

## تأثیر ابعاد زبری ایجاد شده در وجه بالادست و پایین دست پایه پل مربعی بر گودال آبستنگی

حسین کاظمی زاده<sup>۱</sup>، مجتبی صانعی<sup>۱\*</sup> و هومن حاج کندی<sup>۳</sup>

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۱۲/۲۸؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۸/۷)

### چکیده

با افزایش چاله آبستنگی در بالادست و پایین دست پایه‌های پل طراحی شده روی رودخانه‌ها، پایداری استاتیکی سازه پل به مخاطره کشیده می‌شود. برای مقابله با این پدیده هیدرولیکی راهکارهای مختلفی پیشنهاد شده است. یکی از این راهکارها، تغییر هیدرودینامیک جریان در اطراف پایه پل‌ها است. این راهکار با کاهش جریان پایین‌رونده در بالادست پایه پل‌ها از افزایش آبستنگی جلوگیری به عمل می‌آورد. در تحقیق حاضر، با استفاده از ساخت مدل‌های پایه پل مربع با زبری‌های مستطیلی و مثلثی در دو حالت پیوسته و ناپیوسته در ابعاد مختلف سعی در بررسی تأثیر ساختار هندسی زبری‌های مورد آزمایش بر حداکثر میزان عمق آبستنگی در اطراف پایه پل مربعی شد. نتایج تحقیق نشان داد، با افزایش طول زبری در بالادست و پایین دست پایه پل، چاله آبستنگی به صورت محسوسی با نرخ کاهشی عمق آبستنگی ماکزیمم در حدود ۳۴ درصد نسبت به مدل شاهد (بدون زبری) تغییر وضعیت می‌دهد. همچنین مقایسه‌های بین مدل‌های زبری پیوسته و ناپیوسته نشان داد، با اجرای ناپیوسته زبری مستطیلی و مثلثی میزان حداکثر عمق آبستنگی به صورت محسوسی کاهش پیدا می‌کند. در نهایت با در نظر گرفتن آنالیز ابعادی، رابطه‌ای بر پایه رگرسیون غیرخطی بر داده‌های آزمایشگاهی برازش داده شد. در این رابطه به‌ازای وجود رسوبات ماسه‌ای، متوسط میزان عمق آبستنگی در حالت‌های مختلف زبری پیش‌بینی شد. نتایج نشان داد، مقادیر محاسباتی با مقادیر واقعی به‌دست آمده از آزمایشات برازش مناسبی دارد.

واژه‌های کلیدی: گودال آبستنگی، پایه پل مربعی، زبری مستطیلی، زبری مثلثی، رگرسیون غیرخطی، آنالیز ابعادی

۱. گروه عمران آب، واحد نجف آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف آباد، ایران

۲. پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری، دانشگاه تهران

۳. گروه عمران، واحد تهران مرکزی، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

\*: مسئول مکاتبات: پست الکترونیکی: saneie\_m@scwmri.ac.ir

## مقدمه

$t_c$  زمان تعادل است.

با این حال بررسی در زمینه گروه پایه‌ها کمتر مورد توجه بوده است. پدیده‌های مهمی که به دلیل وجود گروه پایه‌ها ایجاد می‌شوند عبارت‌اند از: پدیده حفاظ بودن (Sheltering)، پدیده تقویت کننده (Reinforcing)، گرداب‌های نعل اسبی به هم فشرده (Horse-shoe vortex compression) و گرداب‌های جاری (Shed vortices). تأثیر پدیده‌های فوق با تغییر فاصله بین پایه‌ها، تعداد پایه‌ها و نیز زاویه برخورد آب با پایه‌ها تغییر خواهند کرد. در زمینه مطالعه آبشستگی در گروه پایه‌ها می‌توان به مطالعات بایرام و لارسن (۵) و زراتی و همکاران (۲۲)، اتما و همکاران (۱۱) و بهشتی و عطایی آشتیانی (۷) اشاره کرد.

هانا (۱۳) مطالعات خود را در زمینه آبشستگی در گروه پایه‌های دوتایی با استفاده از پایه‌های استوانه‌ای در جریان دائمی و در شرایط آب زلال و با استفاده از رسوبات یکنواخت با قطر متوسط  $0.78$  میلی‌متر انجام داد. آزمایش‌ها در ابتدا برای تک‌پایه استوانه‌ای انجام شد که نتایج آن برای مقایسه با گروه پایه‌ها به کار رفت. نتایج نشان داد،  $80\%$  درصد عمق متعادل آبشستگی بعد از مدت  $7$  ساعت اتفاق می‌افتد. از این‌رو، تمام آزمایش‌ها در مدت  $7$  ساعت انجام شدند. سرعت برشی جریان در آزمایش‌ها هانا  $72\%$  درصد مقدار بحرانی آن در آستانه حرکت ذرات رسوب بود.

عطایی آشتیانی و بهشتی (۳)، آرایش متفاوت گروه پایه‌ها را در شرایط آب زلال مورد بررسی قرار دادند. نتایج مطالعه آنها نشان داد، آبشستگی گروه پایه‌ها متفاوت از تک‌پایه بوده و بستگی به فاصله پایه‌ها دارد. هرچه فاصله پایه‌ها کمتر باشد اثر متقابل پایه‌ها بیشتر شده و زمانی که نسبت فاصله پایه به قطر پایه کوچک‌تر و یا مساوی  $0.15$  باشد، گروه پایه همانند تک پایه رفتار می‌کند و زمانی که این نسبت بزرگ‌تر از دامنه  $2$  تا  $4$  باشد، بسته به نوع آرایش پایه‌ها اثر متقابل پایه‌ها حذف می‌شود. حیدرپور و همکاران (۱۴)، تأثیر استفاده از شکاف مستطیلی در کنترل و کاهش آبشستگی موضعی در گروه پایه‌های دو و سه‌تایی استوانه‌ای واقع در امتداد یک خط در شرایط آب زلال

ایجاد تأسیسات آبی در مجاورت رودخانه‌ها از قبیل ایستگاه‌های تأمین آب کشاورزی، شرب و ساحل‌سازی، دیواره‌های ساحلی، پل‌ها و منابع آبی، ایجاب می‌کند، اطلاعات لازم با بررسی‌های پژوهشی و علمی تهیه شود و با رعایت آن، به سرمایه‌گذاری اقدام شود. در اثر عبور جریان آب، در پایین دست سازه‌های هیدرولیکی به علت شدت جریان زیاد و در اثر به وجود آمدن جریان‌های متلاطم موضعی، فرسایش بستر به وجود می‌آید. احداث پل در رودخانه‌ها همواره با فرایند فرسایش و آبشستگی در پایه آن همراه است. برخورد خطوط جریان و جدایی آنها از پایه، سیستم‌های گردابی در اطراف پایه ایجاد می‌کند. برسر و رادیکیو (۹) بیان داشتند که الگوی جریان سه‌بعدی اطراف پایه متشکل از جریان رو به پایین (Down flow) و دو نوع سیستم گردابی (گرداب نعل اسبی Horse-shoe vortex) و برخاستگی هستند.

تاکنون اکثر پژوهشگران الگوی جریان در اطراف تک‌پایه‌ها را مورد مطالعه قرار داده‌اند. که بر این اساس از نظر ملویل و چیو (۱۳)، زمان تعادل بستگی به نسبت سرعت جریان به سرعت بحرانی  $\frac{u}{u_c}$  و نسبت عمق جریان به قطر پایه دارد. توسعه زمانی عمق آبشستگی با استفاده از رابطه زیر محاسبه می‌شود.

$$\frac{d_s}{d_{se}} = \exp(-0.03 \left| \frac{u_c}{u} \ln\left(\frac{t}{t_c}\right) \right|^{1.6}) \quad (1)$$

همچنین نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که بعد از گذشت  $10\%$  درصد زمان تعادل، بسته به سرعت جریان،  $50\%$  تا  $80\%$  درصد عمق متعادل آبشستگی توسعه پیدا می‌کند.

بارکدول (۴) با تکیه بر داده‌های ملویل و چیو، رابطه رگرسیونی زیر را برای تخمین عمق آبشستگی نسبت به زمان ارائه کردند:

$$\frac{d_s}{d_{se}} = \exp(-0.03 \left| \frac{u_c}{u} \ln\left(\frac{t}{t_c}\right) \right|) \quad (2)$$

که در این روابط  $d_s$  عمق آبشستگی در هر لحظه،  $d_{se}$  عمق آبشستگی نهایی،  $u_c$  سرعت بحرانی،  $u$  سرعت متوسط،  $t$  زمان،

کرده و به تأخیر می‌اندازد ولی، در صورت توسعه آبشستگی به زیر آستانه، آبشستگی با سرعت پیش رفته و به همان عمق چاله بدون آستانه می‌رسد.

لانکا و همکاران (۱۵) تأثیر مدت زمان آزمایش، زاویه مورب و گروه شمع‌های محافظتی را در عمق آبشستگی برای یک گروه پایه بررسی کردند. امینی و همکاران (۲)، به‌طور تجربی و در شرایط آبشستگی آب زلال مشاهده کردند که عمق آبشستگی وابسته به قطر پایه، فاصله پایه‌ها، و نسبت استغراق پایه‌ها است. همچنین آنها یک روش برای پیش‌بینی عمق آبشستگی برای طیف وسیعی از گروه‌های شمع مستغرق و غیرمستغرق توسعه دادند.

