



دانشگاه گورگان، دانش کشاورزی و منابع طبیعی گورگان

نشریه پژوهش‌های حفاظت آب و خاک

جلد بیست و ششم، شماره ششم، ۱۳۹۸

۱۹۷-۲۱۳

<http://jwsc.gau.ac.ir>

DOI: 10.22069/jwsc.2019.14092.2926

## بررسی آزمایشگاهی کارایی مواد نانوساختار بر کاهش عمق آب‌شستگی موضعی پایه پل در جریان غیرماندگار

احسان قاسمی<sup>۱</sup>، \* عبدالرضا ظهیری<sup>۲</sup>، امیراحمد دهقانی<sup>۲</sup> و مهدی مفتاح‌هلی<sup>۲</sup>

<sup>۱</sup>دانش آموخته کارشناسی ارشد سازه‌های آبی گروه مهندسی آب، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان،

<sup>۲</sup>دانشیار گروه مهندسی آب، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان

تاریخ دریافت: ۱۳۹۶/۱۰/۰۱؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۷/۱۱/۰۷

### چکیده

**سابقه و هدف:** یکی از مسائل عمده و مهم در مباحث مهندسی رودخانه، طراحی و احداث پل‌ها می‌باشد که علاوه بر مسائل پایداری، تخمین عمق بیشینه آب‌شستگی در مجاورت پایه‌ها نیز دارای اهمیت بسیاری است. وقوع آب‌شستگی موضعی یکی از دلایل عمده عدم پایداری پل‌ها و در نهایت شکست آن‌ها می‌باشد. در حالی‌که بیش‌تر پژوهش‌های انجام شده در زمینه آب‌شستگی پایه‌پل‌ها در شرایط جریان ماندگار انجام شده است، اما در رودخانه‌ها و به‌ویژه در شرایط وقوع سیل، جریان غیرماندگار بوده و ممکن است تغییرات زمانی دبی جریان نسبتاً سریع باشد. نتایج مطالعات نشان داده شده است که در نظر گرفتن جریان غیرماندگار، موجب پیش‌بینی واقعی‌تر و اقتصادی‌تر عمق بیشینه آب‌شستگی در اطراف پایه‌های پل می‌گردد. تاکنون راه‌کارهای زیادی به منظور حفاظت از پایه پل‌ها ارائه شده است. در این پژوهش از یک راه‌حل غیرسازه‌ای و دوستاندار محیط زیست برای کاهش عمق آب‌شستگی پایه پل‌ها در شرایط جریان غیرماندگار استفاده شده است.

**مواد و روش‌ها:** تاکنون از مواد نانوساختار عمدتاً برای اصلاح رفتار مقاومتی بتن و نیز جاده‌های روستایی خاکی استفاده شده است. برای دستیابی به اهداف پژوهش، رسوب بستر اطراف پایه پل با نوعی ماده نانو ساختار به نام نانورس مخلوط شد. آزمایش‌های آب‌شستگی در شرایط جریان ماندگار و غیرماندگار برای یک پایه پل استوانه‌ای به قطر ۳۵ میلی‌متر و در یک کانال با طول ۹/۵ متر، عرض و ارتفاع ۴۰ سانتی‌متر و شیب کف ۰/۰۰۱ انجام شد. این آزمایش‌ها در دو حالت رسوب بستر با و بدون مواد نانورس انجام شد. برای شبیه‌سازی جریان غیرماندگار از هیدروگراف‌های پلکانی مثلثی با زمان اوج ۷/۵ دقیقه و دبی‌های اوج ۸، ۱۲، ۱۶ و ۲۰ لیتر بر ثانیه استفاده گردید.

**یافته‌ها:** توسعه زمانی پدیده آب‌شستگی در محل پایه پل در هر دو حالت با و بدون حضور مواد نانورس مورد بررسی قرار گرفته و با هم مقایسه شد. در همه دبی‌های اوج، روند آب‌شستگی در بازه‌های زمانی اولیه در حالت استفاده از

\* مسئول مکاتبه: zahiri@gau.ac.ir

نانورس مشابه حالت عدم وجود این مواد اما با شیب بیش‌تری مشاهده شد. این روند در بازه‌های زمانی بعدی با شیب کم‌تری ادامه یافت و در نهایت به یک مقدار ثابت رسید.

**نتیجه‌گیری:** نتایج آزمایش‌های جریان غیرماندگار نشان داد که در حالت حضور مواد نانورس در رسوب بستر با افزایش دبی جریان، عمق بیشینه آب‌شستگی در مجاورت پایه‌پل کاهش می‌یابد. بیش‌ترین درصد کاهش عمق آب‌شستگی با اختلاف زیاد در دبی جریان بیشینه (۲۰ لیتر بر ثانیه) و حدود ۶۲/۸۶ مشاهده شد. در این دبی جریان، عمق بیشینه آب‌شستگی از ۴/۷ میلی‌متر به حدود ۱۸ میلی‌متر کاهش یافت. کمینه کاهش عمق آب‌شستگی با حدود ۵۶/۱۵ درصد در کوچک‌ترین دبی جریان (۸ لیتر بر ثانیه) به‌دست آمد.

**واژه‌های کلیدی:** آب‌شستگی موضعی، پایه‌پل، جریان غیرماندگار، مواد نانورس، هیدروگراف

### مقدمه

رودخانه‌ها یکی از مهم‌ترین مؤلفه‌های حوضه‌های آبریز می‌باشند. در حوضه‌های آبریز فرآیندهای متفاوتی اتفاق می‌افتد که بارش- رواناب، فرسایش اراضی و تغییرات ناشی از بارش و سایر اقدامات بشری از جمله این فرآیندها می‌باشند. انتقال رسوب حوضه به رودخانه‌ها از طریق رواناب باعث مشکلات عدیده‌ای برای سیستم رودخانه‌ها و سازه‌های احداث شده بر آن می‌شود. در این شرایط، رسوب‌گذاری در رودخانه و تشکیل جزایر رسوبی، فرسایش کناری رودخانه‌ها و نیز تخریب سازه‌ها امری محتمل است. با وقوع سیلاب و افزایش قابل‌توجه دبی و سرعت جریان، مواد رسوبی از بستر رودخانه و نیز از اطراف سازه‌های رودخانه‌ای مانند پایه‌پل‌ها به حرکت درآمده و باعث خالی شدن فضای اطراف این پایه‌ها می‌شود (۲۴).

