{t}{t_e}) \quad (\text{رابطه ۳})$$

### نتایج و بحث

در تحقیق حاضر میزان آبشستگی در اطراف گروه پایه مدل A (ساده) و گروه پایه مدل B (مسلح) بررسی و مورد مقایسه قرار گرفت. نتایج مقایسه مربوطه در جدول (۲) آورده شده است.

ارتفاع گودال  $V$ : لزجت سینماتیکی آب،  $S_0$ : شیب کف کانال،  $\sigma_g$ : انحراف استاندارد ذرات،  $D$ : قطر پایه پل،  $t$  زمان آبشستگی،  $V$ : سرعت متوسط جریان،  $b$ : عرض کانال و  $t_e$ : زمان تعادل آبشستگی را نشان می دهد. با استفاده از روش پی- باکینگهام نتیجه آنالیز ابعادی پارامترهای دخیل در آبشستگی به صورت رابطه (۲) بدست آمده است:

(رابطه ۲)

$$\frac{d_{smax}}{D} = f_2(Re, Fr, \frac{u_*}{V}, \frac{V \times t}{D}, \frac{H}{d_0}, \frac{L}{d_0}, \frac{B}{d_0}, d_s, \frac{d_0}{D}, \frac{d_{50}}{b}, \frac{t}{t_e}, S_0, \sigma_g, \frac{\gamma_s - \gamma}{\gamma})$$

در معادله فوق،  $Re$  عدد رینولدز،  $Fr$  عدد فرود و  $d_s$  قطر متوسط بی بعد شده ذرات بستر می باشد. با توجه به اینکه شیب بستر، قطر متوسط ذرات بستر و قطر پایه های پل ثابت می باشند، تغییرات  $u_*$  و  $V$  ناچیز بوده و به ترتیب می توان از  $S_0$ ،  $u_*/V$  و  $\sigma_g$  و  $s - \gamma/\gamma$  صرف نظر کرد. همچنین عدد رینولدز نسبت نیروی لزجت بر اینرسی را نشان می دهد. لذا در جریان متلاطم رودخانه

جدول ۲- آبشستگی بیشینه در بستر بدون گودال برای گروه پایه ساده و مسلح شده

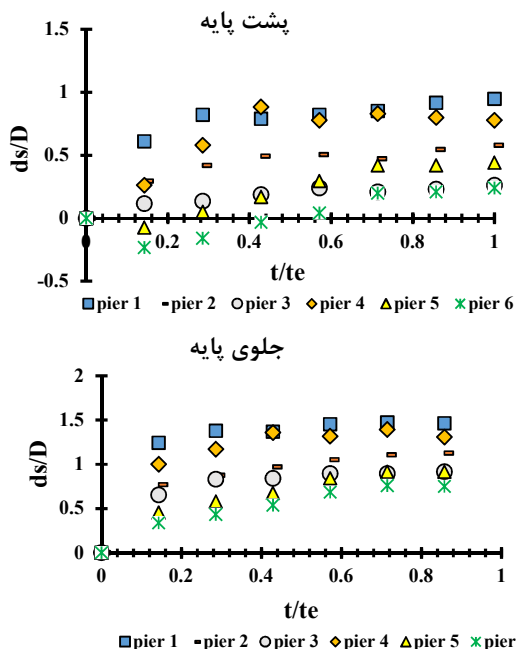
مدل	عدد فرود	موقعیت	بستر بالادست بیشینه عمق آبشستگی (سانتی متر)	بستر پایین دست بیشینه عمق آبشستگی (سانتی متر)	زمان تعادل (ساعت)
ساده A	۰/۱	جلو پایه	۲	۲/۱	۴
		پشت پایه	-۰/۳	۰/۹	
ساده A	۰/۵	جلو پایه	۱۵	۱۲/۹	۶/۵
		پشت پایه	۱۰/۷	۸/۱	
۰/۲۵	جلو پایه	۸	۱۱	۵	
	پشت پایه	۵/۶	۶/۵		
مسلح شده B	۰/۵	جلو پایه	۱۴	۱۲/۳	۷
		پشت پایه	۸/۷	۷/۶	
۰/۲۵	جلو پایه	۳/۴	۴/۸	۴	
	پشت پایه	۰/۴	۱/۱		

آرامی مسیر خود را طی کرده و پایه اول در بالادست مورد هجوم ناگهانی واقع نشده و کمتر فرسایش می یابد. در ادامه با توجه به بالا بودن عمق اولیه جریان در عدد فرود ۰/۲۵، افت سطح آب در پایین دست منجر به افزایش عدد فرود شده و پایه چهارم از پایین دست را بیشتر در معرض آبشستگی قرار می دهد. بررسی نتایج حاصل از جدول مربوطه نشان می دهد که گروه پایه مسلح شده نسبت به گروه پایه ساده، عمق آبشستگی بیشینه را برای عدد فرود ۰/۵ در جلو و پشت پایه ها به ترتیب ۶/۶ و ۱۸/۷ درصد کاهش داده است. این کاهش در عدد فرود ۰/۲۵ در جلو پایه ۵۶/۳۶ درصد و در پشت پایه ۸۳/۰۷ درصد محاسبه گردید.

با توجه به جدول فوق می توان تاثیر مسلح کردن گروه پایه ها در کاهش عمق آبشستگی را بطور واضح مشاهده کرد. این در حالی است که استفاده از گروه پایه مسلح شده باعث طولانی تر شدن زمان تعادل آبشستگی شده است. همانطور که مشاهده می شود در عدد فرود ۰/۵ بیشترین آبشستگی مربوط به پایه اول در بالادست و در عدد فرود ۰/۲۵ آبشستگی بیشینه را پایه چهارم از پایین دست به خود اختصاص داده است. به عبارت دیگر، در عدد فرود ۰/۵، ورود جریان پر سرعت به درون بستر، موجب آبشستگی ناگهانی در اطراف پایه اول در بالادست می شود. این در حالی است که در عدد فرود ۰/۲۵ به دلیل سرعت کم، جریان به

بیش از جلوی پایه می‌باشد.

در عدد فرود ۰/۵ برای حالت بستر بدون گودال آبشستگی جلوی پایه‌ها به ترتیب مختص پایه اول از بستر بالادست و سپس پایه چهارم از بستر پایین‌دست و در ادامه پایه‌های پشتی گروه پایه واقع در بستر بالادست است. این در حالی است که برای عدد فرود ۰/۲۵ بیشترین آبشستگی ابتدا مربوط به پایه چهارم (واقع در بستر پایین‌دست) و سپس پایه اول از گروه پایه واقع در بستر بالادست بوده و پایه‌های پشتی گروه پایه پایین‌دست بعد از آن دارای بیشترین آبشستگی هستند. علت این امر پیش‌تر در بخش مربوط به جدول (۲) ارائه شده است. همچنین در هر دو گروه پایه بالادست و پایین‌دست، صرف نظر از مقدار آبشستگی، روند آبشستگی برای تک تک پایه‌های جلویی و پشتی در طول زمان مشابه هم بوده است. با شروع حرکت جریان از بالادست، به دلیل بالا بودن سرعت جریان و برخورد با پایه اول، بستر اطراف این پایه به سرعت و با حجم زیادی شسته می‌شود، پایه اول به عنوان نگهبان برای پایه‌های دوم و سوم باعث کاهش قدرت جریان‌های پایین‌رونده شده و آبشستگی در این دو پایه را نسبتاً کنترل می‌کند. با رسیدن جریان به پایه سوم این اثر نگهبانی بیشتر شده و پایه اول و دوم به طور همزمان باعث کاهش آبشستگی حول پایه سوم می‌گردند. همچنین پایه ۲ و ۵ که در میانه‌ی گروه پایه‌ها واقع شده‌اند، به دلیل تداخل هم‌زمان تاثیر پایه‌های کناری و غلبه اثر تقویت‌شوندگی بر اثر نگهبانی یا محافظت‌کنندگی، کمتر دچار آبشستگی شده‌اند.



شکل ۶- توسعه زمانی آبشستگی در جلو و پشت پایه‌ها برای عدد فرود ۰/۵

بنابراین نتیجه می‌شود که در عدد فرود ۰/۲۵، گروه پایه‌های مسلح‌شده قابلیت خود را در کاهش آبشستگی بهتر نشان می‌دهند. لذا با توجه به اینکه استفاده از گروه پایه‌های مسلح‌شده در کاهش آبشستگی تاثیر چشم‌گیری از خود نشان داده است، در ادامه میزان تاثیر گروه پایه‌های مسلح‌شده، در کاهش تاثیر منفی برداشت مصالح، برای بستر بدون گودال و بستر با گودال، مورد مقایسه قرار گرفته است.