نوردیلا و همکاران (۱۸)، معادلاتی را برای تخمین عمق حداکثر آبشستگی برای یک پایه استوانه‌ای عریض قرار داده شده در رسوب یکنواخت پیشنهاد کردند. بهشتی و آشتیانی (۶)، جریان آشفته در اطراف پایه‌های پل با یک حفره آبشستگی توسعه یافته را توسط اندازه‌گیری سرعت لحظه‌ای با استفاده از ADV مورد مطالعه قرار دادند. آنها با استفاده از سرعت‌های متوسط زمانی و تنش برشی رینولدز در صفحات مختلف افقی و در بخش‌های مختلف طولی و عرضی، الگوی جریان در اطراف پایه‌های پل را بررسی کردند.

سعادتی و همکاران (۲۰)، تأثیر موقعیت قرارگیری آستانه در جلو، میانه و پایین دست گروه پایه کج مستقر روی فونداسیون مستطیلی که در ترازهای مختلف نسبت به بستر رسوبی قرار داده شد، را تحت شرایط مختلف هیپودرولیکی مورد بررسی قرار دادند. مقایسه نتایج نشان داد که از میان موقعیت‌های مختلف استقرار آستانه، آستانه انتهایی تأثیر معنی‌داری بر کاهش آبشستگی در ترازهای مختلف کارگذاری فونداسیون، سرعت‌های نسبی و عمق جریان نداشت. تجزیه و تحلیل مقیاس‌دار حداکثر عمق آبشستگی برای شرایطی که فونداسیون در زیر بستر بود، حاکی از آن است که به‌طور متوسط استقرار آستانه در بالادست فونداسیون باعث کاهش ۲۰ درصدی و کارگذاری آن در قسمت میانی منجر به کاهش ۱۶

را مورد بررسی قرار دادند. عملکرد شکاف در پایه‌های عقبی گروه پایه‌های دو و سه تایی با فاصله چهار برابر قطر پایه بیشتر از پایه‌های جلویی و تک پایه است. همچنین عملکرد شکاف در گروه پایه‌های دو و سه تایی با فاصله دو برابر قطر پایه‌ها، برای کلیه پایه‌ها یکسان و برابر تک پایه است. با افزایش فاصله بین پایه‌ها، در گروه پایه‌های دو و سه تایی عملکرد شکاف در پایه جلویی به علت کاهش عامل تقویت کننده و در پایه‌های عقبی به علت کاهش تأثیر گرداب‌های جاری، افزایش می‌یابد.

استفاده از کابل‌های پیچیده شده به دور پایه برای اولین بار توسط دی و همکاران (۱۰)، به‌عنوان یک روش اقتصادی، ساده و قابل اجرا در کنترل و کاهش آبشستگی پیشنهاد شد. در این روش کابل به صورت حلزونی به دور پایه پیچیده شده و منجر به تضعیف جریان رو به پایین و قدرت گردابه‌های نعل اسبی می‌شود. آنها کارایی کابل پیچیده شده به دور پایه را در شرایط جریان موج‌دار و جریان پایدار را مورد بررسی قرار دادند. همچنین در جریان موج‌دار راندمان کابل پیچیده شده به دور پایه و صفحه جدا کننده متصل شده به پایه را مورد مقایسه قرار دادند. مقدار کاهش عمق آبشستگی در هنگام استفاده از صفحه جدا کننده ۶۱/۶ و برای کابل پیچیده شده به دور پایه در بهترین حالت که در نسبت قطر کابل به قطر پایه برابر ۰/۷۵ بود، برابر ۵۱/۱ درصد گزارش شد. آنها آزمایش‌هایی را در شرایط جریان پایدار در کانالی به طول ۲۰ متر، عرض ۰/۹ متر و عمق ۰/۷ متر با قطر پایه برابر ۲۰ سانتی‌متر و اندازه متوسط ذرات برابر با ۰/۲۶ میلی‌متر انجام دادند. نتایج آنها نشان داد، با افزایش قطر کابل و تعداد کابل‌های پیچیده شده به دور پایه و کاهش زاویه کابل‌ها میزان آبشستگی کاهش می‌یابد. بیشترین مقدار کاهش آبشستگی برابر ۴۶/۳ درصد برای شرایطی که زاویه کابل برابر ۱۵ و نسبت قطر کابل به پایه برابر ۰/۱ است گزارش شد.

پاگلارا و همکاران (۱۹)، به بررسی کاربرد آستانه گابیونی در پایین دست برای حفاظت از آبشستگی پایه پل پرداختند. نتایج حاصل حاکی از آن است که آستانه فرایند آبشستگی را کند

درصد آبشستگی می‌شود.

در تحقیقی به بررسی تأثیر فاصله بین بیرون‌زدگی زبری در پایه پل دایره‌ای پرداخته شد. تأثیر فاصله بین بیرون‌زدگی در این پژوهش مورد بررسی قرار داده شد. نتایج نشان داد، به‌ازای افزایش بیرون‌زدگی زبری، میزان آبشستگی اطراف پایه پل تا ۵۴ درصد کاهش پیدا می‌کند. همچنین افزایش طول بیرون‌زدگی زبری پایه پل، نشان داد که ماکزیمم سرعت افقی در نیم‌رخ سرعت افقی به سمت سطح آب حرکت خواهد کرد. این امر باعث می‌شود که سرعت برشی نسبت به سرعت بحرانی ذرات ماسه کاهش پیدا کند. این امر موجب کاهش حمل رسوبات به پایین دست می‌شود (۲).

در تحقیقی اثر طوق نصب شده در اطراف پایه پل مورد بررسی قرار داده شد. در این تحقیق از پایه پلی با مقطع شش ضلعی استفاده شد. در طول آزمایش‌ها، گودال آبشستگی به‌ازای تغییر فاصله ارتفاعی طوق از بستر رسوبی به صورت سه بعدی اندازه‌گیری شد. نتایج نشان داد، با افزایش ارتفاع طوق از بستر، عمق آبشستگی افزایش پیدا خواهد کرد. همچنین افزایش طول طوق روی پایه شش ضلعی، باعث کاهش رسوب‌شویی در اطراف پایه پل می‌شود (۱۲).

تأثیر زاویه زبری تأثیر مستقیمی بر عمق آبشستگی در جلو و پشت پایه پل دارد. بستوی و همکاران (۸)، با استفاده از مدل آزمایشگاهی به بررسی تأثیر این زاویه پرداختند. در تحقیق انجام شده، تأثیر زاویه با تغییر دادن زاویه مورد بررسی قرار داده شد. نتایج نشان داد، به‌ازای زاویه‌دار شدن بیرون‌زدگی زبری در طوق دور پایه پل، کاهش آبشستگی در گودال آبشستگی رخ خواهد داد. همچنین در این تحقیق، زمان تعادل با پژوهش‌های گذشته مورد ارزیابی و مقایسه قرار داده شد. نتایج نشان داد به‌ازای زاویه‌دار کردن زبری زمان تعادل تا ۵۰ درصد کاهش پیدا خواهد کرد. از این‌رو زاویه‌دار کردن زبری می‌تواند زمان به تعادل رسیدن گودال آبشستگی را به صورت چشمگیری کاهش دهد (۲۱).

ممار و همکاران (۱۷)، به بررسی تأثیر زبری نصب شده

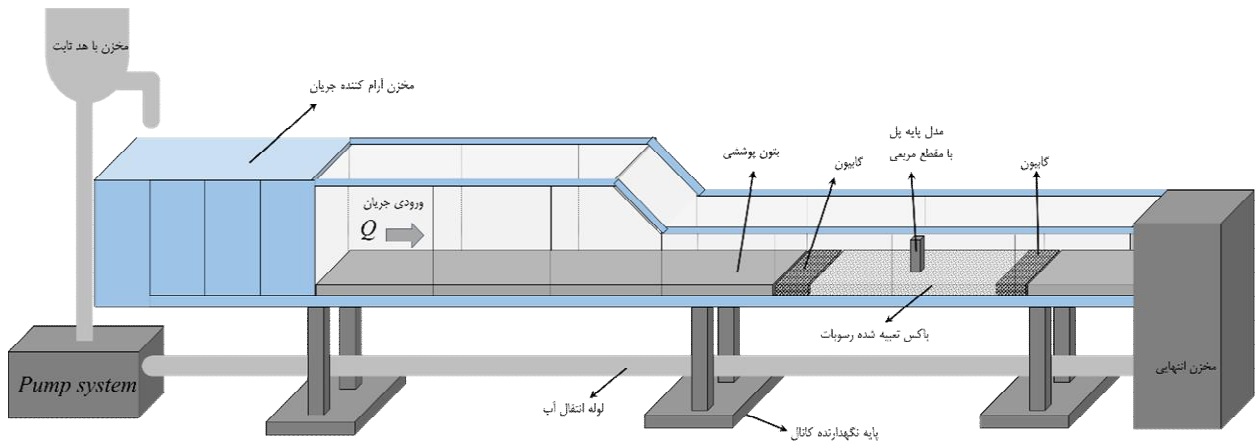
روی پایه‌های پل متوالی پرداختند. نتایج این تحقیق نشان داد که نصب زبری به صورت طوق ناپیوسته تأثیر مستقیم بر کاهش میزان آبشستگی دارد. در حالی که نصب زبری پیوسته به مراتب تأثیر کمتری در کاهش میزان آبشویی نسبت به طوق ناپیوسته دارد.