در دهه‌های اخیر پژوهشگران زیادی مسأله آب‌شستگی در اطراف پایه پل را در حالت جریان ماندگار از جنبه‌های مختلف مانند عمق تعادل، تغییرات زمانی، آب‌شستگی در شرایط آب زلال و حمل رسوب، آب‌شستگی در شرایط رسوب یکنواخت و غیریکنواخت و ... مورد بررسی قرار داده‌اند. شرایط جریان در رودخانه‌ها در زمان وقوع سیل معمولاً

به‌صورت غیرماندگار است و طبق نتایج پژوهش‌های انجام شده، در این زمان بیش‌ترین احتمال وقوع بیشینه عمق آب‌شستگی و در نتیجه واژگونی پایه‌های پل وجود دارد (۱). این در حالی است که اغلب مطالعات مرتبط با آب‌شستگی پایه‌پل‌ها در شرایط جریان ماندگار انجام شده و تعداد پژوهش‌ها در زمینه اثر جریان غیرماندگار بر عمق آب‌شستگی پایه‌پل‌ها نسبتاً محدود است. مرتضوی (۲۰۱۱) به این نتیجه رسید که در شرایط جریان غیرماندگار و در حالت هیدروگراف ورودی با زمان پایه طولانی، عمق بیشینه آب‌شستگی کم‌تر از شرایط جریان ماندگار است. همچنین نتایج این پژوهش نشان داد که اگرچه روند آب‌شستگی در هیدروگراف‌های با زمان اوج و زمان پایه متفاوت، متغیر است، اما این دو پارامتر تأثیر فراوانی بر عمق بیشینه آب‌شستگی ندارند و دبی اوج پارامتر مؤثرتری می‌باشد (۲۲). در حالت هیدروگراف ورودی با زمان پایه کوتاه، به‌دلیل شدت بیش‌تر اثر غیرماندگاری جریان و به‌تبع آن، افزایش تنش برشی وارده بر بستر رسوبی، عمق بیشینه آب‌شستگی نسبت به حالت ماندگار افزایش خواهد یافت. این مسأله نشان می‌دهد که طراحی بر اساس روابط جریان ماندگار از ضریب اطمینان بیش‌تری برخوردار است.

توسط برقی و همکاران (۲۰۱۲) نیز مورد تأیید قرار گرفت (۳).

تاکنون روش‌های زیادی برای کاهش عمق آب‌شستگی در محل پایه‌های پل ارائه شده است. چپو (۱۹۹۲) برای اولین بار ایده استفاده از شکاف را در دو موقعیت نزدیک بستر و سطح آب در پایه‌های پل را به‌عنوان یکی از راه‌های پیش‌گیری و کاهش عمق آب‌شستگی مطرح نمود (۹). آزمایش‌های این محقق نشان داد که با افزایش طول و عرض شکاف، میزان عمق آب‌شستگی نیز افزایش می‌یابد. همچنین شکاف نزدیک سطح آب به شکل مؤثری عمق جریان را کاهش داده و باعث کاهش عمق آب‌شستگی می‌گردد. حیدرپور (۲۰۰۲) عملکرد شکاف را در کاهش آب‌شستگی موضعی برای پایه‌های مستطیلی و با پیشنهادی گرد مورد بررسی قرار داد و نتیجه گرفت که کارایی شکاف در این نوع پایه‌ها بیش‌تر از پایه استوانه‌ای با قطر معادل عرض پایه مستطیلی با پیشنهادی گرد است (۱۲). نتایج مطالعه کومار و همکاران (۱۹۹۹) نشان داد که شکاف در کاهش عمق آب‌شستگی مؤثر است، به‌ویژه اگر شکاف تا بستر کانال امتداد داشته باشد. همچنین مشخص شد که شکاف عملاً در جریان‌هایی که نسبت به شکاف زاویه انحراف بالایی دارند بی‌تأثیر است (۱۵). کومار (۱۹۹۶) و زراتی و همکاران (۲۰۰۶) اثر طوقه را در کاهش عمق آب‌شستگی موضعی با استفاده از سه مدل طوقه به‌هم پیوسته، مجزا و به‌هم پیوسته همراه با سنگچین را در گروه پایه‌های استوانه‌ای بررسی نمودند (۱۴ و ۲۹). نتایج آزمایش‌ها نشان داد که در گروه پایه دوتایی که در جهت جریان قرار گرفته‌اند، طوقه پیوسته همراه با سنگچین بیش‌ترین تأثیر را داشته و عمق آب‌شستگی پایه‌های جلویی و عقبی را به‌ترتیب حدود ۵۰ تا ۶۰ درصد کاهش می‌دهد. ورمین (۱۹۸۹) تأثیر پوشش سنگچین را بر کنترل و کاهش عمق آب‌شستگی پایه پل‌ها مورد بررسی قرار داد

چانگ و همکاران (۲۰۰۴) آزمایش‌های آب‌شستگی پایه‌پل را در حالت جریان ماندگار و غیرماندگار انجام دادند (۶). آن‌ها با طراحی هیدروگراف‌های پلکانی با زمان پایه ۷ ساعت و دبی و زمان اوج متفاوت، به مطالعه تأثیر این دو پارامتر بر عمق نهایی آب‌شستگی پرداختند. نتایج نشان داد که دبی اوج تأثیر قابل‌ملاحظه‌ای بر تغییرات آب‌شستگی دارد اما تغییر زمان رسیدن به اوج تفاوت محسوسی را در میزان آب‌شستگی موضعی نشان نداد. لای و همکاران (۲۰۰۹) تغییرات زمانی هیدروگراف بر آب‌شستگی موضعی پایه پل را در شرایط آب زلال مورد بررسی قرار دادند (۱۶). آن‌ها با تجزیه و تحلیل مقادیر عمق آب‌شستگی در شاخه بالارونده هیدروگراف، رابطه‌ای را برای تخمین عمق بیشینه آب‌شستگی در شرایط رسوب یکنواخت ارائه کردند. ترگناتی و همکاران (۲۰۱۰) تأثیر زمان تاخیر هیدروگراف بر آب‌شستگی موضعی در شرایط عدم تزریق رسوب از بالادست را مورد بررسی قرار دادند (۲۶). به این منظور هیدروگراف‌های مثلثی شکل با زمان تاخیر تا سه برابر زمان پیک در نظر گرفته شد. نتایج نشان داد که کاهش واقعی عمق آب‌شستگی نسبت به مقدار پیش‌بینی شده به خصوصیات سیل و خصوصیات جریان بستگی دارد. ابراهیمی و محدودلی سامانی (۲۰۱۱) با هدف بررسی روند آب‌شستگی و تأثیر پارامترهای مختلف بر میزان عمق بیشینه آب‌شستگی موضعی پایه پل در شرایط جریان غیرماندگار، آزمایش‌هایی را انجام دادند (۱۱). نتایج انجام این آزمایش‌ها نشان‌دهنده تغییر نامحسوس مقدار بیشینه عمق آب‌شستگی موضعی در اثر تغییر زمان اوج بود. همچنین بررسی‌ها نشان داد که اثر چند هیدروگراف مثلثی با مقادیر دبی اوج یکسان، تقریباً معادل با اثر یک هیدروگراف مثلثی با همان مقدار دبی اوج و زمان پایه‌ای برابر با مجموع زمان‌های پایه آن هیدروگراف‌ها می‌باشد که این نتایج