#### بستر بدون گودال (الف)

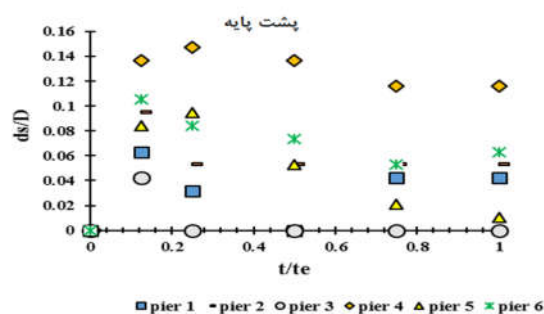
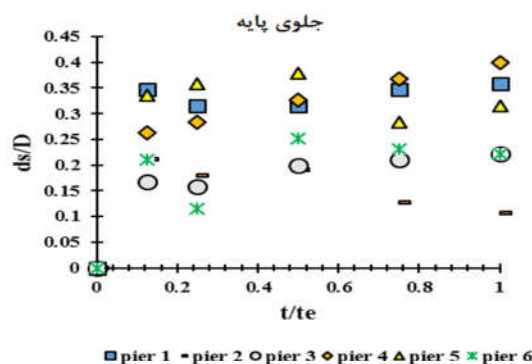
تحلیل میزان آبشستگی از زمان شروع تا زمان تعادل فرسایش، در بررسی تاثیر حوادث طبیعی همچون وقوع سیل از اهمیت بالایی برخوردار است. لذا شناخت پدیده آبشستگی نیازمند بررسی این پدیده در طول وقوع آبشستگی می‌باشد. با توجه به اهمیت زمان در میزان و روند این پدیده، در تحقیق حاضر منحنی‌های توسعه زمانی آبشستگی برای گروه پایه مسلح‌شده بررسی گردید.

#### توسعه زمانی آبشستگی

شکل (۶ و ۷) توسعه زمانی آبشستگی در دو عدد فرود متفاوت برای گروه پایه واقع در بالادست و پایین‌دست بستر بدون گودال را نشان می‌دهد. محور قائم  $d_s/D$  و محور افقی  $t/t_e$  به صورت بی‌بعد است. همانطور که مشاهده می‌شود عمق آبشستگی در جلوی تمام پایه‌ها بیشتر از قسمت عقب پایه‌ها بوده است. بطوریکه در حالت (عدد فرود ۰/۵ برای پایه ۱)، نسبت  $d_s/D$  برابر ۰/۹ در پشت پایه و ۱/۵ در جلوی پایه بدست آمده است. به عبارت دیگر با برخورد جریان به پایه پل، جریان‌های رو به پایین ایجاد شده و این جریان رو به پایین در حین برخورد به بستر رودخانه، ضمن حفر بستر به هر طرف پراکنده می‌شود. با حفر بستر در جلوی پایه، این جریان وارد حفره شده و بخشی از آن به سمت بالادست بر می‌گردد. در نهایت در برخورد با جریان اصلی مجبور به حرکت در جهت جریان می‌شود. در واقع جریان روبه پایین کاملاً چپ‌رخیده و گرداب نعل اسبی فعالیت خود را آغاز می‌کند. این سیستم در ابتدا کوچک و قدرت آن ضعیف است ولی با گذشت زمان از لحاظ اندازه و قدرت رشد کرده و سبب کنده شدن رسوبات از این قسمت و جابجایی آنها به سمت پایین‌دست پایه و در نتیجه ایجاد دو شیار در کناره پایه می‌شود. ذرات شسته شده به صورت تپه‌های رسوبی در کناره‌ها و پشت پایه جمع می‌شوند. از طرفی وجود کابل پیچیده شده به دور پایه زبری پایه را افزایش داده و باعث تأخیر جدایی جریان در پشت پایه می‌گردد. این امر باعث کاهش قدرت گردابه‌های برخاسته در پشت پایه شده و در نتیجه راندمان کابل در کاهش آبشستگی در پشت پایه



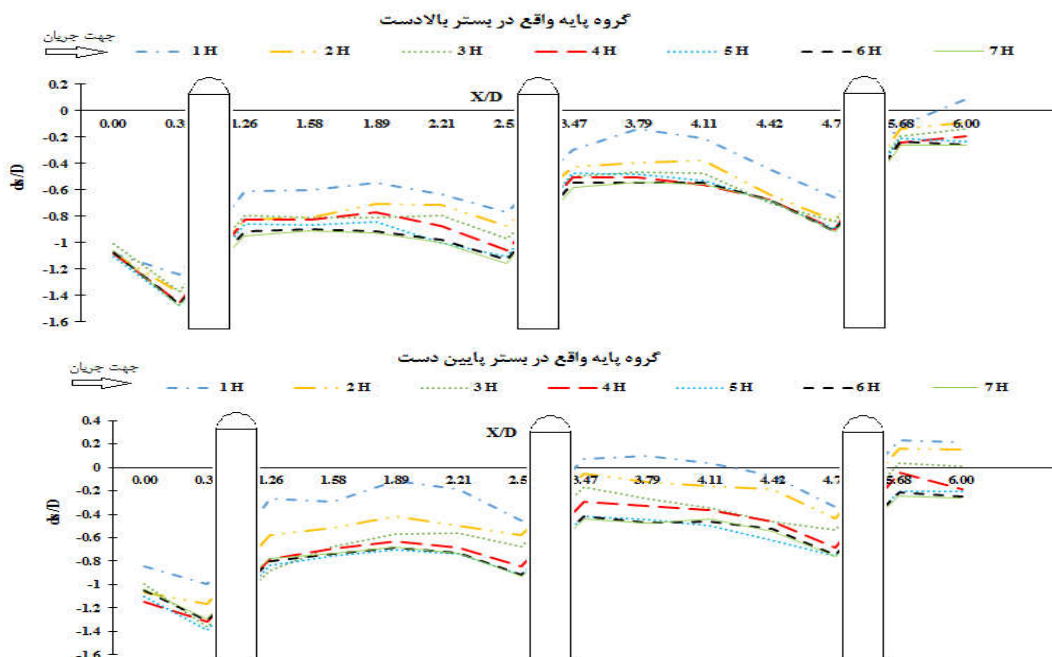
تعداد در شکل‌های (۸ و ۹)، برای گروه پایه‌های بستر بالادست و پایین‌دست، در حالت بدون گودال برای دو عدد فرود مختلف بررسی گردید. محور قائم نسبت عمق آبشستگی به قطر پایه و محور افقی نسبت فاصله نقاط برداشت عمق آبشستگی تا مبدا مختصات بر قطر پایه‌ها می‌باشد. همان‌طور که انتظار می‌رود و از نتایج و مشاهدات قبلی نیز بدست آمده است، در عدد فرود ۰/۲۵، بستر پایین‌دست و در عدد فرود ۰/۵، بستر بالادست بیشتر دچار آبشستگی شده است. بطوریکه در عدد فرود ۰/۵ عمق آبشستگی بعد از ۷ ساعت به تعادل رسیده و مشاهده می‌گردد که عمده تغییرات آبشستگی در بستر بالادست در ۴ ساعت اولیه و در بستر پایین‌دست در ۳ ساعت اولیه آزمایش رخ داده است. همچنین در عدد فرود ۰/۲۵، آبشستگی حول پایه‌ها در ۴ ساعت به تعادل رسیده و برای بستر بالادست تغییرات بسیار ناچیز بوده است. این در حالی است که در بستر پایین‌دست در سه ساعت اولیه، تغییرات آبشستگی بسیار محسوس می‌باشد. بنابراین نسبت بی‌بعد  $d_s/D$  در عدد فرود ۰/۵ برای پایه اول در بستر بالادست، تقریباً برابر ۱/۵- و برای پایه چهارم ۱/۳۵- بوده که بیانگر آبشستگی بیشتر در بستر بالادست نسبت به پایین‌دست می‌باشد. با کاهش عدد فرود از ۰/۵ به ۰/۲۵، برخلاف مقدار نسبت  $d_s/D$  حول پایه‌ها که برای پایه اول به ۰/۳۶ و برای پایه چهارم به ۰/۴ کاهش یافته است، روند کلی آبشستگی حول پایه‌های گروه پایه‌ها در هر دو عدد فرود مشابه هم مشاهده گردید.