در این پژوهش، با استفاده از مدل آبشستگی پایه پل با مقطع مربعی، تأثیر زبری بیرون‌زدگی در دو حالت پیوسته و ناپیوسته، مورد ارزیابی قرار داده شد. از دو نوع زبری با سطح مقطع مستطیلی و مثلثی استفاده شد. نتایج اولیه نشان داد، نصب زبری با مقطع مثلثی بر زبری با مقطع مستطیلی ارجحیت دارد این امر نشان می‌دهد زاویه‌دار کردن زبری تأثیر مستقیمی بر میزان آبشستگی دارد و باعث کاهش آبشستگی می‌شود. همچنین ناپیوسته کردن زبری تأثیر مستقیم بر کاهش چاله آبشستگی در جلو پایه پل می‌شود. پیش‌بینی می‌شود، فاصله‌دار کردن زبری‌های نصب شده باعث برخورد جریان‌های پایین‌رونده در جلوی پایه پل می‌شود که این امر سبب افزایش افت انرژی شده و در نهایت کاهش آبشستگی می‌شود.

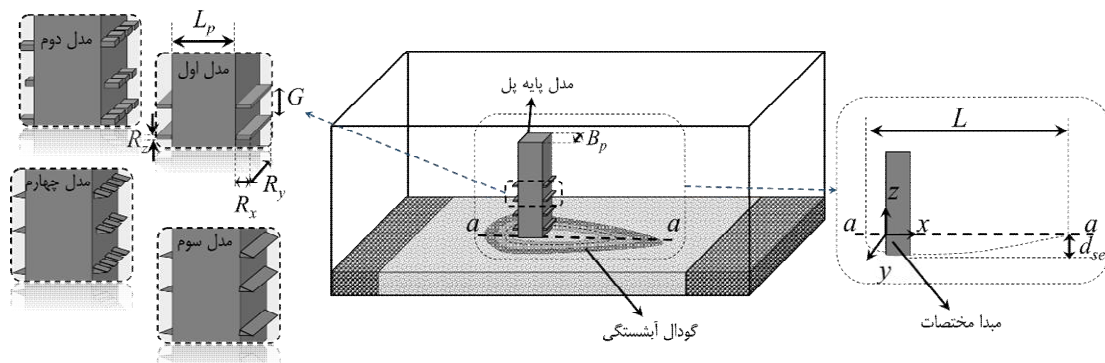
## مواد و روش‌ها

### تجهیزات آزمایشگاهی

فلوم آزمایشگاهی: مدل‌های پایه پل مربعی با زبری‌های مختلف در فلوم آزمایشگاهی با عرض ۵۰ سانتی‌متر در محلی از کانال که جریان توسعه یافته است، ساخته شد. دبی این کانال توسط پمپ تعبیه شده، تنظیم می‌شود. در این تحقیق از سه دبی مختلف با مقدار ۲۴، ۲۸ و ۳۲ لیتر بر ثانیه استفاده شد. آزمایش‌ها در سه ارتفاع نرمال آب به‌ازای دبی‌های یاد شده انجام پذیرفت. در نهایت با استفاده از ترازسنج (Point gage) و متر لیزی تعبیه شده در کانال، پروفیل طولی گودال آبشسته شده، برداشت شد. شکل (۱)، وضعیت قرارگیری مدل‌های آزمایشگاهی را در فلوم آزمایشگاهی و تجهیزات کانال



شکل ۱. کانال آزمایشگاهی و تجهیزات آن



شکل ۲. موقعیت قرارگیری مدل آزمایشگاهی در کانال همراه با پارامترهای فیزیکی مدل زبری پایه پل و مبدأ مختصات

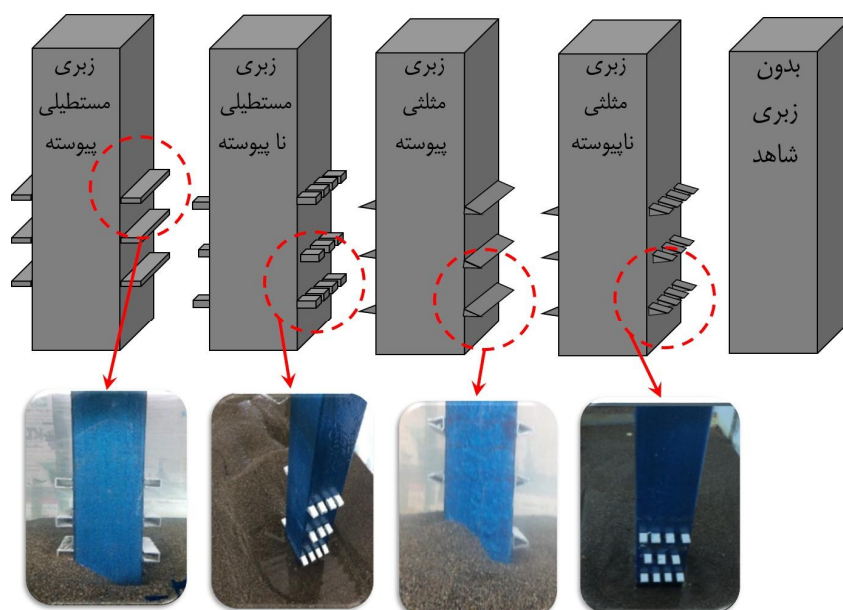
داده شده است. نقطه بالادست مدل پایه پل مربعی در سطح رسوبات به عنوان نقطه مبدأ مختصات در نظر گرفته شده است. از این رو کلیه فواصل با توجه به این نقطه نمایش داده می شوند. مدل های زبری پایه پل: در این تحقیق از ۴ مدل آزمایشگاهی همراه با یک مدل شاهد (بدون زبری) استفاده شد. در شکل (۳)، این مدل ها نمایش داده شده است.

آزمایش ها مدل ها: در جدول (۱)، آزمایش های انجام شده بر روی مدل آزمایشگاهی با زبری وجه بالادست و پایین دست نمایش داده شده است. به ازای یک مدل زبری تعداد ۲۷ آزمایش با طول های مختلف زبری انجام پذیرفت. به ازای ۴ مدل زبری و مدل شاهد در مجموع تعداد ۱۰۹ آزمایش صورت پذیرفت که در کلیه آزمایش ها پروفیل آبخستگی پایه پل اندازه گیری شد.

آزمایشگاهی را نمایش می دهد.

جعبه رسوبات: در جهت کاهش میزان حجم رسوبات برای آماده سازی بستر اولیه در بالادست و پایین دست کانال از ورقه های چوبی برای بالا آوردن کف کانال استفاده شد. این امر موجب می شود که حجم رسوبات استفاده شده کاهش پیدا کند. همچنین با توجه به نظر ملوین و چپو (۱۶)، در رسوبات جریان داری برقرار است. از این رو برای تأمین این جریان، از گابیون هایی در بالادست و پایین دست رسوبات استفاده شد. این مورد در شکل (۱)، مشخص شده است.

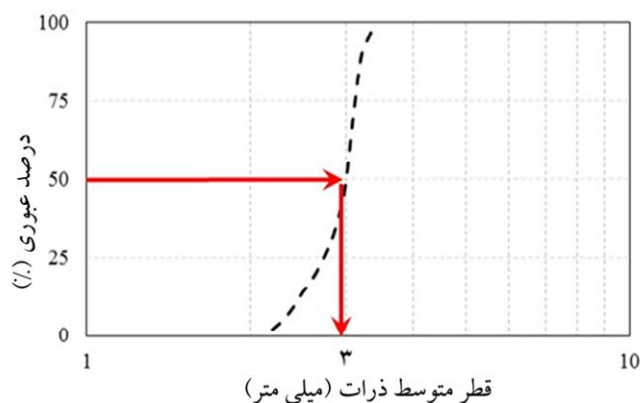
موقعیت قرارگیری پایه پل در فلوام آزمایشگاهی: همان طور که در شکل (۲) نمایان است پایه پل مربعی در جعبه تعبیه شده در کانال، در محلی که جریان توسعه یافته باشد، ساخته شد. همچنین در این شکل کلیه پارامترهای طراحی زبری، نمایش



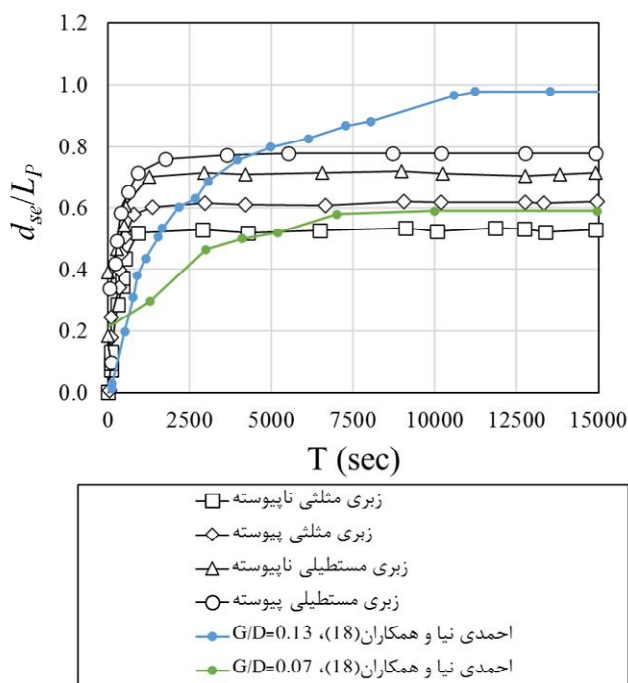
شکل ۳. مدل‌ها آزمایشگاهی زبری در وجه بالادست و پایین‌دست پایه پل