توجه به محدودیت جدی پژوهش‌ها در این زمینه و نو بودن این موضوع، در این پژوهش آزمایشگاهی سعی شده است با استفاده از اختلاط مصالح بستر کانال با مواد نانوساختار، خواص مصالح بستر به‌ویژه در محل احداث سازه‌های هیدرولیکی مانند پایه‌های پل را بهبود داده و عمق بیشینه آب‌شستگی موضعی در اطراف پایه‌های پل را کاهش دهند. نتایج حاصل از این پژوهش می‌تواند موجب کاهش هزینه‌های اقتصادی احداث پایه‌های پل و نیز خسارات جانی و مالی ناشی از تخریب پل‌ها در رودخانه‌ها گردد. هر چند که مطابق پژوهش‌های انجام شده، عمق بیشینه آب‌شستگی در جریان ماندگار نسبت به جریان غیرماندگار بیش‌تر بوده و طراحی براساس جریان ماندگار از ضریب اطمینان بیش‌تری برخوردار است اما قطعاً این طراحی با هزینه‌های بیش‌تری توأم خواهد بود. بدیهی است بیش‌ترین عمق آب‌شستگی در مجاورت پایه‌های پل در زمان وقوع سیل است که شرایط جریان به‌صورت غیرماندگار است بنابراین اگرچه آزمایش‌های بررسی عمق آب‌شستگی پایه پل‌ها در شرایط جریان غیرماندگار نشان داده است که عمق آب‌شستگی کم‌تری نسبت به شرایط جریان ماندگار دارند اما به‌دلیل نزدیک‌تر بودن به شرایط واقعی رودخانه در زمان سیلاب، باعث صرفه‌جویی در هزینه‌های احداث پل‌ها خواهند شد. با توجه به بررسی‌های صورت گرفته مشخص شد که استفاده از مواد نانوساختار برای کاهش فرسایش و آب‌شستگی در بستر رودخانه‌ها و در مجاورت سازه‌ها تاکنون به‌صورت بسیار محدود مورد بررسی قرار گرفته است. قطعاً انجام پژوهش‌ها در زمینه مواد نانوساختار و کاربرد آن‌ها در سازه‌های مختلف باعث صرفه‌جویی در زمان و هزینه شده و اختلال در فضای اکوسیستمی و تنگ‌شدگی مقطع رودخانه را نیز کاهش می‌دهد.

(۲۷). او در آزمایش‌های خود نشان داد که اگر ضخامت لایه سنگچین کافی باشد نیازی به قرار دادن لایه فیلتر زیرین نخواهد بود. هم‌چنین نتیجه گرفت که عملکرد یک سیستم سنگچین چندلایه‌ای با دانه‌بندی‌های مختلف، با یک لایه منفرد همگن با ضخامت لایه کم‌تر یکسان خواهد بود. لوچلان و ملویل (۲۰۰۱) نیز تأثیر پوشش سنگچین را بررسی نموده و عملکرد لایه سنگچین را قبل از این که عمق حفره آب‌شستگی در آن به ۲۰ درصد حداکثر عمق آب‌شستگی، بدون وجود سنگچین، برسد قابل قبول دانستند (۱۸). ملویل و هادفیلد (۱۹۹۹) تأثیر شمع‌های حفاظتی بررسی کردند. در مطالعاتی که توسط آن‌ها صورت گرفت راندمان ۵۶ درصدی برای آرایش مثلثی شمع‌های حفاظتی گزارش گردید و اشاره شد که شمع‌های حفاظتی در شرایط آب زلال راندمان بالاتری نسبت به شرایط بستر زنده از خود نشان می‌دهند (۱۹). به‌طورکلی برخی از روش‌های سازه‌ای کاهش عمق آب‌شستگی پایه پل‌ها باعث ایجاد مشکلاتی مانند ناپایداری سازه پل، اختلال در شرایط هیدرولیک جریان و رسوب رودخانه و مهم‌تر از آن اختلال در محیط زیست رودخانه خواهند شد. به همین دلیل در این پژوهش سعی شده است راه‌حل بهینه‌ای براساس کمینه‌سازی این مشکلات برای کاهش عمق آب‌شستگی پایه‌پل‌ها ارائه شود. به این منظور، به‌عنوان یک ایده جدید از مواد نانوساختار (نانورس) برای کاهش عمق بیشینه آب‌شستگی استفاده شده است. مواد نانو که در اندازه  $10^{-9}$  متر می‌باشند، کاربرد گسترده‌ای در علوم مختلف مهندسی داشته‌اند. در نتایج پژوهش‌هایی که در زمینه اختلاط مواد نانوساختار با بتن منتشر شده است، به تأثیر این مواد در افزایش مقاومت بتن و کاهش نفوذپذیری آن اشاره شده است (۷). هم‌چنین در مقالات متعددی، پژوهشگران مختلف اثر مواد نانو در بهبود شرایط مقاومتی کانال‌های بتنی را تأیید نموده‌اند (۲ و ۱۳). با

$$\frac{d_s}{D} = f \left[ \frac{y}{D}, \frac{Vt}{D}, \frac{V^2}{gD}, \frac{VD}{v} \right] \quad (3)$$

که عبارت  $\frac{VD}{v}$  عدد فرود پایه  $(Fr_b)$  و عبارت  $\frac{V^2}{gD}$  عدد رینولدز پایه پل  $(Re)$  است.

**تجهیزات و مواد مورد استفاده در آزمایش‌ها:**  
 آزمایش‌های این پژوهش در یک کانال مستطیلی از جنس پلکسی‌گلاس به طول ۹/۵ متر، عرض ۴۰ سانتی‌متر و ارتفاع ۴۰ سانتی‌متر انجام شد. یک دریچه کشویی در انتهای کانال به منظور کنترل ارتفاع آب آن در نظر گرفته شد. در قسمت ورودی این فلوم، مخزن و صفحه مشبکی وجود دارد که آشفتگی جریان آب زلال که وارد مخزن می‌شود به کمک این صفحه کاهش می‌یابد. هم‌چنین در انتهای فلوم نیز جریان به یک مخزن خروجی که به منظور اندازه‌گیری حجمی دبی جریان تعبیه شده است وارد می‌شود. در شکل ۱ مقطع طولی این فلوم و نیز پایه پل استوانه‌ای نمایش داده شده است. همان‌طور که در شکل مشخص است، کف کانال از فاصله ۳ متر از ورودی با استفاده از سکوی فلزی تا ارتفاع ۱۵ سانتی‌متر بالا آورده شده است. در بخش میانی این کانال به طول حدود ۳ متر، کف کانال از رسوبات ماسه پوشش داده شد تا برای آزمایش‌های آب‌شستگی آماده شود. این قسمت محل نصب پایه پل است که با توجه به معیارهای لازم برای آزمایش‌های آب‌شستگی موضعی، قطر این پایه استوانه‌ای ۳۵ میلی‌متر در نظر گرفته شده است. شیب طولی کانال برای تمامی آزمایش‌ها مقدار ثابت ۰/۰۰۱ در نظر گرفته شد. به منظور کاهش تلاطم و نوسانات سطح آب در بالادست سازه و نیز اندازه‌گیری دقیق عمق آب، موقعیت پایه پل باید تا حد امکان دورتر از ورودی جریان به فلوم قرار می‌گرفت. به منظور کاهش گسترش این آشفتگی‌ها و اغتشاشات به سمت پایین دست از یک توری مشبک در ابتدای فلوم استفاده شد. قابل ذکر است که فاصله محل قرارگیری پایه پل