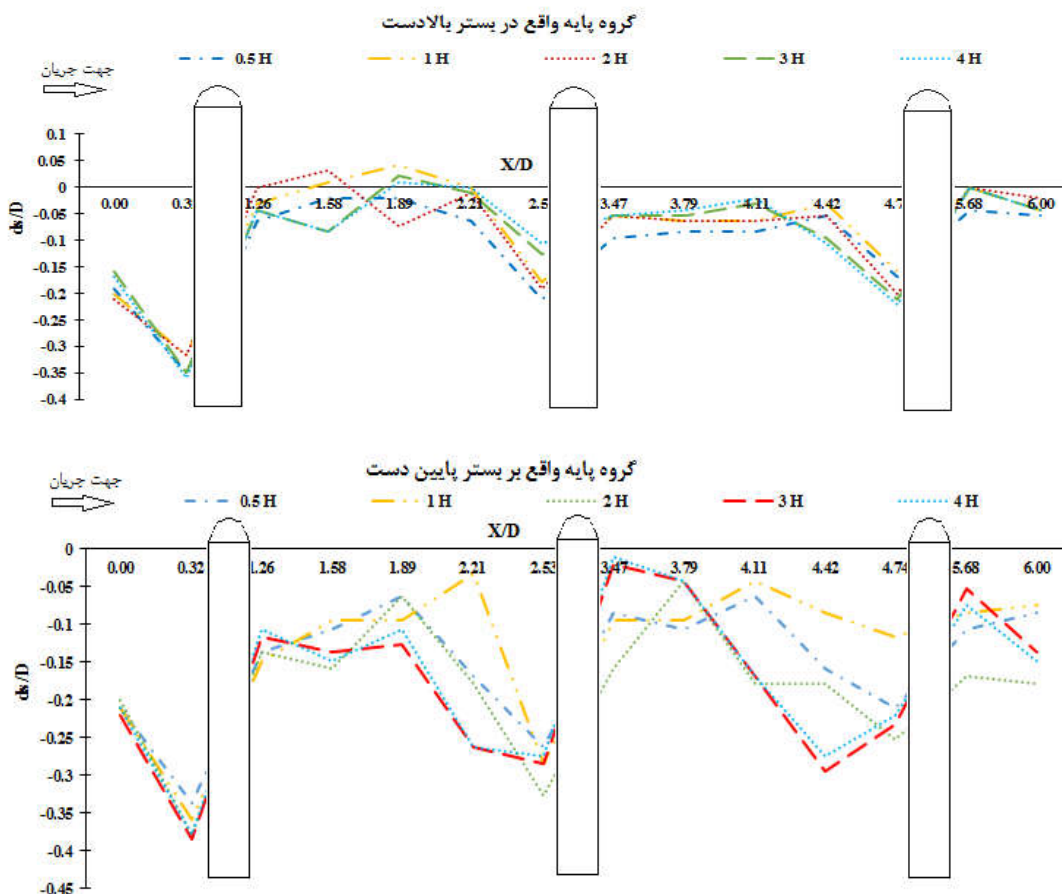
شکل ۷- توسعه زمانی آبشستگی در جلو و پشت پایه‌ها برای عدد فرود ۰/۲۵

### پروفیل طولی آبشستگی

پروفیل طولی آبشستگی در زمان‌های مختلف تا رسیدن به زمان



شکل ۸- پروفیل طولی آبشستگی بستر بالادست و پایین‌دست برای عدد فرود ۰/۵



شکل ۹- پروفیل طولی آبشستگی بستر بالادست و پایین دست برای عدد فرود ۰/۲۵

برگشتی به سمت بالادست با نام پدیده آبشستگی بالارونده، باعث آبشستگی بیشتر بستر بالادست می‌گردد. از طرفی افت تراز بستر، با افزایش عمق جریان و کاهش سرعت موجب می‌شود که جریان با عدد فرود کمتری وارد بستر پایین دست گشته و این بستر را کمتر دچار آبشستگی کند.

#### توسعه زمانی آبشستگی

شکل‌های (۱۰ و ۱۱) منحنی توسعه زمانی آبشستگی در دو عدد فرود مختلف، برای بستر با گودال را نشان می‌دهد. محور افقی نسبت بی بعد  $t/t_e$  و محور قائم نسبت بی بعد  $d_s/D$  است. قابل توجه است که روند تغییرات آبشستگی در این آزمایش‌ها مشابه بستر صاف می‌باشد. بدین صورت که بیشینه آبشستگی در عدد فرود ۰/۵، با برداشت ماسه از بستر افزایش و در عدد فرود ۰/۲۵، کاهش یافته است. علت این امر پیش تر توضیح داده شده است. بررسی آبشستگی در جلو و پشت پایه نشان داد که نسبت  $d_s/D$  بیشینه، برای عدد فرود ۰/۵ در جلو پایه برابر ۱/۵ و در پشت پایه برابر با ۱/۱ می‌باشد. در عدد فرود ۰/۲۵ این نسبت در جلو و پشت پایه به ترتیب ۰/۴۵ و ۰/۱۶ می‌باشد که بیانگر آنست که در سرعت جریان کم، تنش برشی بحرانی کمتر بوده و گردابه‌های

#### بستر با گودال (ب)

با هدف بررسی تاثیر گروه پایه‌های مسلح شده در کاهش اثرات منفی گودال حاصل از برداشت مصالح، گودالی با ابعاد مشخص بین گروه پایه واقع در بالادست و پایین دست بستر حفر شده و مورد بررسی قرار گرفت. بررسی آزمایش‌ها در حضور گودال نشان داد که عمق آبشستگی بیشینه جلوی پایه‌ها در عدد فرود ۰/۵ برای بالادست و پایین دست، به ترتیب ۱۴/۴ و ۱۰/۴ سانتی متر و در عدد فرود ۰/۲۵، ۳/۳ سانتی متر برای بالادست و ۳/۴ سانتی متر برای پایین دست محاسبه گردید. این نتایج بیانگر آنست که برداشت ماسه از میانه بستر، موجب افزایش عمق آبشستگی بیشینه در بستر بالادست و کاهش این عمق در بستر پایین دست شده است. به طوری که با برداشت مصالح، برای عدد فرود ۰/۵، بیشینه عمق آبشستگی که مختص بستر بالادست بوده، حدود ۳ درصد افزایش یافته است. این در حالی است که برای عدد فرود ۰/۲۵، عمق بیشینه مربوط به بستر پایین دست بوده و کاهش ۳ درصدی داشته است. علت این امر را چنین می‌توان بیان کرد که با عبور جریان از گروه پایه‌های بالادست و رسیدن به گودال، افت ناگهانی بستر منجر به تغییر الگوی جریان شده و با ایجاد جریان

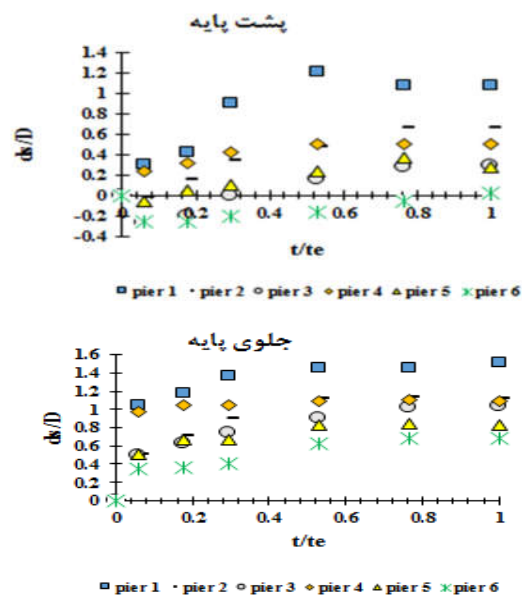
بنابراین مشاهده گردید که حضور گودال، زمان تعادل آبهستگی را افزایش داده است. لازم به ذکر است که آبهستگی زمانی به تعادل می‌رسد که قدرت نیروهای محرک تقریباً برابر نیروهای مقاوم (وزن اشباع ذره) گردد. هنگامی که رسوبات به محل گودال می‌رسند، به دلیل کاهش سرعت آب و افزایش عمق، جریان قادر به حمل رسوبات بزرگتر نبوده و رسوبات در دیواره بالایی گودال ته‌نشین می‌شوند. با توجه به اینکه بار رسوبی که آب هنگام خروج از گودال حمل می‌کند کمتر از ظرفیت حمل رسوب است، در نتیجه جریان از دیواره پایینی گودال، رسوب برداشته تا بار از دست داده خود را جبران کند. این فرایند منجر به ایجاد تلاطم در بستر شده و زمان تعادل آبهستگی را افزایش داده است. همچنین مطابق با شکل‌های مذکور می‌توان دریافت که تغییرات آبهستگی برای عدد فرود  $0/5$  در طول بستر بالادست در  $6/5$  ساعت اولیه و در پایین‌دست در  $4/5$  ساعت اول محسوس‌تر بوده و این نشان می‌دهد که حضور گودال در حین افزایش زمان تعادل آبهستگی موجب می‌شود بستر دیرتر شروع به تثبیت عمق آبهستگی کند. از مقایسه حالت با گودال و بدون گودال برای هر دو فرود می‌توان تاثیر گودال در افزایش آبهستگی در پشت پایه‌ها را مشاهده کرد.