جدول ۱. آزمایش‌های مدل زبری پایه پل مربعی

فاصله زبری (mm)	ابعاد زبری (mm)			نوع زبری	عرض پایه (mm)	طول پایه (mm)	عرض کانال (mm)	عمق آب (mm)	دبی (L/s)	شماره
	ارتفاع (Rz)	عرض (Ry)	طول (Rx)							
۵۰	۱۰	۱۵۰	۱۷	۱،۲،۳،۴ شاهد	۱۵۰	۱۵۰	۵۰۰	۱۸۰	۲۴	۱
۵۰	۱۰	۱۵۰	۳۵	۱،۲،۳،۴ شاهد	۱۵۰	۱۵۰	۵۰۰	۲۰۰	۲۸	۲
۵۰	۱۰	۱۵۰	۵۲	۱،۲،۳،۴ شاهد	۱۵۰	۱۵۰	۵۰۰	۲۱۰	۳۲	۳
۷۰	۱۰	۱۵۰	۱۷	۱،۲،۳،۴ شاهد	۱۵۰	۱۵۰	۵۰۰	۱۸۰	۲۴	۴
۷۰	۱۰	۱۵۰	۳۵	۱،۲،۳،۴ شاهد	۱۵۰	۱۵۰	۵۰۰	۲۰۰	۲۸	۵
۷۰	۱۰	۱۵۰	۵۲	۱،۲،۳،۴ شاهد	۱۵۰	۱۵۰	۵۰۰	۲۱۰	۳۲	۶
۷۰	۱۰	۱۵۰	۱۷	۱،۲،۳،۴ شاهد	۱۵۰	۱۵۰	۵۰۰	۱۸۰	۲۴	۷
۹۰	۱۰	۱۵۰	۳۵	۱،۲،۳،۴ شاهد	۱۵۰	۱۵۰	۵۰۰	۲۰۰	۲۸	۸
۹۰	۱۰	۱۵۰	۵۲	۱،۲،۳،۴ شاهد	۱۵۰	۱۵۰	۵۰۰	۲۱۰	۳۲	۹
۵۰	۱۰	۱۵۰	۱۷	۱،۲،۳،۴ شاهد	۱۵۰	۱۵۰	۵۰۰	۱۸۰	۲۴	۱۰
۵۰	۱۰	۱۵۰	۳۵	۱،۲،۳،۴ شاهد	۱۵۰	۱۵۰	۵۰۰	۲۰۰	۲۸	۱۱
۵۰	۱۰	۱۵۰	۵۲	۱،۲،۳،۴ شاهد	۱۵۰	۱۵۰	۵۰۰	۲۱۰	۳۲	۱۲
۷۰	۱۰	۱۵۰	۱۷	۱،۲،۳،۴ شاهد	۱۵۰	۱۵۰	۵۰۰	۱۸۰	۲۴	۱۳
۷۰	۱۰	۱۵۰	۳۵	۱،۲،۳،۴ شاهد	۱۵۰	۱۵۰	۵۰۰	۲۰۰	۲۸	۱۴
۷۰	۱۰	۱۵۰	۵۲	۱،۲،۳،۴ شاهد	۱۵۰	۱۵۰	۵۰۰	۲۱۰	۳۲	۱۵
۷۰	۱۰	۱۵۰	۱۷	۱،۲،۳،۴ شاهد	۱۵۰	۱۵۰	۵۰۰	۱۸۰	۲۴	۱۶
۹۰	۱۰	۱۵۰	۳۵	۱،۲،۳،۴ شاهد	۱۵۰	۱۵۰	۵۰۰	۲۰۰	۲۸	۱۷
۹۰	۱۰	۱۵۰	۵۲	۱،۲،۳،۴ شاهد	۱۵۰	۱۵۰	۵۰۰	۲۱۰	۳۲	۱۸
۵۰	۱۰	۱۵۰	۱۷	۱،۲،۳،۴ شاهد	۱۵۰	۱۵۰	۵۰۰	۱۸۰	۲۴	۱۹
۵۰	۱۰	۱۵۰	۳۵	۱،۲،۳،۴ شاهد	۱۵۰	۱۵۰	۵۰۰	۲۰۰	۲۸	۲۰
۵۰	۱۰	۱۵۰	۵۲	۱،۲،۳،۴ شاهد	۱۵۰	۱۵۰	۵۰۰	۲۱۰	۳۲	۲۱
۷۰	۱۰	۱۵۰	۱۷	۱،۲،۳،۴ شاهد	۱۵۰	۱۵۰	۵۰۰	۱۸۰	۲۴	۲۲
۷۰	۱۰	۱۵۰	۳۵	۱،۲،۳،۴ شاهد	۱۵۰	۱۵۰	۵۰۰	۲۰۰	۲۸	۲۳
۷۰	۱۰	۱۵۰	۵۲	۱،۲،۳،۴ شاهد	۱۵۰	۱۵۰	۵۰۰	۲۱۰	۳۲	۲۴
۷۰	۱۰	۱۵۰	۱۷	۱،۲،۳،۴ شاهد	۱۵۰	۱۵۰	۵۰۰	۱۸۰	۲۴	۲۵
۹۰	۱۰	۱۵۰	۳۵	۱،۲،۳،۴ شاهد	۱۵۰	۱۵۰	۵۰۰	۲۰۰	۲۸	۲۶
۹۰	۱۰	۱۵۰	۵۲	۱،۲،۳،۴ شاهد	۱۵۰	۱۵۰	۵۰۰	۲۱۰	۳۲	۲۷



شکل ۴. دانه بندی خاک استفاده شده



شکل ۵. زمان تعادل آبشستگی آزمایش های مدل زبری

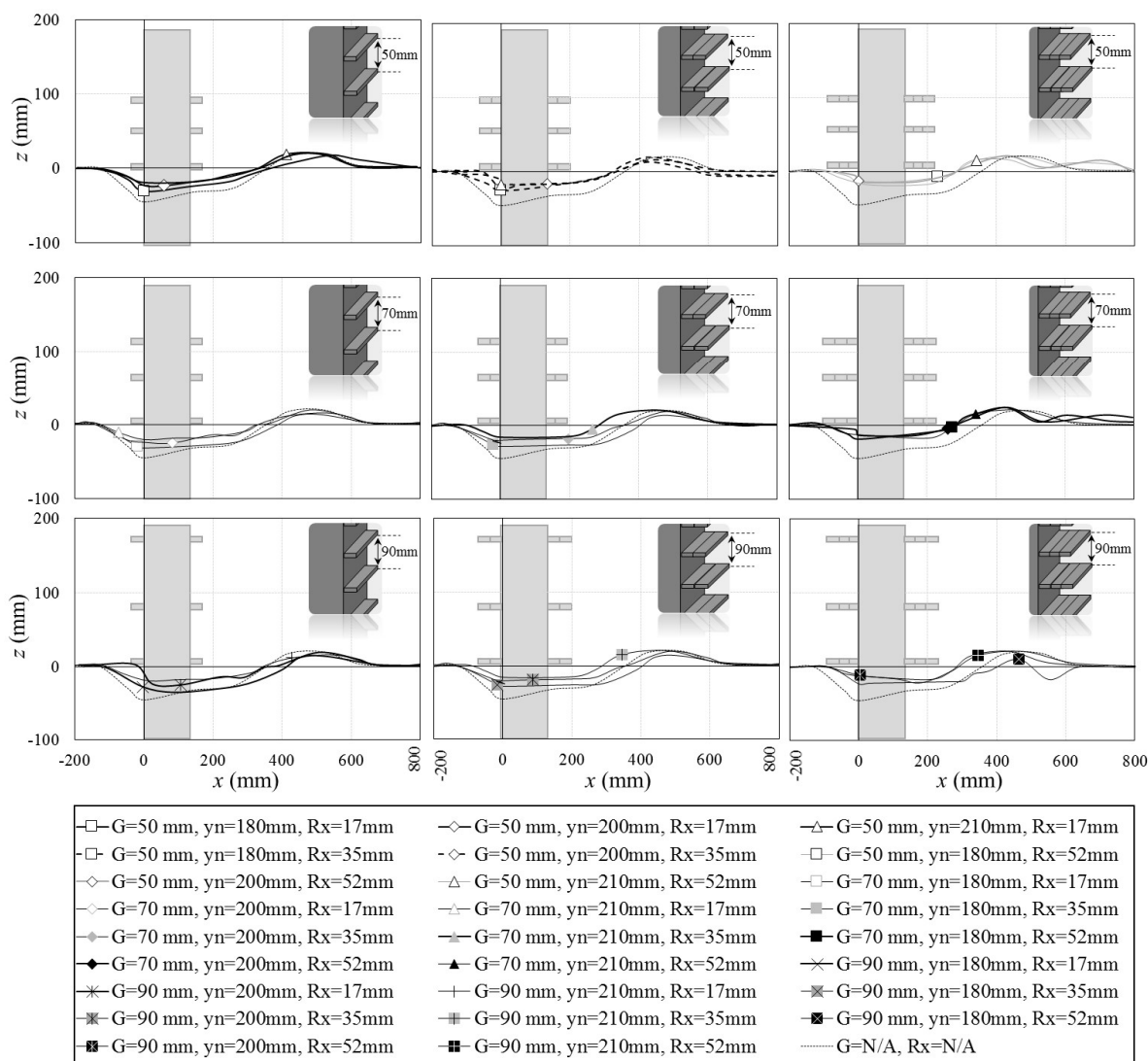
آزمایش های انجام شده در جدول (۱)، نمایش داده می شود. در ادامه به بحث در رابطه با تأثیر فاصله بین زبری ها، اندازه زبری ها و همچنین پیوستگی و عدم پیوستگی زبری های استفاده شده پرداخته می شود.