## مواد و روش‌ها

**تحلیل ابعادی:** تحلیل ابعادی پدیده‌های فیزیکی امکان کاربرد و تعمیم نتایج آزمایشگاهی را برای نمونه واقعی یا طبیعی فراهم می‌نماید. از این رو در این پژوهش تعدادی از این پارامترها که تأثیر بیشتری بر آب‌شستگی دارند، انتخاب شده است. این پارامترها شامل هندسه پایه، مشخصات جریان، خواص سیال و خصوصیات رسوب می‌باشند؛ بنابراین عمق بیشینه آب‌شستگی با تابع زیر قابل بیان است:

$$d_s = f(Q, v, V, y, g, \rho, d_{50}, \sigma_g, \rho_s, V_c, D, Al) \quad (1)$$

که در آن،  $d_s$  عمق بیشینه آب‌شستگی بر حسب متر،  $Q$  دبی جریان بر حسب مترمکعب بر ثانیه،  $\rho$  و  $v$  به ترتیب چگالی بر حسب کیلوگرم بر مترمکعب و لزجت سینماتیکی سیال بر حسب مترمربع بر ثانیه،  $V$  سرعت متوسط جریان در بالادست پایه بر حسب متر بر ثانیه،  $y$  عمق جریان بالادست بر حسب متر،  $g$  شتاب گرانشی بر حسب متر بر مجذور ثانیه،  $d_{50}$  و  $\sigma_g$  به ترتیب قطر میانه و انحراف معیار هندسی توزیع اندازه رسوبات بر حسب متر،  $\rho_s$  چگالی رسوبات بر حسب کیلوگرم بر مترمکعب،  $V_c$  سرعت آستانه حرکت رسوبات بستر بر حسب متر بر ثانیه،  $D$  قطر پایه پل بر حسب متر،  $Al$  امتداد زاویه جریان نسبت به پایه پل،  $t$  زمان بر حسب ثانیه و  $f$  نشان‌دهنده تابع است.

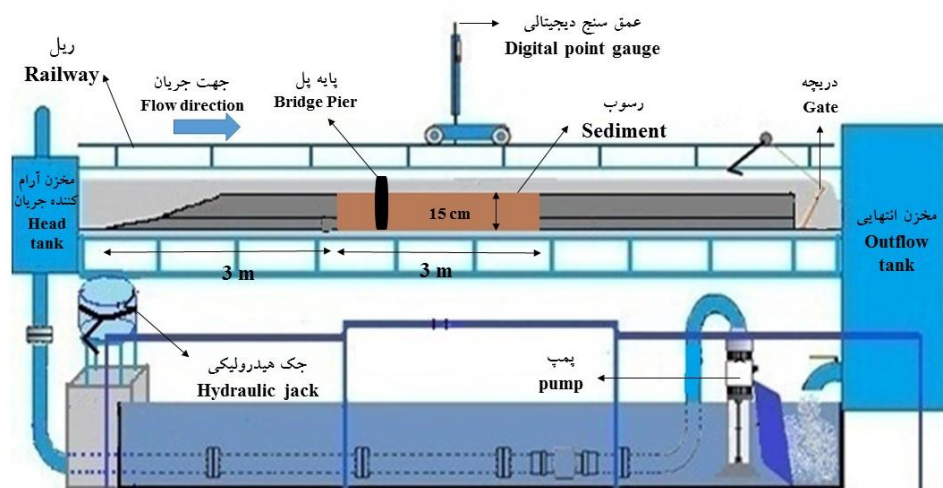
با استفاده از روش باکینگهام و با فرض ثابت بودن چگالی نسبی رسوبات، معادله فوق به صورت زیر خلاصه می‌شود:

$$\frac{d_s}{D} = f \left[ \frac{v}{V_c}, \frac{y}{D}, \frac{V^2}{gD}, \frac{VD}{v}, \frac{D}{d_{50}}, \sigma_g, \frac{Vt}{D}, Al \right] \quad (2)$$

از آنجاکه در این پژوهش پارامترهای  $\frac{D}{d_{50}}$ ،  $\frac{V}{V_c}$  و  $AL$  ثابت در نظر گرفته شده‌اند، معادله فوق به صورت زیر خلاصه می‌گردد:

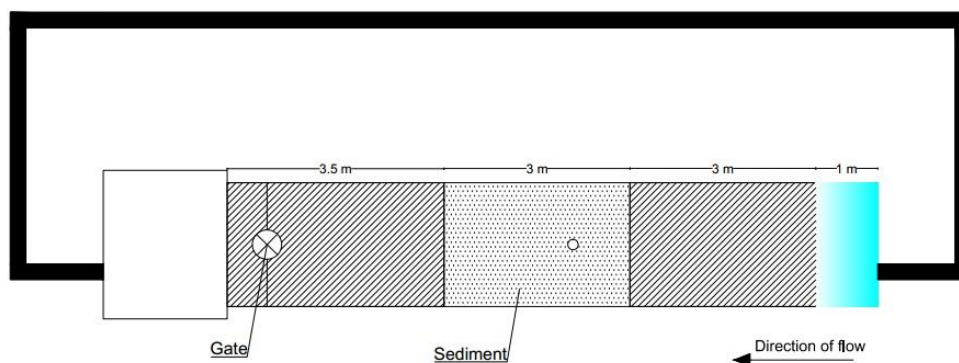
آب‌شستگی از یک ترازسنج دیجیتالی یا عمق‌سنج با دقت ۰/۰۱ میلی‌متر استفاده شد. به این منظور و بعد از به تعادل رسیدن آزمایش‌ها، توپوگرافی حفره آب‌شستگی اطراف پایه‌پل به صورت دقیق به کمک ترازسنج برداشت شد. برای ثبت تغییرات زمانی عمق بیشینه آب‌شستگی (توسعه زمانی آب‌شستگی) به این صورت که نازل اندازه‌گیری در طول زمان عبور هیدروگراف عمق حفره آب‌شستگی در پشت پایه‌پل را که روی ریلی حرکت می‌کرد در زمان‌های مختلف اندازه‌گیری می‌کرد. عمق حفره آب‌شستگی در محل پایه‌پل در فواصل زمانی مشخص تا پایان مدت آزمایش اندازه‌گیری شد. با توجه به تغییرات شدید عمق آب‌شستگی نسبت به زمان در زمان‌های اولیه آزمایش، این برداشتها در فواصل زمانی کوتاه (۲ دقیقه‌ای و ۵ دقیقه‌ای) و سپس با فواصل طولانی مدت تا حدود ۸ ساعت انجام شد. در شکل ۲ پلان فلوم نمایش داده شده است.

از ورودی فلوم باید به‌اندازه‌ای زیاد باشد که جریان به حالت توسعه‌یافتگی رسیده باشد. ملاک توسعه‌یافتگی جریان در این پژوهش، حصول پروفیل قائم لگاریتمی برای سرعت جریان در نظر گرفته شد. برای تنظیم و تثبیت دبی جریان در فرآیند آزمایش‌های این پژوهش، از دستگاهی به نام اینورتر استفاده شد که با تغییر فرکانس پمپ و در نتیجه تغییر دور پمپ، دبی جریان موردنظر قابل تغییر و تثبیت است. این دستگاه قبل از شروع آزمایش‌ها و براساس منحنی فرکانس-دبی جریان کالیبره شد به این صورت که به‌ازای تنظیم یک فرکانس مشخص، دبی جریان معینی وارد کانال شود. منحنی کالیبراسیون این دستگاه با استفاده از رگرسیون خطی بین فرکانس‌ها و دبی جریان اندازه‌گیری شده به‌دست آمده است. در طول آزمایش‌ها نیز به‌صورت مداوم دبی جریان توسط دستگاه دبی‌سنج اندازه‌گیری و کنترل می‌شد. برای برداشت عمق حفره آب‌شستگی ایجاد شده در اطراف پایه‌پل و اندازه‌گیری عمق بیشینه



شکل ۱- مقطع طولی فلوم آزمایشگاهی مورد استفاده در پژوهش حاضر و اجزاء آن.