#### مقایسه حالت الف (بستر بدون گودال) و ب (بستر با گودال)

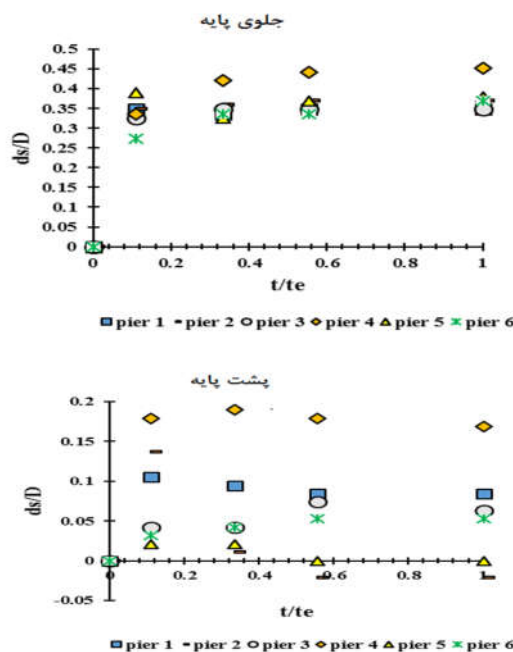
##### تاثیر عدد فرود

شکل (۱۴)، عمق آبهستگی پایه‌ها در هر دو عدد فرود  $0/25$  و  $0/5$ ، برای حالت‌های بدون گودال و با گودال را نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که با افزایش عدد فرود از  $0/25$  به  $0/5$ ، در تمام پایه‌ها و برای هر دو حالت الف و ب، عمق آبهستگی افزایش چشم‌گیری داشته است. بطوریکه کمترین افزایش آبهستگی برای حالت الف و ب به ترتیب برابر  $44/44$  و  $66$  درصد و مختص پایه ششم واقع در پایین‌دست می‌باشند. این در حالی است که بیشترین افزایش آبهستگی برای حالت الف و ب در پایه اول واقع در بالادست رخ داده و برابر  $75/5$  و  $76/42$  درصد بدست آمده‌اند. همچنین روند افزایش آبهستگی در صورت افزایش عدد فرود، برای هر دو گروه پایه بالادست و پایین‌دست مشابه هم بوده است. طبق مشاهدات قبلی و نتایج حاصل از شکل (۱۴)، مشاهده می‌شود که افزایش عدد فرود در حالت با گودال (ب)، پایین‌دست را بیشتر از حالت بدون گودال (الف)، تحت تاثیر قرار می‌دهد. چراکه با مراجعه به توضیحات پیشین، حضور گودال در عدد فرود  $0/25$ ، در مقایسه با عدد فرود  $0/5$ ، بستر پایین‌دست را کمتر در معرض آبهستگی قرار داده است. لذا با در نظر گرفتن اختلاف ناچیز آبهستگی بین حالت الف و ب در عدد فرود  $0/5$ ، می‌توان تاثیر بیشتر عدد فرود در حالت ب (با گودال)، در بستر پایین‌دست را توجیه کرد.

نعل اسبی ایجاد شده در جلوی پایه، قسمت پشت پایه را تحت تاثیر قرار نمی‌دهد.



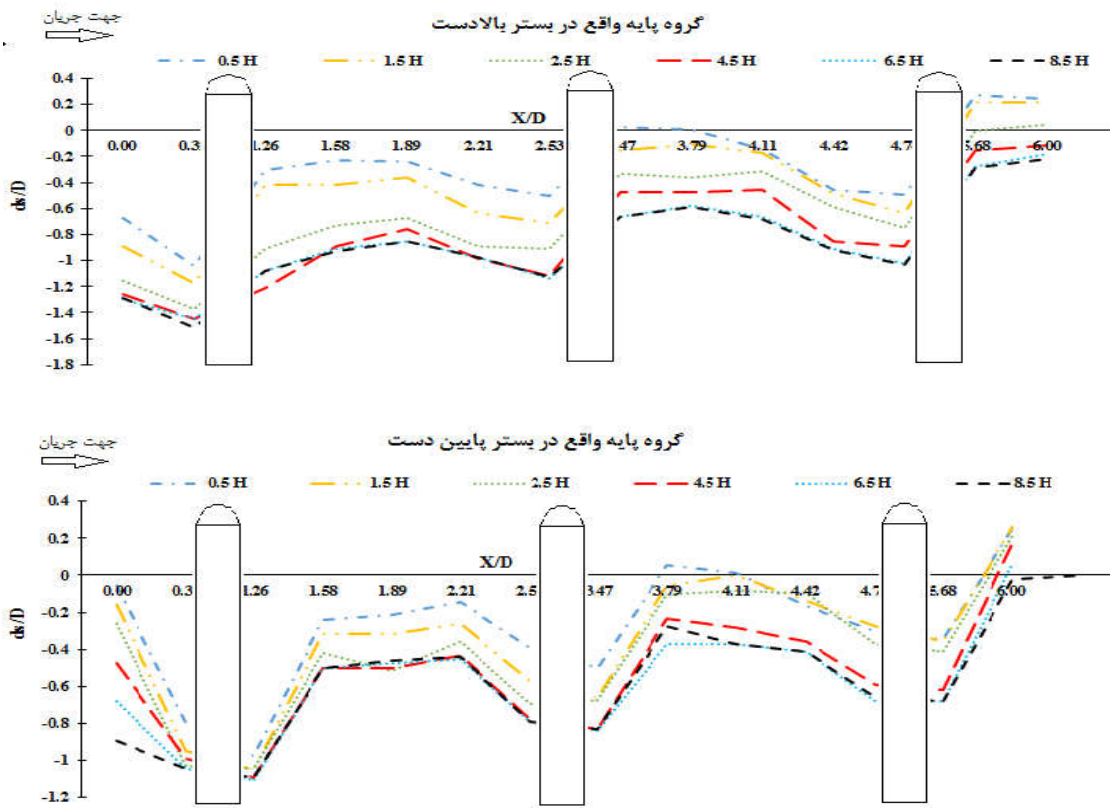
شکل ۱۰- توسعه زمانی آبهستگی در جلو و پشت پایه‌ها برای عدد فرود  $0/5$