در شکل (۵)، نتایج زمان تعادل گودال آبشستگی برای مدل های زبری نمایش داده شده است. در این شکل، از نسبت گودال آبشستگی به طول پایه استفاده شده است. در زمان

رسوبات استفاده شده: در شکل (۴)، منحنی دانه بندی رسوبات نمایش داده شده است. همان طور که در شکل مشخص قطر متوسط رسوبات در حدود ۲/۹ میلی متر و ماسه متوسط دسته بندی می شود.

## نتایج و بحث

در این بخش، ابتدا پروفیل آبشستگی در مقطع پیشینه با توجه به



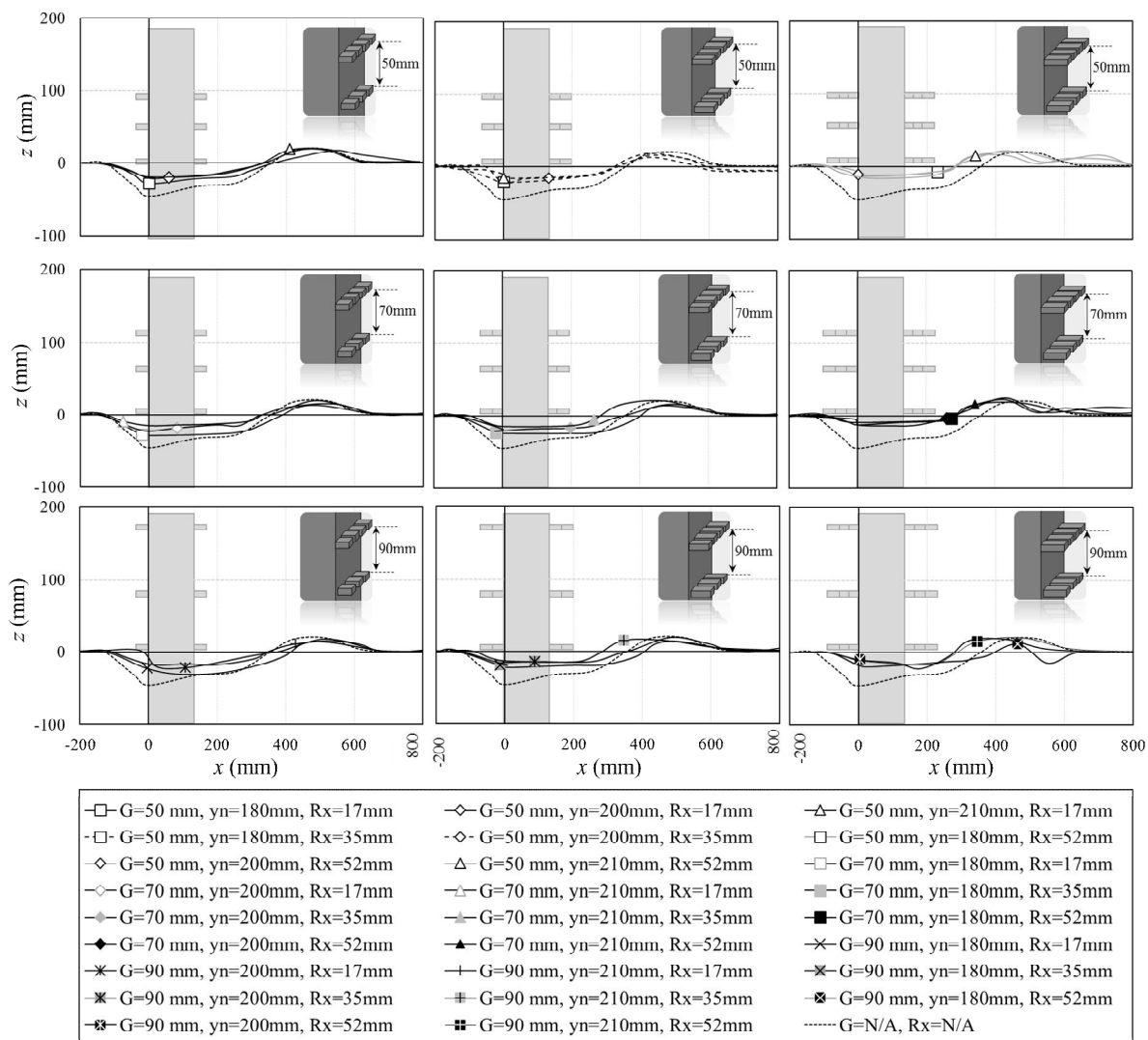
شکل ۶. پروفیل آبهستگی مدل پایه پل مربعی با زبری مستطیلی پیوسته

نتایج نشان داد، با اعمال زبری مستطیلی، میزان آبهستگی به میزان قابل محسوسی نسبت به مدل شاهد کاهش پیدا می‌کند. کاهش مقدار آبهستگی در دامنه بالادست پایه پل، با افزایش طول زبری در بالادست و پایین دست ادامه پیدا می‌کند و همچنین فاصله گرفتن زبری‌های ایجاد شده، تأثیر فراوانی در کاهش میزان آبهستگی دارد. مقایسه‌ها نشان می‌دهد، با افزایش طول زبری‌ها به مراتب تأثیر بیشتری بر کاهش میزان آبهستگی نسبت به افزایش فاصله بین زبری‌ها (افزایش  $G$ ) دارد. این عامل نشان می‌دهد، افزایش طول زبری به مراتب تأثیر بیشتری بر جریان پایین رونده (عامل اصلی آبهستگی پیشانی) بالادست

تقریبی یک ساعت پروفیل آبهستگی به حالت تعادل رسید. در این مقایسه از آزمایش‌های شماره (۱)، با توجه به جدول (۱)، استفاده شد. همچنین نتایج تحقیق احمدی‌نیا و همکاران (۱)، در شکل نمایش داده شده است.

مدل زبری مستطیلی با زبری پیوسته : در شکل (۶)، پروفیل آبهستگی در مدل زبری مستطیلی با زبری پیوسته نمایش داده شده است. همان‌طور که در شکل مشخص شده است، آزمایش‌ها در دو حالت، به‌ازای افزایش طول زبری و همچنین فاصله بین زبری‌ها پیگیری شد. به‌ازای دبی عمق آب ۱۸۰، ۲۰۰ و ۲۱۰ میلی‌متر پروفیل آبهستگی رسوبات ترسیم شد.