Figure 1. Side view of the experimental flume used in the present study and its components.



شکل ۲- پلان فلوم آزمایشگاهی مورد استفاده.

Figure 2. Plan view of the experimental flume.

پودری سفیدرنگ است به ترتیب در جدول ۱ و شکل ۳ نشان داده شده است.

در این پژوهش از یک نوع نانورس با عنوان تجاری cloisite-15A استفاده شده است که مشخصات آن و نیز تصویری از این مواد که به صورت

جدول ۱- مشخصات ظاهری ماده نانورس مورد استفاده در این پژوهش.

Table 1. Characteristic properties of the nanoclay material used in this research.

XRD	آب درون بافتی Interstitial water	محدوده خمیری Plastic limit	سطح ویژه Specific surface	آنیون Onion	عنصر substance	املاح آلی Organic salts	نام Name
$d'=31.5\text{\AA}$	<%2	88/2	9400m <sup>2</sup> /g	کلراید Chloride	مونت مورینیت Monte Morionite	MT2EtOH	CLOISITE-15A



شکل ۳- نمونه مواد نانوساختار مورد استفاده در پژوهش حاضر.

Figure 3. Nanostructured materials used in this study.

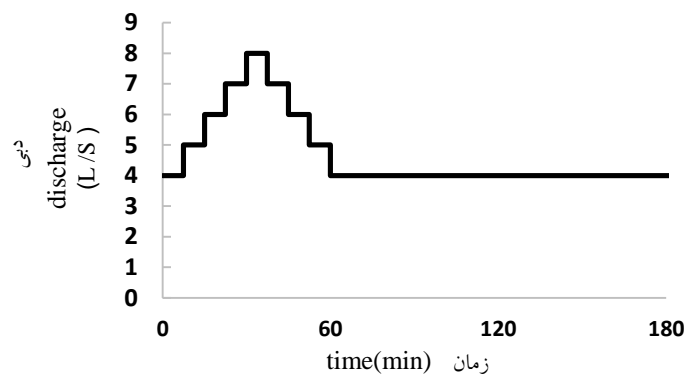
حالت بیشینه قطر پایه باید ۱۰ درصد عرض کانال باشد (۸). طبق پژوهش‌های انجام گرفته توسط بروسرز و همکاران (۱۹۷۷) در صورتی که نسبت قطر پایه به قطر میانه ذرات بستر ( $D/d_{50}$ ) بین ۳۰ تا ۷۰ باشد، آن‌گاه دانه‌بندی رسوب بستر بر بیشینه عمق

مشخصات ذرات رسوبی بستر: بر اساس نظریه رادکیوی و اتما (۱۹۸۳) اگر نسبت عرض کانال به قطر پایه ( $B/D$ ) بزرگ‌تر از ۶/۲۵ باشد، آن‌گاه اثر جداره کانال بر عمق آب‌شستگی پایه پل ناچیز خواهد بود (۲۳). طبق توصیه چیو و ملویل (۱۹۸۷) در این



صرف‌نظر کردن می‌باشد (۲۵). ضریب یکنواختی ذرات نیز برابر  $Cu=(d_{60}/d_{10})=1/87$  به دست آمد و چون کم‌تر از ۲ می‌باشد، مصالح مورد استفاده را می‌توان به‌عنوان ذرات یکنواخت در نظر گرفت (۱۷). آزمایش‌های جریان ماندگار و غیرماندگار: نحوه انجام آزمایش‌های جریان ماندگار به این صورت بود که عمق آب در ابتدای آزمایش و با دبی بسیار کم، با بالا آوردن دریچه انتهایی کانال به اندازه مقدار تعیین شده، تنظیم شد و سپس با تنظیم دبی در مقادیر ۴، ۸، ۱۲، ۱۶ و ۲۰ لیتر بر ثانیه، آزمایش آغاز گردید. همچنین در این پژوهش به منظور شبیه‌سازی جریان غیرماندگار، هیدروگراف‌هایی پلکانی مثلثی طراحی شد و توسط دستگاه تنظیم فرکانس پمپ (اینورتر) به مدل اعمال گردید. این هیدروگراف‌ها دارای دبی پایه ۴ لیتر بر ثانیه و دبی‌های اوج ۸، ۱۲، ۱۶ و ۲۰ لیتر بر ثانیه و زمان اوج ۳۰ دقیقه با گام زمانی ۷/۵ دقیقه انتخاب شد. یک نمونه از هیدروگراف‌های مثلثی طراحی شده با دبی اوج ۸ لیتر بر ثانیه در شکل ۴ نشان داده شده است.

آب‌شستگی بی‌تأثیر خواهد بود (۴). همچنین مطابق پژوهش‌های رادکیوی و اتما (۱۹۸۳) به منظور جلوگیری از تشکیل ریپل در بستر آبرفتی کانال و نیز حذف تأثیر چسبندگی ذرات رسوبی بر فرآیند آب‌شستگی، اندازه قطر میانه ذرات باید بزرگ‌تر از ۰/۷ میلی‌متر باشد (۲۳). علاوه بر این آن‌ها به این نتیجه رسیدند که اگر نسبت قطر پایه به قطر میانه ذرات بستر  $(D/d_{50})$  بزرگ‌تر از ۲۵-۲۰ باشد، علاوه بر جلوگیری از تشکیل ریپل، اثر دانه‌بندی رسوبات بر عمق آب‌شستگی نیز حذف خواهد شد. در این مطالعه با توجه به قطر پایه ۳۵ میلی‌متری و دلایل فوق، ماسه با قطر متوسط ۰/۹ میلی‌متر انتخاب گردید. در این حالت، هم بیشینه عمق آب‌شستگی به دست می‌آید و هم از ایجاد پشته‌های کوچک (ریپل) جلوگیری می‌شود. در صورت تشکیل این پشته‌ها، جریان آشفته شده و فرم بستر به سمت بالادست حرکت می‌کند. با ورود رسوب به درون حفره آب‌شستگی، عمق آب‌شستگی کم شده و شرایط آب‌شستگی آب زلال اتفاق نمی‌افتد. مقدار انحراف معیار ذرات با استفاده از منحنی دانه‌بندی برابر ۱/۴۵ به دست آمد. در چنین حالتی (کم‌تر از ۱/۵) اثر غیریکنواختی دانه‌ها قابل



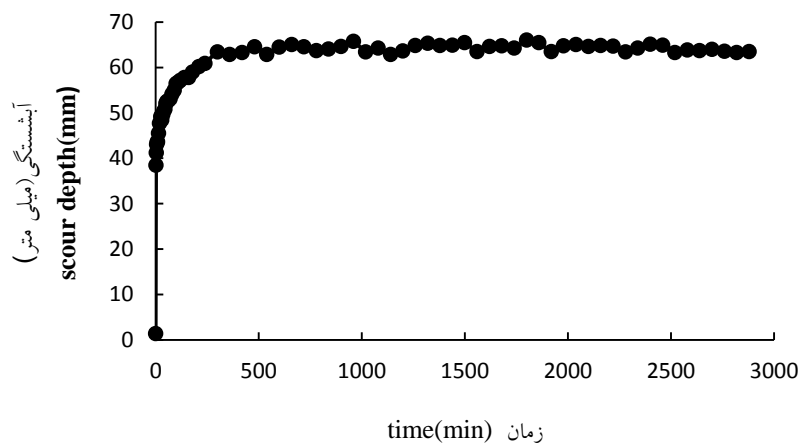
شکل ۴- هیدروگراف پلکانی مثلثی با دبی اوج ۸ لیتر بر ثانیه، زمان اوج ۳۰ دقیقه و گام زمانی ۷/۵ دقیقه.