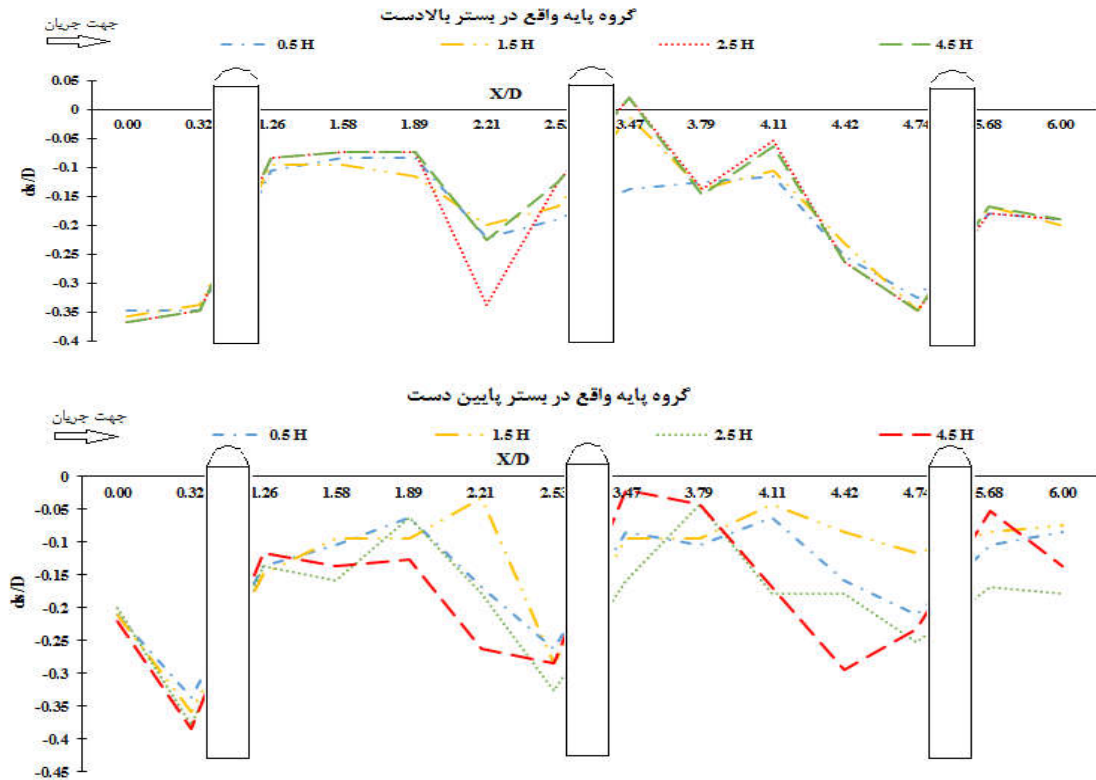
شکل ۱۱- توسعه زمانی آبهستگی در جلو و پشت پایه‌ها برای عدد فرود  $0/25$

##### پروفیل طولی آبهستگی

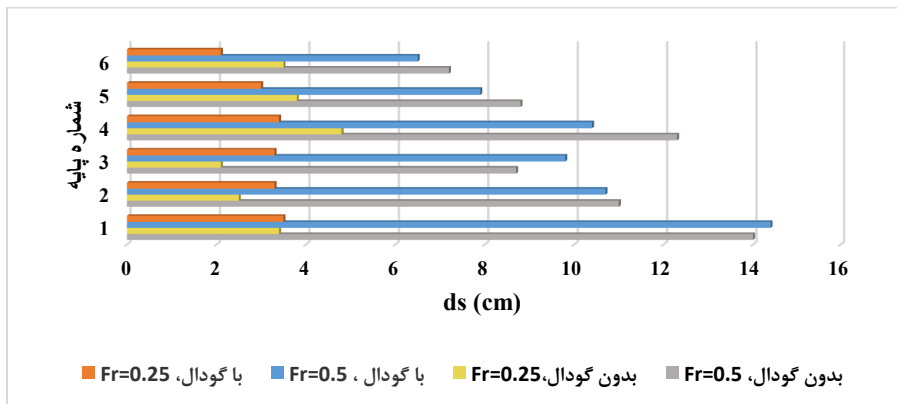
شکل‌های (۱۲ و ۱۳) پروفیل‌های طولی آبهستگی حول گروه پایه‌های بستر بالادست و پایین‌دست را در حالت بستر با گودال برای اعداد فرود  $0/25$  و  $0/5$  نشان می‌دهند. مشاهده می‌شود که برای عدد فرود  $0/5$  عمق آبهستگی بعد از  $8/5$  ساعت و برای عدد فرود  $0/25$  بعد از  $4/5$  ساعت به تعادل رسیده است.



شکل ۱۲- پروفیل طولی آبشستگی بستر بالادست و پایین دست برای عدد فرود ۰/۵



شکل ۱۳- پروفیل طولی آبشستگی بستر بالادست و پایین دست برای عدد فرود ۰/۲۵

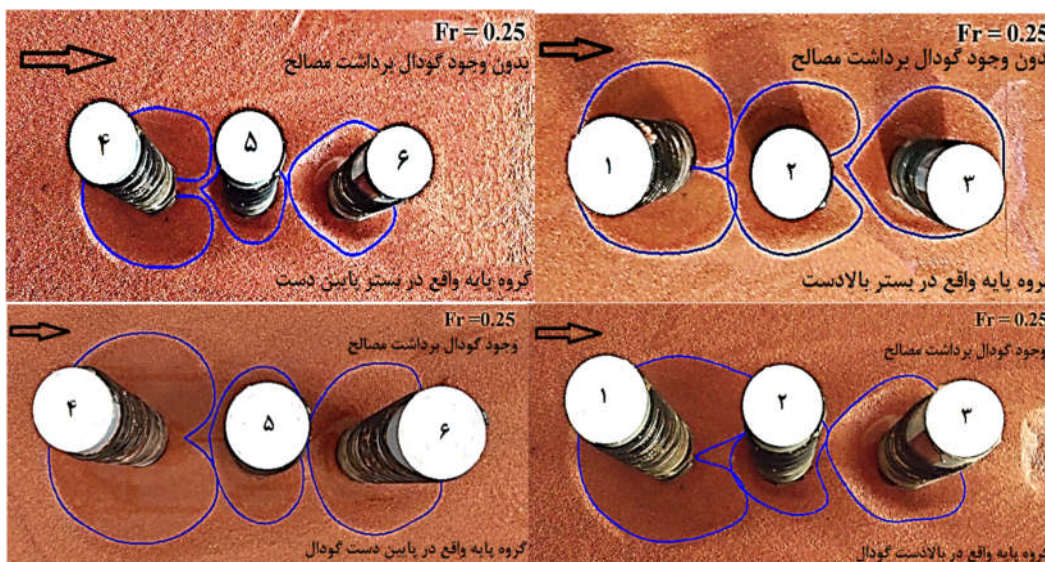


شکل ۱۴- مقایسه عمق آتشسوزی حالت بدون گودال و با گودال برای دو عدد فرود مختلف

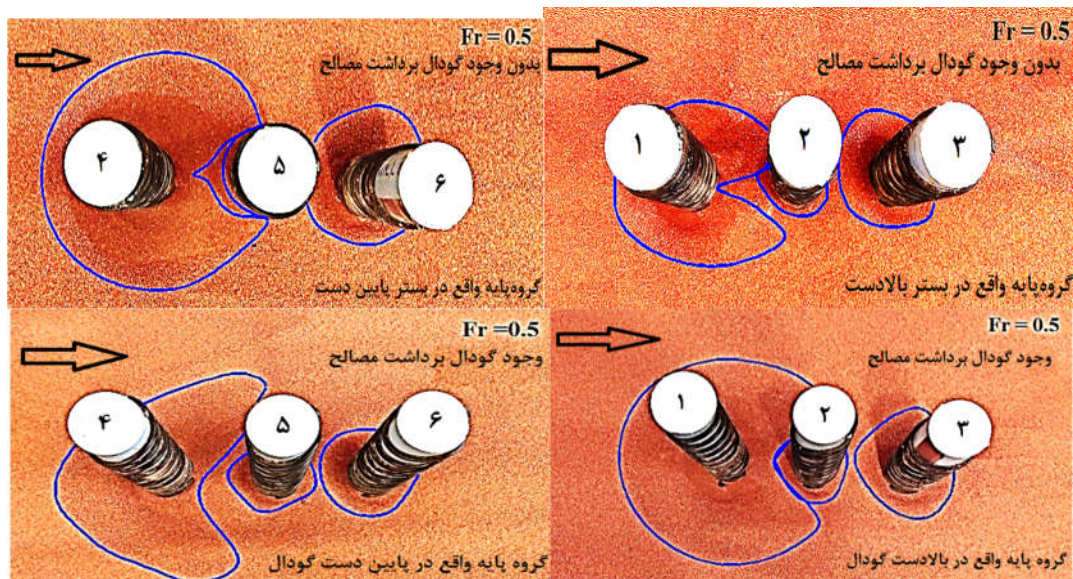
همچنین بیشینه وسعت آتشسوزی در بستر با گودال، برای عدد فرود ۰/۲۵ در پایه چهارم و برای عدد فرود ۰/۵ در پایه اول رخ داده است. بنابراین مقدار عمق و وسعت آتشسوزی در حالت ب (بستر با گودال) از روند مشابهی پیروی می کند. این در حالی است که در بستر بدون گودال (حالت الف)، در عدد فرود ۰/۵، پایه چهارم دارای بیشترین وسعت آتشسوزی بوده است. در جریان های با سرعت زیاد، تاثیر دیواره کانال بر جریان منجر به حرکت رسوبات به سمت مرکز بستر شده و در صورت عدم وجود گودال باعث ایجاد برآمدگی در میانه عرضی کانال در راستای جریان می شود. کاهش عمق جریان در مرکز بستر منجر به افزایش عدد فرود و در نتیجه افزایش سرعت در راستای پایه ها شده و رسوبات را با حجم زیادی به اطراف پایه چهارم منتقل کرده و در نتیجه موجب افزایش وسعت در این پایه می گردد. لازم به ذکر است که گودال برداشت مصالح بین گروه پایه بستر بالادست و بستر پایین دست واقع شده و جهت جریان با فلش مشخص شده است.