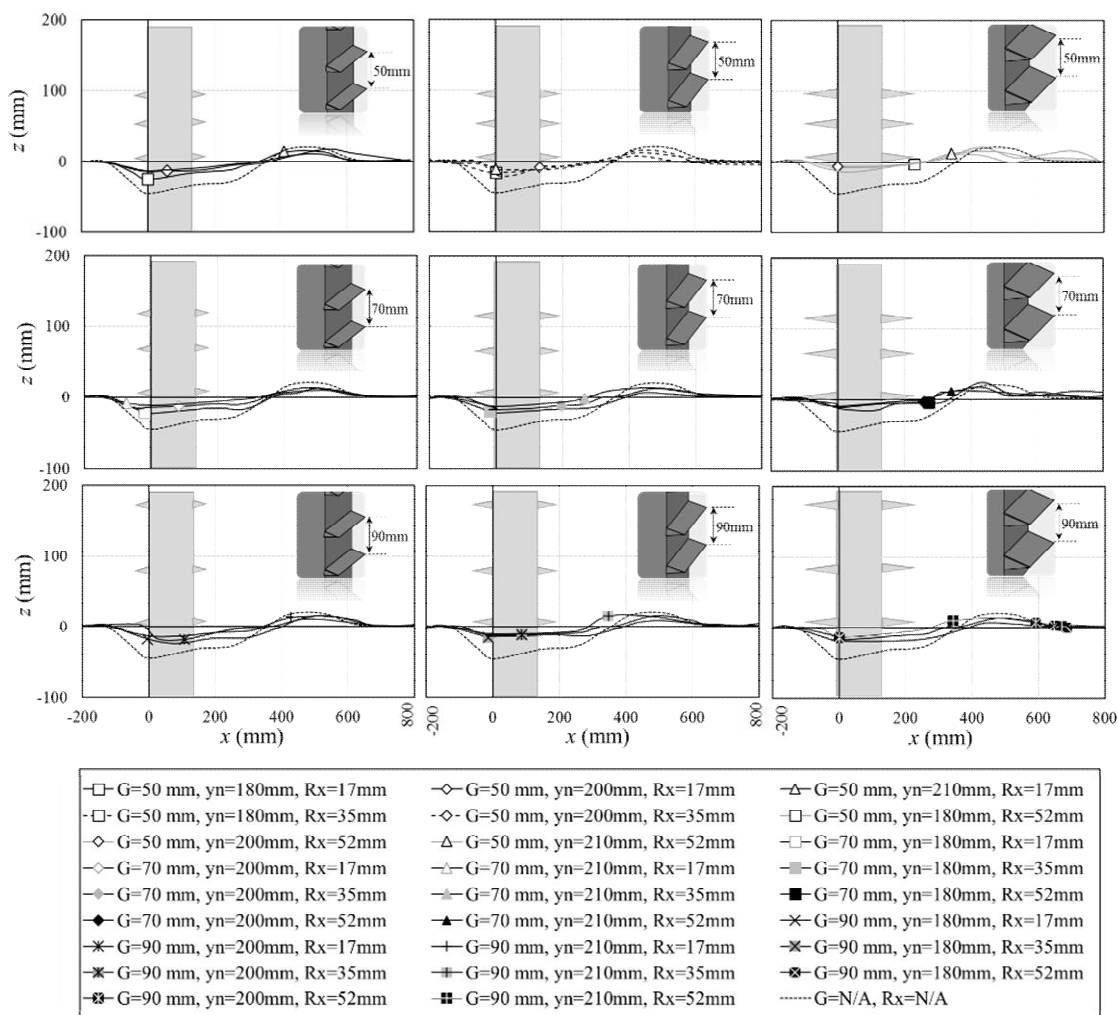


شکل ۷. پروفیل آبشستگی مدل پایه پل مربعی با زبری مستطیلی ناپیوسته

مستطیلی به مراتب تأثیر بیشتری بر کاهش میزان آبشستگی می گذارد. برای درک این مطلب در ادامه از اعداد بی بعد استفاده شده است که در زیر بخش مربوطه بدان اشاره می شود. با مقایسه مدل های زبری مستطیلی (پیوسته) با مدل زبری مستطیلی (ناپیوسته)، می توان بیان کرد، با جدا کردن زبری ها در بالادست و پایین دست، پیش بینی می شود، جت پایین رونده که در قالب جریان پایین رونده در دامنه بالادست تقسیم بندی می شود به جت های کوچک تر تقسیم بندی شود. برخورد جت های پایین رونده در فواصل خالی زبری های نصب شده در وجه بالادست پایه سی پل باعث افزایش اتلاف انرژی می شوند.

می گذارد که به خودی خود باعث کاهش آبشستگی می شود. همچنین افزایش طول زبری در مدل زبری مستطیلی پیوسته تا ۵۸ درصد باعث کاهش آبشستگی می شود. در حالی که این کاهش به ازای افزایش فاصله بین زبری ها به مراتب کمتر بوده و مقدار در حدود ۱۸ درصد تخمین زده می شود.

مدل زبری مستطیلی با زبری ناپیوسته: در ادامه، با هدف تعیین تأثیر پیوسته یا عدم پیوسته بودن زبری بالادست و پایین دست، مدل آزمایشگاهی پایه پل مربعی با زبری ناپیوسته طرح ریزی شد و در نهایت نتایج این سری آزمایش ها در شکل (۷)، نمایش داده شده است. مقایسه های اولیه نشان می دهد، ناپیوسته بودن زبری در زبری



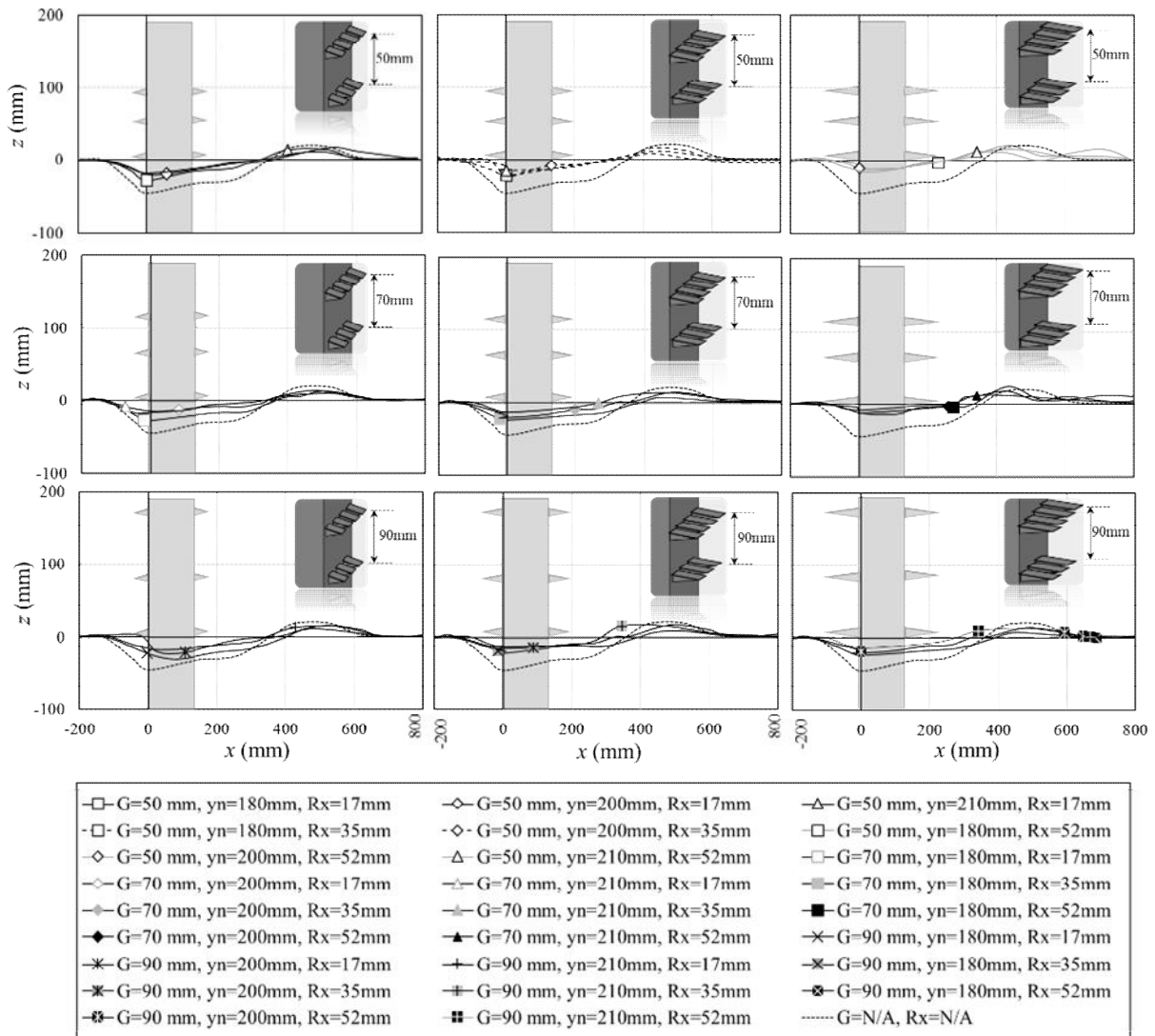
شکل ۸. پروفیل آبستگي مدل پایه پل مربعی با زبری مثلثی پیوسته

نمی‌آید و این تغییرات در پایین دست گودال آبستگي محسوس تر است. بیان می‌شود که با تغییر هندسه زبری به خاطر شکل هندسی زبری مثلثی و نزدیک بودن به خطوط جریان در حالت جدایش جریان در پایین دست، جدایش کمتری در مقایسه با مدل مستطیلی به وجود خواهد آورد. این امر موجب می‌شود، میزان آبستگي در شیب پایین دست مدل زبری مثلثی پیوسته به مراتب کمتر از مدل زبری مستطیلی پیوسته باشد. با مقایسه شکل ۷ و ۸ به صورت نظیر به نظیر می‌توان این مطلب را استنباط کرد.

مدل زبری مثلثی ناپیوسته: نتایج این مدل نشان داد، با جدا کردن زبری مثلثی از حالت پیوسته به ناپیوسته تغییر محسوسی

باشد. در نهایت این استهلاک باعث می‌شود، جریان پایین رونده با انرژی کمتری در دامنه بالادست پایه پل برخورد کند. این امر موجب می‌شود، میزان آبستگي به مقدار محسوسی کاهش پیدا کند.