Figure 4. Triangular stepped hydrograph with peak discharge of 8 liters per second, time to peak of 30 minutes and time interval of 7.5 minutes.



آزمایشگاهی از معیار چپو (۱۹۹۲) و زراتی و همکاران (۲۰۰۴) استفاده گردید. به این منظور و برای تعیین زمان تعادل آزمایش‌ها، یک آزمایش ۴۸ ساعته برای پایه استوانه‌ای در شرایط جریان ماندگار، دبی ۲۰ لیتر بر ثانیه و سرعت نسبی  $V/V_c = 0.94$  انجام شد و در طول این آزمایش، تغییرات عمق آب‌شستگی در محل پایه‌پل اندازه‌گیری شد. با توجه به داده‌های به‌دست آمده و این‌که در بازه ۸ ساعته، تغییر در عمق آب‌شستگی به کم‌تر از ۱ میلی‌متر رسید زمان تعادل ۸ ساعت تعیین گردید و بقیه آزمایش‌ها به مدت ۸ ساعت انجام شد. نمودار مربوط به تعیین زمان تعادل در شکل ۵ ارائه شده است.

تعیین زمان تعادل آزمایش‌ها: چپو (۱۹۹۲) و زراتی و همکاران (۲۰۰۴) زمان تعادل را مدت زمانی تعریف کردند که تغییر در عمق آب‌شستگی در یک بازه زمانی ۸ ساعته، کم‌تر از ۱ میلی‌متر باشد (۹ و ۲۸) از نظر ملویل و چپو (۱۹۹۹) زمان تعادل به قطر پایه بستگی دارد (۲۰). آن‌ها معتقدند که اگر تغییرات عمق آب‌شستگی در طول ۲۴ ساعت، کم‌تر از ۵ درصد قطر پایه باشد، زمان تعادل حاصل شده است. میا و ناگو (۲۰۰۳) زمان تعادل را هنگامی دانستند که در طول یک ساعت از فرآیند آب‌شستگی، تغییر عمق آب‌شستگی به کم‌تر از یک میلی‌متر برسد (۲۱). در این پژوهش به دلیل سادگی و نیز محدودیت‌های



شکل ۵- توسعه زمانی عمق آب‌شستگی اطراف پایه‌پل برای تعیین زمان تعادل.

Figure 5. Temporal evolution of scour depth around bridge pier for determination of equivalent time.

خاک اطراف پایه‌پل با استفاده از قالبی که ابعاد آن  $30 \times 25$  و عمق آن ۱۰ سانتی‌متر بود از بستر کانال برداشت شد و وزن آن اندازه‌گیری گردید. سپس مواد نانورس با غلظت ۱ درصد به همراه آب، با ماسه برداشت‌شده از قالب مخلوط شد. به دلیل این‌که در آزمایش‌های شاهد هیچ‌گونه تراکمی در خاک اطراف پایه‌پل ایجاد نشد، سعی گردید در آزمایش‌های با مواد نانورس هم تراکمی ایجاد نشود. مخلوط ماسه با

نحوه انجام آزمایش‌ها: بعد از قرار دادن پایه‌پل در محل موردنظر، مصالح بستر اطراف پایه کاملاً زهکش‌شده، سپس سطح رسوبات با استفاده از ترازسنج بدون این‌که هیچ‌گونه فشار و تراکمی بر رسوب وارد شود کاملاً افقی و تراز شد. آزمایش‌ها به دو بخش آزمایش‌های شاهد (رسوب بستر بدون مواد نانو) و آزمایش‌های اصلی (رسوب بستر با مواد نانو) تقسیم شدند. برای انجام آزمایش‌های اصلی ابتدا

ماندگار حدود ۲۵ درصد بیش‌تر از جریان غیرماندگار است. این نتایج با نتایج پژوهشگران قبلی مانند بروسرز و رادکیوی (۱۹۹۱) نیز همخوانی دارد (۵). طبق نتایج بنی‌هاشم (۲۰۰۵) در حالت غیرماندگار اگرچه قدرت تخریبی جریان بیش‌تر است (به دلیل تنش برشی ناشی از تغییرات زمانی دبی جریان) اما در شاخه نزولی هیدروگراف، مقداری از چاله آب‌شستگی پر شده و در کل عمق آب‌شستگی کم‌تر می‌شود (۱). هم‌چنین چپو و لیم (۲۰۰۰) نیز به این نتیجه رسیدند که هم‌زمان با شسته شدن اطراف پایه‌پل در زمان سیلاب، رسوبات فرسایش یافته از بالادست در جهت جایگزینی رسوبات فرسایش یافته عمل نموده و تا حدودی از میزان عمق آب‌شستگی کاسته می‌شود (۱۰). بررسی نتایج این جدول نشان می‌دهد که حداکثر عمق آب‌شستگی در دبی حداکثر جریان اتفاق افتاده است به طوری که در جریان ماندگار حدود  $64/5$  میلی‌متر و در جریان غیرماندگار حدود  $47/4$  میلی‌متر است.

نتایج عمق بیشینه آب‌شستگی در حالت استفاده از مواد نانورس (آزمایش‌های اصلی) در جدول ۳ ارائه شده است. در این حالت نیز با افزایش دبی جریان در هر دو شرایط جریان ماندگار و غیرماندگار، عمق بیشینه آب‌شستگی افزایش می‌یابد، اما نرخ این افزایش در جریان ماندگار تا حدودی بیش‌تر از جریان غیرماندگار است. با مقایسه مقادیر عمق بیشینه آب‌شستگی در هر دو حالت جریان ماندگار و غیرماندگار در آزمایش‌های شاهد و اصلی مشخص می‌شود که اثر کاربرد مواد نانورس در کاهش عمق آب‌شستگی بسیار مؤثر بوده است. حداکثر عمق آب‌شستگی با حضور مواد نانورس نیز در دبی حداکثر جریان اتفاق افتاده است به طوری که در جریان ماندگار حدود  $36$  میلی‌متر و در جریان غیرماندگار حدود  $17$  میلی‌متر است. این مقادیر نسبت به حالت