### بررسی الگوی آتشسوزی

به دلیل اهمیت هرچه بیشتر شناخت مکانیسم آتشسوزی و برای تحلیل بهتر این پدیده نتایج دیگری از پدیده آتشسوزی در قالب وسعت آتشسوزی به صورت شکل های (۱۵ و ۱۶) در تحقیق حاضر آورده شده است. وجود پایه پل در مسیر جریان، باعث تغییر الگوی جریان و ایجاد حفره آتشسوزی شده است. برخورد جریان به پایه با ایجاد تلاطم منجر به تشکیل گردابه هایی می شود که گودال آتشسوزی را عمیق تر می کند. شتاب جریان در دو طرف پایه تا زمانی که تنش بحرانی کمتر شود، با ایجاد دو شکاف در بستر، انتقال رسوب از گودال به اطراف پایه ها را آسان تر کرده و در اطراف پایه ها الگویی به شکل قلب ایجاد می کند که در شکل (۱۵ و ۱۶) قابل مشاهده است. وسعت آتشسوزی پایه های میانی در هر دو گروه پایه بالادست و پایین دست برای اعداد فرود ۰/۲۵ و ۰/۵ کمتر از پایه های دیگر بوده است که بیانگر غلبه اثر محافظت شونگی از جانب پایه جلوی خود، بر اثر نگرانی از پایه پشتی است.



شکل ۱۵- وسعت آتشسوزی اطراف گروه پایه های بالادست و پایین دست در حضور و عدم حضور گودال برای عدد فرود ۰/۲۵



شکل ۱۶- وسعت آبخستگی اطراف گروه پایه‌های بالادست و پایین دست در حضور و عدم حضور گودال برای عدد فرود ۰/۵

#### بررسی توپوگرافی بستر

شکل (۱۷) توپوگرافی بستر بالادست و پایین دست با عدد فرود ۰/۵ و دبی ۳۰ لیتر بر ثانیه در دو حالت الف ( بدون گودال) و ب ( با گودال) در زمان تعادل را نشان می‌دهد. تمرکز خطوط اطراف پایه‌های ۱ و ۴ بیانگر تغییرات بیشتر عمق آبخستگی حول این پایه‌ها و تاثیر بیشتر الگوی جریان در پایه‌های جلویی هر گروه پایه است. همچنین وسعت و عمق آبخستگی بیشینه که حول پایه‌های اول هر گروه پایه رخ داده است نیز به وضوح مشاهده می‌شود. با توجه به شکل (۱۷) می‌توان بیان کرد که در حالت وجود گودال، تغییرات پروفیل بستر در بالادست بیشتر بوده و پایه‌ها در وسعت و عمق بیشتری دچار آبخستگی شده‌اند. بر اساس نتایج مشاهده شده قبلی و تحلیل‌های انجام گرفته در این بخش می‌توان نتیجه گرفت که آبخستگی پایه‌های پل به چاله‌های پایین دست حساس‌تر بوده و حتی‌الامکان می‌بایست برداشت مصالح از بالادست پایه‌ها انجام گیرد.

#### مقایسه با سایر محققین

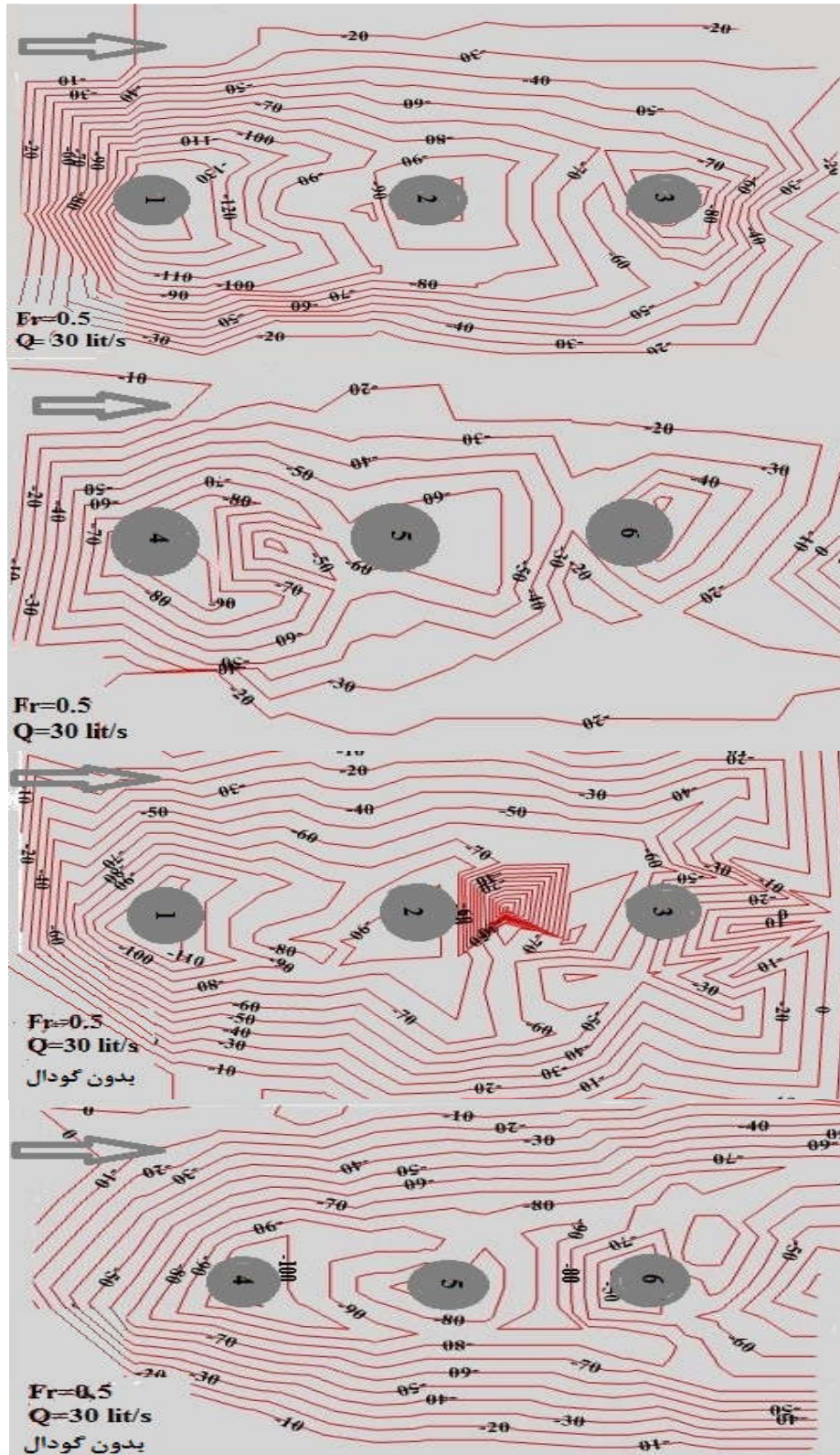
با توجه به عدم وجود آزمایش‌های مربوط به حضور توامان گروه پایه مسلح شده با کابل و برداشت مصالح از اطراف گروه پایه و از آنجایی که تنها بررسی کنترل آبخستگی توسط مسلح کردن گروه پایه‌ها توسط عقلی در سال ۱۳۹۱ و بررسی تک پایه قائم با کابل دورپیچ توسط ایزدی‌نیا و حیدرپور انجام گرفته است، در تحقیق حاضر به مقایسه عمق آبخستگی بدست آمده با نتایج تحقیقات عقلی در رابطه با گروه پایه سه تایی در راستای جریان، با کابل دورپیچ و با شرایط هیدرولیکی مشابه ( کانال به عرض ۱/۲