مدل زبری مثلثی با زبری پیوسته: همچنین برای بررسی، تأثیر هندسه زبری، با تغییر دادن زبری از حالت مستطیل پیوسته به مثلث پیوسته، تأثیر این فاکتور نیز بررسی شد. نتایج این مقایسه در شکل (۸) نمایش داده شده است. مقایسه بین مدل آبستگي زبری مستطیلی پیوسته (شکل ۶) با مدل زبری مثلثی، نشان می‌دهد که با تغییر هندسه زبری در دامنه بالادست و گودال آبستگي شده تغییرات محسوسی به وجود

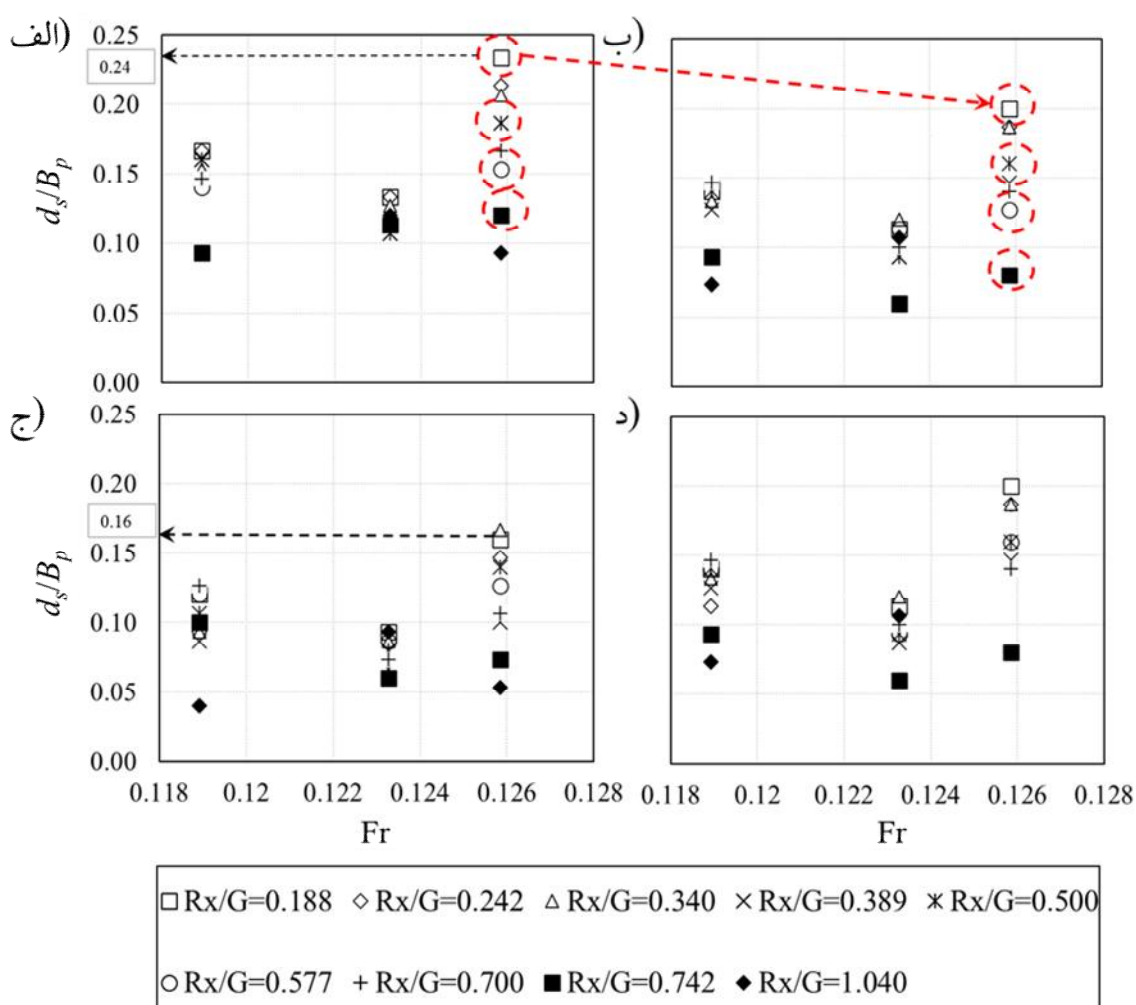


شکل ۹. پروفیل آبشستگی مدل پایه پل مربعی با زبری مثلثی ناپیوسته

مدل‌های زبری مستطیلی پیوسته، مدهای زبری مستطیلی ناپیوسته، مدل‌های زبری مثلثی پیوسته و مدل زبری مثلثی ناپیوسته ترسیم شده است. مقایسه‌ها نشان می‌دهد، به‌ازای افزایش عدد فرود، میزان حداکثر عمق آبشستگی افزایش پیدا می‌کند. همچنین با در نظر گرفتن مدل  $Rx/G$  برابر با  $0/742$  و  $1/040$ ، می‌توان نتیجه گرفت، با افزایش طول زبری، میزان عمق آبشستگی کاهش پیدا می‌کند (این مقادیر به مراتب کمتر از دیگر مدل‌ها است). همچنین با مقایسه شکل ۱۰-الف با شکل ۱۰-ب، با در نظر گرفتن مدل‌های با شرایط هیدرولیکی یکسان، ناپیوستگی زبری باعث کاهش میزان آبشستگی می‌شود، (دایره روی شکل).

در دامنه پایین دست و بالادست گودال آبشستگی رخ نخواهد داد. در این حالت رفتار گودال آبشستگی بیشتر تابع طول و فاصله زبری‌ها از یکدیگر است. این مسئله با مقایسه بین سطر اول شکل (۸) با سطر اول شکل (۹) کاملاً مشهود است، که با ایجاد فاصله در زبری مثلثی تغییر قابل توجهی در مقادیر آبشستگی مشخص نیست.

تأثیر پارامترهای فیزیکی مدل زبری بر آبشستگی: برای تعیین این مفهوم شکل (۱۰) با استفاده از اعداد بی‌بعد نسبت عمق آبشستگی ماکزیمم به میزان عرض پایه پل در برابر عدد فرود ترسیم شد. شکل‌های ۱۰-الف تا ۱۰-د به ترتیب برای



شکل ۱۰. تأثیر پارامترهای فیزیکی بر روند آبشستگی در مدل‌های زبری پایه پل مربعی (الف) مدل زبری پایه پل مستطیلی پیوسته، (ب) مدل زبری پایه پل مستطیلی ناپیوسته، (ج) مدل زبری پایه پل مثلثی پیوسته و (د) مدل زبری پایه پل مثلثی ناپیوسته

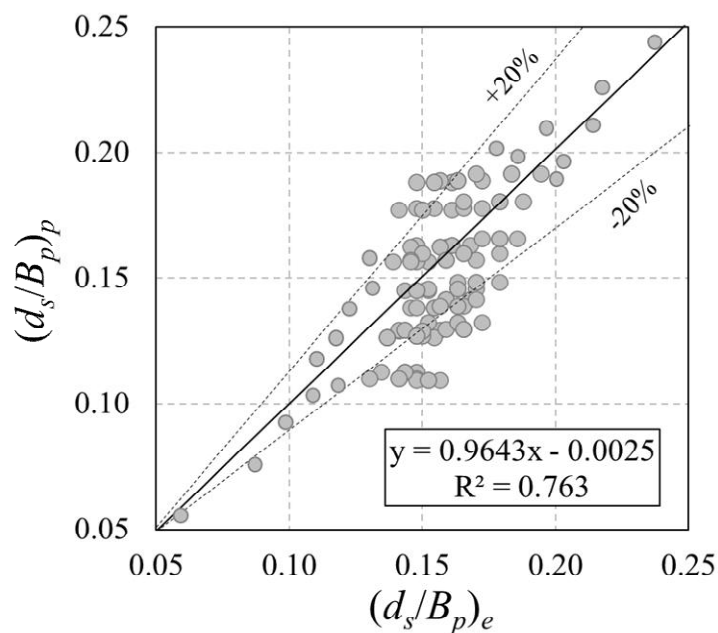
داد، مقادیر تخمینی از رابطه با مقادیر آزمایشگاهی از برآزش مناسبی برخوردار است و ضریب رگرسیون این رابطه در حدود ۰/۸۱ است. در شکل (۱۱)، مقادیر آزمایشگاهی گودال آبشستگی با مقادیر به دست آمده از رابطه (۴)، نمایش داده شده است:

$$\frac{d_s}{B_p} = f\left(Fr, \frac{R_x}{G}, \frac{d_{50}}{y}\right) \quad (3)$$

$$\frac{d_s}{B_p} = \frac{1}{3} \left[ 0.32Fr^{0.11} - 1.52 \left( \frac{R_x}{G} \right)^{0.121} + \left( \frac{d_{50}}{y} \right)^{0.12} + 1.05 \right] \quad (4)$$

این مقایسه در دو حالت دیگر آزمایش‌ها نیز قابل استحصال است. برای بررسی تأثیر شکل هندسی (مثلثی یا مستطیلی)، با مقایسه شکل ۱۰-الف با ۱۰-ج، می‌توان بیان کرد، با تغییر زبری از حالت مستطیلی به حالت مثلثی تغییر میزان آبشستگی ماکزیمم به میزان زیادی کاهش پیدا می‌کند.

ارائه رابطه رگرسیونی: در این تحقیق کلیه داده‌های ماکزیمم عمق آبشستگی و مقادیر متناظر عدد فرود و نسبت طول زبری ( $R_x$ ) به فاصله زبری ( $G$ ) در کلیه آزمایش‌ها استخراج شد. در نهایت، با استفاده از نرم‌افزار Mathematical رابطه‌ای رگرسیونی بر پایه داده‌های آزمایشگاهی ارائه شد. نتایج نشان



شکل ۱۱. میزان دقت رابطه ارائه شده

## نتیجه گیری

در این بخش به نتایج حاصل از این تحقیق به صورت مورد اشاره شده است:

۱- نتایج حاصل از مقایسه مدل آبشستگی مدل زبری مستطیلی پیوسته نشان داد، با افزایش طول زبری، میزان آبشستگی تا مقدار حداکثری ۵۸ درصد کاهش پیدا می کند. نتایج نشان داد، این روند برای دیگر مدل های زبری ارائه شده در این پژوهش صادق است.