نانورس پس از این که در قالب ریخته شد به گونه‌ای مسطح گردید و هم‌چنین در عمق ۵ سانتی‌متری از سطح به‌ازای هر سانتی‌متر افزایش تراز مقدار ۵ گرم از نانورس به‌صورت لایه‌ای بر روی سطح قالب ریخته شد. در انتها به‌منظور جلوگیری از حرکت رسوبات و هم‌چنین زهکش شدن رسوبات اطراف پایه‌پل و نیز متراکم شدن لایه‌های نانورس در بخش‌های زیرین، فلوم به‌آرامی به‌اندازه ۱۰ سانتی‌متر از آب پر شد. سپس بعد از گذشت حدود ۳۰ دقیقه که رسوبات به حالت اشباع درآمدند، مقادیر دبی و عمق جریان به مقادیر موردنظر خودتنظیم شده و هم‌زمان آزمایش آغاز شد. برای انجام آزمایش‌های غیرماندگار، ابتدا دبی جریان پایه معادل ۴ لیتر بر ثانیه در کانال برقرار شد. سپس با گام‌های زمانی  $7/5$  دقیقه‌ای، دبی به‌ترتیب به ۸، ۱۲، ۱۶ و ۲۰ لیتر بر ثانیه افزایش داده شد. هنگامی که هیدروگراف دبی به زمان اوج خود رسید با همان گام‌های زمانی  $7/5$  دقیقه‌ای، دبی اوج از ۲۰ لیتر بر ثانیه به‌ترتیب به ۱۶، ۱۲، ۸ و ۴ لیتر بر ثانیه کاهش یافت تا به دبی پایه جریان برگردد. از این زمان تا پایان زمان تعادل آزمایش‌ها، جریان به همین صورت ادامه پیدا کرد.

### نتایج و بحث

**مقدار بیشینه عمق آب‌شستگی در جریان‌های ماندگار و غیرماندگار:** مقدار عمق آب‌شستگی در جریان‌های ماندگار و غیرماندگار در حالت بدون استفاده از مواد نانورس (آزمایش‌های شاهد) در جدول ۲ آمده است. همان‌طور که مشخص است با افزایش دبی جریان در هر دو شرایط جریان ماندگار و غیرماندگار، عمق بیشینه آب‌شستگی نیز افزایش می‌یابد. نرخ افزایش عمق آب‌شستگی به‌ازای افزایش دبی جریان در این دو شرایط تقریباً یکسان است. این در حالی است عمق بیشینه آب‌شستگی در جریان

به‌طورکلی درصد کاهش عمق آب‌شستگی در جریان غیرماندگار بیش‌تر از جریان ماندگار است. در حالت جریان ماندگار، درصد کاهش عمق آب‌شستگی در محدوده ۴۱ تا ۵۲ و در حالت جریان غیرماندگار در محدوده ۵۶ تا ۶۲ متغیر است.

بدون مواد نانورس به‌ترتیب حدود ۴۴/۲۳ و ۶۲/۸۶ درصد کاهش نشان می‌دهد.

در جدول ۴، درصد کاهش عمق بیشینه آب‌شستگی ناشی از کاربرد مواد نانورس در اطراف پایه‌پل ارائه شده است. همان‌طور که مشخص است

جدول ۲- عمق بیشینه آب‌شستگی در جریان‌های ماندگار و غیرماندگار در آزمایش‌های شاهد.

**Table 2. Maximum scour depth in base tests under steady and unsteady flow conditions.**

بیشینه عمق آب‌شستگی (mm) Maximum scour depth		عدد فرود جریان Froude number	عمق جریان Flow depth (cm)	سرعت نسبی Relative velocity	دبی جریان Flow discharge (l/s)
جریان غیرماندگار Unsteady flow	جریان ماندگار Steady flow				
-	37.60	0.27	4.5	0.93	4
32.5	44.03	0.28	8	0.92	8
37.4	49.50	0.29	10.3	0.92	12
43	58.03	0.31	12.1	0.93	16
47.4	64.50	0.33	13.2	0.94	20

جدول ۳- عمق بیشینه آب‌شستگی در جریان‌های ماندگار و غیرماندگار در آزمایش‌های اصلی.

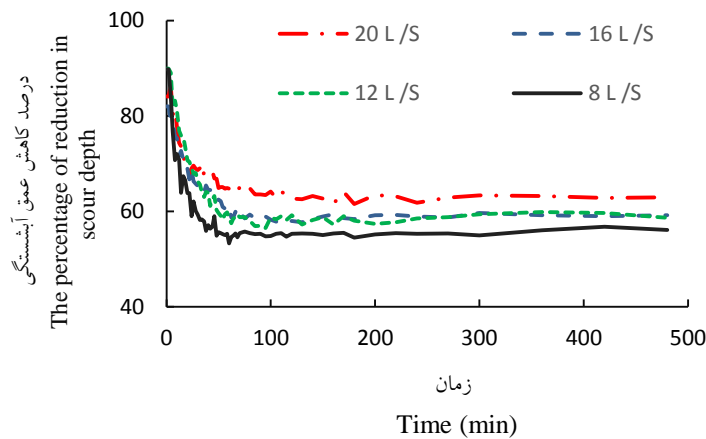
**Table 3. Maximum scour depth in main tests under steady and unsteady flow conditions.**

بیشینه عمق آب‌شستگی (mm) Maximum scour depth		عدد فرود جریان Froude number	عمق جریان Flow depth (cm)	سرعت نسبی Relative velocity	دبی جریان Flow discharge (l/s)
جریان غیرماندگار Unsteady flow	جریان ماندگار Steady flow				
0	21.98	0.27	4.5	0.93	4
14	25.3	0.28	8	0.92	8
15.5	26.08	0.29	10.3	0.92	12
16.03	27.76	0.31	12.1	0.93	16
17.06	36.01	0.33	13.2	0.94	20

جدول ۴- درصد کاهش عمق بیشینه آب‌شستگی در حضور مواد نانورس نسبت به حالت شاهد.

**Table 4. Percentage reduction of maximum scour depth in the presence of nanoclay materials compared to the base results.**

درصد کاهش بیشینه عمق آب‌شستگی Percentage reduction of maximum scour depth		عدد فرود جریان Froude number	عمق جریان Flow depth (cm)	سرعت نسبی Relative velocity	دبی جریان Flow discharge (l/s)
جریان غیرماندگار Unsteady flow	جریان ماندگار Steady flow				
-	41.54	0.27	4.5	0.93	4
56.15	41.56	0.28	8	0.92	8
57.75	47.30	0.29	10.3	0.92	12
59.53	52.16	0.31	12.1	0.93	16
62.86	44.23	0.33	13.2	0.94	20



شکل ۶- نمودار تغییرات زمانی درصد کاهش عمق آب‌شستگی ناشی از کاربرد مواد نانورس در جریان غیرماندگار.

Figure 6. Chart Time Chart The percentage of reduction in scour depth caused by the application of nanoclay materials for unsteady flows.

در این پژوهش در شکل ۶ نشان داده شده است. این نمودار به وضوح نشان می‌دهد که بیشترین درصد کاهش آب‌شستگی با اختلاف زیاد نسبت به دبی‌های دیگر، در دبی بیشینه جریان (۲۰ لیتر بر ثانیه) اتفاق افتاده است. بیشترین کاهش در این دبی جریان، حدود ۸۸ درصد در ابتدای آزمایش و کم‌ترین مقدار آن حدود ۶۳ درصد در انتهای آزمایش (شرایط تعادلی آزمایش) بوده است. کم‌ترین تأثیر کاربرد مواد نانوساختار در کمینه دبی جریان (۸ لیتر بر ثانیه) اتفاق افتاده که حدود ۵۶ درصد بوده است. حضور مواد نانورس، در کنترل آب‌شستگی موضعی در دقایق ابتدایی مؤثرتر است و به مرور زمان با نزدیک شدن به زمان تعادل این اثر کاهش می‌یابد.