متر و نسبت سرعت متوسط به سرعت برشی بحرانی) و تحقیقات ایزدی‌نیا و حیدرپور بر روی تک پایه مسلح شده با کابل پرداخته شده است. لازم به ذکر است که در تحقیق حاضر برای نزدیکی با شرایط تحقیقات دو محقق مذکور، آزمایش‌ها در شرایط بدون برداشت مصالح مورد مقایسه قرار گرفت. شکل (۱۸) توسعه زمانی آبخستگی پایه با حداکثر عمق آبخستگی را نشان می‌دهد. با توجه به شرایط متفاوت آزمایشگاهی مشاهده می‌شود که نه تنها میزان آبخستگی در هر دو حالت استفاده از گروه پایه ساده و مسلح شده در تحقیق حاضر کمتر از نتایج عقلی و ایزدی‌نیا و حیدرپور بوده است، بلکه با مقایسه حالت ساده و مسلح شده در هر دو مطالعه مشاهده می‌گردد که حداکثر عمق آبخستگی در تحقیق حاضر با مسلح کردن گروه پایه حدود ۵۸ درصد کاهش داشته است. این در حالی است که در مطالعه عقلی این کاهش ۱۶ درصد و در مطالعه ایزدی‌نیا ۲۰ درصد است.

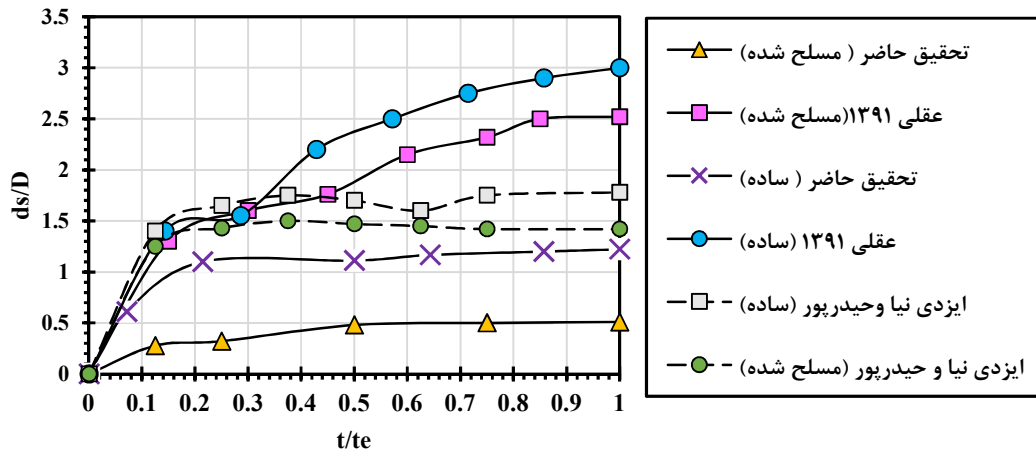
مقایسه داده‌های اندازه‌گیری شده آزمایشگاهی و نتایج حاصل از روابط آبخستگی محققین مختلفی همچون Jain (1981)، Bresur (1977)، Hancu (1971) و Richardson (CSU, 2001) در شکل (۱۹) نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که داده‌های اندازه‌گیری شده در این تحقیق با داده‌های حاصل از روابط سایر محققین همبستگی نسبتاً نزدیکی داشته است. به عبارت دیگر پراکندگی داده‌ها حول خط ۴۵ درجه، با در نظر گرفتن اینکه آزمایش‌ها در شرایط مختلف آزمایشگاهی انجام گرفته و پارامترهای موثر بر آبخستگی در دامنه‌های مختلف مورد بررسی قرار گرفته‌اند، نتیجه رضایت‌بخشی می‌باشد. همچنین

نتایج نزدیک تری به داده های آزمایشگاهی ارائه شده در این تحقیق داشته اند.

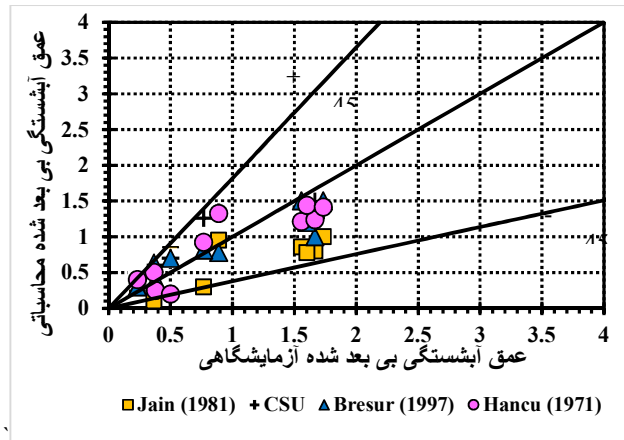
مشاهده گردید که رابطه هانسو (۱۹۷۱) و برزور (۱۹۹۷) به ترتیب با ضریب تعیین  $0.74$  و  $0.71$  در مقایسه با دو رابطه دیگر،



شکل ۱۷- توپوگرافی بستر بالادست و پایین دست در حالت بدون برداشت مصالح و با برداشت مصالح برای عدد فرود  $0.5$



شکل ۱۸- مقایسه منحنی توسعه زمانی آبشستگی تحقیق حاضر و سایر محققین برای حداکثر عمق آبشستگی



شکل ۱۹- مقایسه داده‌های اندازه‌گیری شده با داده‌های محاسباتی

### نتیجه‌گیری کلی

در تحقیق حاضر تاثیر گودال در آبشستگی اطراف گروه پایه مسلح شده با کابل واقع در راستای جریان و در شرایط آب زلال مورد بررسی قرار گرفت. ابتدا آبشستگی حول گروه پایه‌های ساده و مسلح شده مورد مقایسه قرار گرفت و نشان داده شد که گروه پایه‌های مسلح شده نسبت به گروه پایه‌های ساده در بهترین حالت، بیشینه آبشستگی را حدود ۵۶ درصد کاهش داده‌اند. بنابراین آزمایش‌ها در دو حالت الف (بستر بدون گودال) و ب (بستر با گودال)، برای گروه پایه‌های مسلح شده انجام گرفت و نتایج حاصل نشان داد که به‌طور کلی در هر دو حالت برای عدد فرود ۰/۲۵، گروه پایه واقع در بستر پایین دست و برای عدد فرود ۰/۵، گروه پایه واقع در بالادست دارای بیشترین عمق آبشستگی است. همچنین مشاهده گردید که گروه پایه‌های پل به چاله‌های برداشت شده از پایین دست حساستر بوده و بر عکس حفر گودال در بالادست سازه منجر به کاهش عدد فرود و در نتیجه کاهش

آبشستگی حول گروه پایه‌ها می‌گردد. نتایج دیگری نیز از بررسی تاثیر گودال بر آبشستگی گروه پایه پل در تحقیق حاضر به شرح زیر بدست آمده است:

۱- برداشت مصالح از بستر در بدترین حالت منجر به افزایش ۴ درصدی حداکثر عمق آبشستگی در بستر بالادست و کاهش ۹ درصدی این عمق در بستر پایین دست شد و در گروه پایه مسلح شده منجر به افزایش ۶ درصدی حداکثر عمق آبشستگی در بستر بالادست و کاهش ۵ درصدی این عمق در بستر پایین دست گردید.

۲- افزایش عدد فرود از ۰/۲۵ به ۰/۵، در تمام پایه‌ها و برای هر دو حالت الف و ب، باعث افزایش چشم‌گیر عمق آبشستگی گردید. به طوری که کمترین افزایش آبشستگی برای حالت الف و ب به ترتیب برابر ۴۴ و ۶۶ درصد و مختص پایه ۶ و بیشترین افزایش آبشستگی به ترتیب ۷۶ و ۷۵ درصد و در پایه ۱ مشاهده گردید.



حمل می‌کند کمتر از ظرفیت حمل رسوب می‌باشد، در نتیجه جریان از دیواره پایینی گودال، رسوب برداشته تا بار از دست داده خود را جبران کند. این فرایند منجر به ایجاد تلاطم در بستر شده و زمان تعادل آبشستگی را افزایش داده است.