۲- افزایش فاصله بین زبری های مدل آبشستگی تأثیر مستقیم بر میزان حداکثر آبشستگی دارد. ماکزیمم مقدار آبشستگی با افزایش فاصله بین زبری ها در مدل های پیوسته و ناپیوسته باعث کاهش میزان آبشستگی می شود. پیش بینی می شود این امر به خاطر تأثیر این فاصله بر جت پایین رونده در پیشانی پایه پل است. که به عنوان پیشنهاد می تواند برای تحقیقات آینده در نظر گرفته شود. برای بررسی این پدیده می توان از آنالیز طبق قدرت جریان های گردابه ای استفاده کرد. لازمه استفاده از این آنالیز دسترسی به داده های سرعت سنجی در سه

جهت است.

۳- مقایسه های بین مدل های پیوسته و ناپیوسته بیانگر این موضوع است، که با ایجاد قطاع، فضای خالی در زبری های پیوسته، تأثیر زبری بر کاهش میزان آبشستگی حداکثر، کاهش پیدا می کند. این امر به موجب برخورد جت های پایین رونده در بین زبری های ناپیوسته به وجود خواهد آمد.

۴- نتایج مقادیر پیش بینی شده توسط رابطه ارائه شده و مقادیر واقعی عمق آبشستگی، نشان می دهد رابطه ارائه شده بر پایه رگرسیون غیرخطی از برازش قابل قبولی برخوردار است.

۵- زبری های ذوزنقه ای و دیگر اشکال هندسی می تواند به عنوان پیشنهاد برای تحقیقات آینده با این طرح آزمایشگاهی به پژوهشگران پیشنهاد شود. از این رو نویسندگان این مقاله کلیه داده های پروفیل آبشستگی در متن جانمایی کرده اند تا شرایط برای پیگیری مطالعات آینده با این رویکرد فراهم شود.

۶- رگرسیون غیرخطی بر اساس اعداد بی بعد، نتایج قابل قبولی برای برآورد میزان عمق آبشستگی را ارائه می دهد. این تکنیک

- می‌تواند برای دیگر مباحث هیدرولیک استفاده شود (۱۹).
- ۷- در بررسی تأثیر پوسته بودن یا ناپیوسته بودن زبری‌های ایجاد شده روی بدنه بالادست و پایین‌دست پایه پل، در این تحقیق می‌توان با استفاده از بررسی داده‌های سرعت‌سنجی و همچنین بررسی آنالیزهایی از جمله آنالیز طیف قدرت و همچنین آنالیز توابع احتمال تأثیر بردارهای سرعت را بر نحوه شسته شدن رسوبات بررسی کرد.
- ۸- تأثیر دیگر اشکال زبری بر میزان آبشستگی، همواره مورد بحث و پژوهش است و پژوهشگران زیادی در این زمینه پژوهش‌هایی را انجام داده‌اند. لذا، بررسی آزمایشگاهی و عددی اثر شکل زبری را می‌توان، برای تحقیقات آینده پیشنهاد کرد.

### منابع مورد استفاده

- Ahmadi, A., M. Heidarpour and H. Shahsavari. 2017. The effect of roughness protrusions in reducing scour around bridge piers and its impact on the vertical velocity profile. *Journal of Water and Soil Conservation*. 10.22069/JWFST.2017.9886.2424.
- Amini, A., B. W. Melville, T. M. Ali and A. H. Ghazali. 2011. Clear-water local scour around pile groups in shallow-water flow. *Journal of Hydraulic Engineering* 138(2): 177-185.
- Ataie-Ashtiani, B. and A. A. Beheshti. 2006. Experimental investigation of clear-water local scour at pile groups. *Journal of Hydraulic Engineering* 132(10): 1100-1104.
- Barkdoll, B. B., B. W. Melville and Y. M. Chiew. 2000. Time scale for local scour at bridge piers. *Journal of Hydraulic Engineering* 126(10): 793-795.
- Bayram, A. and M. Larson. 2000. Analysis of scour around a group of vertical piles in the field. *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering* 126(4): 215-220.
- Beheshti, A. A. and B. Ataie-Ashtiani. 2010. Experimental study of three-dimensional flow field around a complex bridge pier. *Journal of Engineering Mechanics* 136(2): 143-154.
- Beheshti, A. A. and B. Ataie-Ashtiani. 2016. Scour hole influence on turbulent flow field around complex bridge piers. *Flow Turbulence and Combustion* 97: 6.
- Bestawy, A., T. Eltahawy, A. Alsululi, A. Almaliki and M. Alqurashi. 2020. Reduction of local scour around a bridge pier by using different shapes of pier slots and collars. *Water Supply* 20(3): 1006-1015.
- Breisers, H. N. C. and A. J. Raudkivi. 1991. Scouring. 2<sup>nd</sup> Hydraulic Structures Design Manual, IAHR, A. A. Balkema, Rotterdam, The Netherlands.
- Dey, S., B. M. Sumer and J. Fredsøe. 2006. Control of scour at vertical circular piles under waves and current. *Journal of Hydraulic Engineering* 132(3): 270-279.
- Ettema, R., G. Kirkil and M. Muste. 2006. Similitude of large-scale turbulence in experiments on local scour at cylinders. *Journal of Hydraulic Engineering* 132(1): 33-40.
- Farooq, R., A. R. Ghumman, M. A. U. R. Tariq, A. Ahmed and K. Z. Jadoon. 2020. Optimal octagonal hooked collar countermeasure to reduce scour around a single bridge pier. *Periodica Polytechnica Civil Engineering* 64(4): 1026-1037.
- Hannah, C. R. 1978. Scour at pile groups. Research Rep. No. 78-3. Department of Civil Engineering, University of Canterbury, New Zealand.
- Heidarpour, M., H. Afzalimehr and Z. Khodarahmi. 2007. Local scour protection of circular bridge pier groups using slot. *Journal of Agricultural Sciences and Natural Resources* 14(3):174-185. (in Farsi).
- Lança, A. R., C. Fael, R. Maia, J. P. Pêgo and H. Cardoso. 2013a. Clear-water scour at pile groups. *Journal of Hydraulic Engineering* 139(10):1089-1098.
- Melville, B. W. and Y. M. Chiew. 1999. Time scale for local scour at bridge piers. *Journal of Hydraulic Engineering* 125(1): 59-65.
- Memar, S., M. Zounemat-Kermani, A. Beheshti, M. Rahimpour, G. De Cesare and A. J. Schleiss. 2020. Influence of collars on reduction in scour depth at two piers in a tandem configuration. *Acta Geophysica* 68(1): 229-242.
- Nordila, A., M. Thamer, B. W. Melville, A. Faisal and Y. Badronnisa. 2017. Modelling the effect of sediment coarseness on local scour at wide bridge piers. *Pertanika Journal of Social Science and Humanities* 25(1): 191-200.
- Pagliara, S., I. Carnacina and F. Cigni. 2010. Sills and gabions as countermeasures at bridge pier in presence of debris accumulations. *Journal of Hydraulic Research* 48(6): 764-774.
- Saadati Pachekenari, S. S., M. Esmaili Varaki and R. Fazl Ola. 2014. Experimental investigation of effect of sill location on local scour around inclined bridge piers group. *Journal of Water and Soil* 28(2): 406-419. (in Farsi).

21. Salehi, S. and A. H. Azimi. 2019. Discharge characteristics of weir-orifice and weir-gate structures. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering* 145(11): 04019025.
22. Zarrati, A. R., M. Nazariha and M. B. Mashahir. 2006. Reduction of local scour in the vicinity of bridge pier groups using collars and riprap. *Journal of Hydraulic Engineering* 132(2): 154-162.

## Effect of Upstream and Downstream Roughness on Scour Hole of Square Bridge Pile

H. Kazemizadeh<sup>1</sup>, M. Saneie<sup>1,2\*</sup> and H. Haji Kandi<sup>3</sup>

(Received: March 18-2020; Accepted: October 28-2020)

### Abstract

To prevent demolishing bridge piles due to developing the scour hole under the foundation of these piles some solution has been proposed in the literature. One of the important approaches could be installing different geometric of roughness at the downstream and upstream piles sections. This causes the downward flows which are performing the main role in developing scour holes to be marginally decreased. The present study explores the effect of geometric roughness and also, continuity and un-continuity of roughness length on maximum scour holes around bridge pile. Results indicate that due to increasing the length of roughness the developed scour holes were formed by less scour hole depths. Furthermore, continuity of roughness increases the scour hole depths; however, un-continuity causes the height of scour holes to be developed by fewer values. Also, the comparison shows that the length of installed roughness in maximum value is decreasing the scour hole depth constitute 34 percent. Based on the non-linear regression technique an equation has been proposed to predict the maximum scour hole due to different conditions. Comparison between experimental and proposed values shows that the accuracy of the proposed equation has an acceptable error which has been calculated less than 11 percent.

**Keywords:** Scour hole, Square bridge pile, Rectangular roughness, Triangular roughness, Non-linear regression, Analytical solution

---

1. Department of Water Civilis Engineering, NajafAbad Branch, Islamic Azad University, NajafAbad, Iran  
2. Soil Conservation and Watershed Management, Research Institute Tehran University, Tehran, Iran.  
3. Department of Water Civilis Engineering, Central Tehran Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran.  
Corresponding author, Email: saneie\_m@scwmri.ac.ir