۷- مقدار عمق و وسعت آبشستگی در حالت ب (بستر با گودال) از یک روند پیروی می‌کند. این در حالی است که در بستر بدون گودال (حالت الف)، برای عدد فرود  $0.5$ ، پایه چهارم دارای بیشترین وسعت آبشستگی بوده است.

۸- با توجه به اینکه جریان در رودخانه‌ها در شرایط زیر بحرانی می‌باشد، لذا برداشت مصالح از بستر رودخانه، الگوی فرسایشی خاصی را در بازه بالادست ایجاد می‌کند که فرسایش بالارونده نام دارد. بدین‌صورت که با رسیدن جریان به گودال حاصل از برداشت مصالح، الگوی جریان تغییر کرده و با برخورد به دیواره پایین دست گودال به سمت بالادست برگشت پیدا کرده و منجر به فرسایش بیشتر بستر بالادست می‌گردد.

۹- وجود کابل پیچیده شده به دور پایه، زبری پایه را افزایش داده و باعث تأخیر جدایی جریان در پشت پایه می‌گردد. این امر باعث کاهش قدرت گردابه‌های برخاسته در پشت پایه شده، در نتیجه راندمان کابل در کاهش آبشستگی در پشت پایه بیش از جلوی پایه می‌باشد.

۳- مسلح کردن گروه‌پایه‌ها در عدد فرود  $0.25$ ، حداکثر عمق آبشستگی را  $58$  درصد نسبت به گروه‌پایه ساده، کاهش می‌دهد. بدین صورت آبشستگی در اثر جریان رو به پایین از جلوی پایه شروع شده و به سمت پایین دست پایه توسعه می‌یابد. کابل پیچیده شده به دور پایه از قدرت جریان رو به پایین می‌کاهد و از آنجا که گردابه‌های نعل اسبی در اثر جریان رو به پایین به وجود می‌آیند، گردابه‌های نعل اسبی ضعیتر شده و از شدت آبشستگی و همچنین عمق آبشستگی کاسته می‌شود.

۴- در هر دو گروه پایه واقع در بالادست و پایین دست گودال، پایه‌های جلویی نقش نگهبان و محافظت کننده پایه‌های عقبی را ایفا کرده و از لحاظ وسعت و عمق در معرض آبشستگی بیشتری قرار گرفت.

۵- در پایه‌های میانی هر دو گروه پایه اثر تقویت‌شوندگی از جانب پایه جلوی خود بر اثر نگهبانی این پایه دریافت کرده و وسعت آبشستگی در پایه‌های میانی کمتر از پایه‌های عقبی مشاهده گردید.

۶- حضور گودال، زمان رسیدن به عمق تعادل آبشستگی را افزایش داده است. هنگامی که رسوبات به محل گودال می‌رسند، به دلیل کاهش سرعت آب و افزایش عمق، جریان قادر به حمل رسوبات بزرگتر نبوده و رسوبات در دیواره بالایی گودال ته‌نشین می‌شوند. با توجه به اینکه بار رسوبی که آب هنگام خروج از گودال

## REFERENCES

- Aghli, M. (2012). Effect of combination wrapping cable and collar on scouring depth cylindrical bridge pier groups on rivers meander. In Master's thesis, Shiraz University, Civil engineering department, Faculty of Engineering. (In Farsi)
- Beg, M. and Beg, S. (2014). Scour hole characteristics of two unequal size bridge piers in tandem arrangement. *J. Hydraulic Eng*, 21(1), 85-96.
- Chiew, Y. M. (1992). Scour protection at bridge piers. *Journal of Hydraulic Engineering*, 118(9), 1260-1269.
- Chang, W. Y. Lai, J. S. and Yen, C. L. (2004). "Evolution of scour depth at circular bridge piers." *Journal Hydraul. Engineering*. 1309, 905-913.
- Dey, S., Raikar, R. V. and Roy, A. (2006). Scour at submerged cylindrical obstacles under steady flow. *Journal of Hydraulic Engineering*, 134(1), 105-109.
- Debnath, K. and Chaudhuri, S. (2010). Laboratory experiments on local scour around cylinder for clay and clay-sand mixed beds. *Engineering Geology*, 111(1-4), 51-61
- Diab, R., Link, O. and Zanke, U. (2010). Geometry of developing and equilibrium scour holes at bridge piers in gravel. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 37(4), 544-552
- Desine, M. (2018). Laboratory review of the transfer of pits made under the influence of riverbed materials, in Master's thesis, Maragheh University: Civil engineering department, Faculty of Engineering. (In Farsi)
- Elsebaie, I. H. (2013). An experimental study of local scour around circular bridge pier in sand soil. *International Journal of Civil & Environmental Engineering IJCEE-IJENS*, 13(01)
- Graf, W. and Istiarto, I. (2002). Flow pattern in the scour hole around a cylinder. *Journal of Hydraulic Research*, 40(1): p. 13-20.
- Henderson, F. (1966). Open channel flow. *Macmillan series in civil engineering*. New York.
- Heidarpour, M., Afzalimehr, H., and Khodarahmi, Z. (2008). Local scour protection of circular bridge pier groups using slot. *Journal of Agricultural Sciences and Natural Resources*, 14(3). (In Farsi)
- Ismael, A., Gunal, M., & Hussein, H. (2015). Effect of bridge pier position on scour reduction according to flow direction. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 40(6), 1579-1590.
- Izadinia, E. and Heidarpour, M. (2014). Investigation and comparison of efficiency of cable and groove in protection against scouring. (in Farsi)
- Kothyari, U. C., Garde, R. J. and Ranga Raju, K. G. (1992). "Temporal variation of scour around circular bridge piers." *J. Hydraul. Eng*, 118,

- 1091-1106.
- Kondolf, G.M. (1997). Effects of dams and gravel mining on rivers. *Environmental Management*, 21(4), 533-551.
- Karimaee Tabarestani, M. and Zarrati, A. R. (2012). Effect of collar on time development and extent of scour hole around cylindrical bridge pier. *Int. J. Eng, Transactions C*, 25(1), 11-16.
- Khwaierakpam, P. and Mazumdar, A. (2009). Local scour around hydraulic structures. *International Journal of Recent Trends in Engineering*, 1(6), 59.
- Melville, B. W. (1997). "Pier and abutment scour — an integrated ap-proach." *J. Hydr. Engrg. ASCE*, 123(2), 125 – 136.
- Masjedi, A., Bejestan, M. S. and Esfandi, A. (2010). Experimental study on local scour around single oblong pier fitted with a collar in a 180 degree flume bend. *International Journal of Sediment Research*, 25(3), 304-312.
- Mia, F. and H. Nago. (2003). Design Method of Time-Dependent Local Scour at Circular Bridge Pier. *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, 117(7):891-904.
- Najafzadeh, M. and Barani, G. A. (2014). Experimental study of local scour around a vertical pier in cohesive soils. *Scientia Iranica. Transaction A, Civil Engineering*, 21(2), 241.
- Özalp, M.C. and Z. Bozkuş. (2013). Experimental investigation of local scour around bridge pier groups, MSc thesis, Department of Civil Engineering. *The graduate School of Natural and Applied Sciences of Middle East Technical University*.
- Raudkivi, A.J. and R. Ettema. (1983). Clear-water scour at cylindrical piers. *Journal of Hydraulic Engineering*, 109(3): p. 338-350.
- Rambabu, M. Rao, S. N. Sundar, V. (2003). Current-induced scour around a vertical pile in cohesive soil. *Ocean Engineering*, 30(7), 893-920.
- Rezaei, M. Daneshfaraz, R. Dasine, M. (2018). experimental Investigation of Adding Clay and PAM on Scour Reduction Bridge Piers under the influence Removal of River materials. *Journal of Iranian Hydraulic Association*, 13(3).
- Sheppard, D. M. Miller Jr, W. (2006). Live-bed local pier scour experiments. *Journal of Hydraulic Engineering*, 132(7), 635-642.
- Ting, F. C. Briaud, J. L. Chen, H. C. Gudavalli, R. Perugu, S. Wei, G. (2001). Flume tests for scour in clay at circular piers. *Journal of hydraulic engineering*, 127(11), 969-978.
- Vittal, N. Kothyari, U.C. and Haighghat, M. (1994). Clear Water Scour around Bridge Piers Group., *J. Hydr. Engrg. ASCE*, 120(11), 1309-1318.