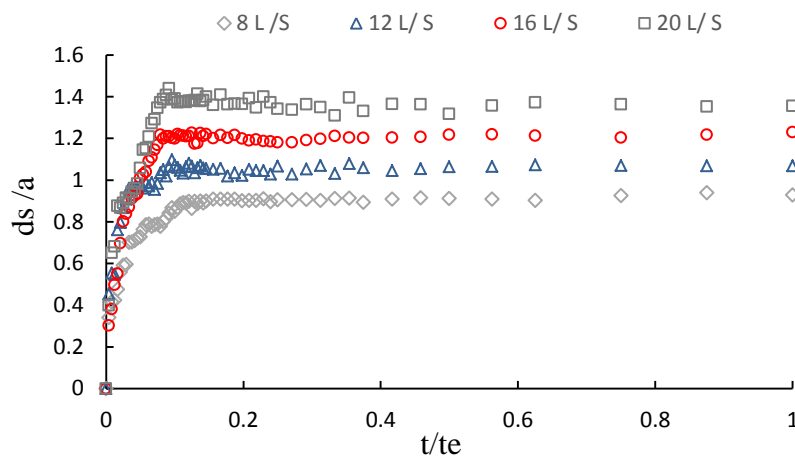
توسعه زمانی عمق آب‌شستگی: در شکل ۷ تغییرات زمانی عمق نسبی آب‌شستگی در پایه استوانه‌ای در ۴ دبی جریان مختلف در آزمایش‌های شاهد نشان داده شده است. در این نمودار، محور قائم نسبت بی‌بعد عمق بیشینه آب‌شستگی به قطر پایه و محور افقی نسبت بی‌بعد زمان موردنظر به زمان کل آزمایش ( $f_e$ ) را نشان می‌دهد. همان‌گونه که مشاهده می‌شود در تمامی دبی‌های جریان، نرخ تغییر عمق آب‌شستگی با

با توجه به نتایج جدول ۴ مشخص می‌شود که در جریان غیرماندگار، درصد کاهش عمق آب‌شستگی در حالت استفاده از مواد نانو بیش‌تر از حالت جریان ماندگار است. برای این مسأله دو دلیل می‌تواند قابل بیان باشد. اولاً با توجه به نتایج آزمایشگاهی این پژوهش مشخص می‌شود که در حالت استفاده از مواد نانو و برای یک دبی جریان یکسان، تقریباً در تمامی آزمایش‌های جریان ماندگار و غیرماندگار، مقدار کاهش عمق آب‌شستگی یکسان است؛ اما با توجه به این‌که عمق آب‌شستگی در جریان غیرماندگار کم‌تر است، درصد کاهش عمق آب‌شستگی در جریان غیرماندگار بیش‌تر شده است. ثانیاً با توجه به این‌که در جریان غیرماندگار، تنش برشی ناشی از تغییرات زمانی متغیرهای هیدرولیکی در ایجاد عمق آب‌شستگی دخالت دارد و این تنش برشی توسط مواد نانو ساختار تا حدودی شکسته می‌شود، به همین دلیل درصد کاهش عمق آب‌شستگی در جریان غیرماندگار افزایش یافته است.

برای تحلیل بهتر نتایج جدول ۴، تغییرات زمانی درصد کاهش عمق آب‌شستگی ناشی از کاربرد مواد نانوساختار برای تمامی دبی‌های جریان موردبررسی

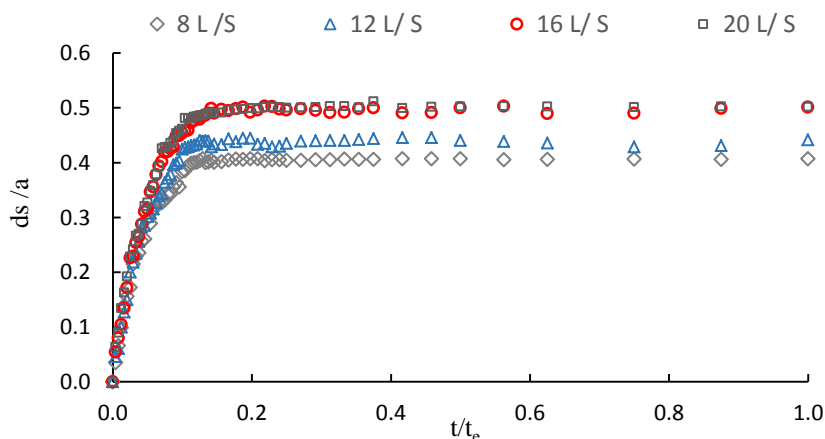
است که استفاده از مواد نانورس باعث کنترل مؤثر عمق بیشینه آب‌شستگی شده است به طوری که با وجود افزایش شدید دبی جریان (از ۸ به ۲۰ لیتر بر ثانیه) و در نتیجه افزایش تنش برشی، عمق نسبی آب‌شستگی تقریباً ثابت مانده است. این مسأله اثر این مواد را در تقویت مؤثر ساختار مقاومت لایه‌های خاک اطراف پایه‌پل نشان می‌دهد.

افزایش زمان کاهش یافته تا به کم‌ترین میزان در زمان تعادل می‌رسد. همچنین با افزایش دبی جریان، بیشینه عمق آب‌شستگی افزایش یافته است. همین نتایج برای آزمایش‌های اصلی در شکل ۸ نشان داده شده است. روند تغییرات آب‌شستگی در این حالت نیز تقریباً مشابه حالت بدون استفاده از مواد نانوساختار بوده و با افزایش دبی جریان، بیشینه عمق آب‌شستگی نیز افزایش یافته است. نکته جالب توجه در این نتایج این



شکل ۷- توسعه زمانی عمق آب‌شستگی اطراف پایه‌پل در آزمایش‌های شاهد در جریان غیرماندگار.

Figure 7. Time evolution of scour depth around the bridge pier for the base tests in unsteady flow condition.

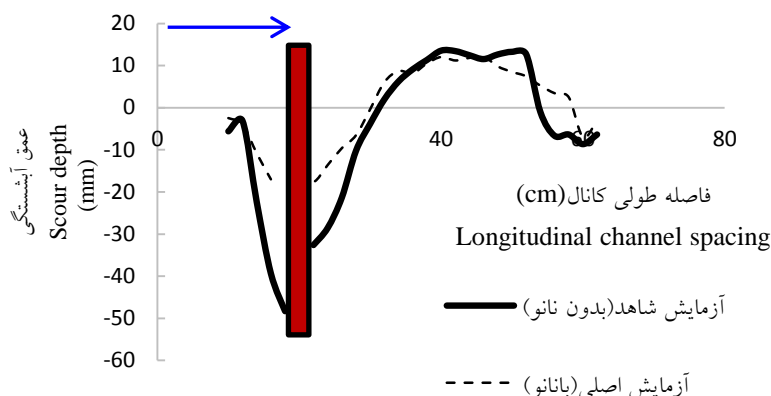


شکل ۸- توسعه زمانی عمق آب‌شستگی اطراف پایه‌پل در آزمایش‌های اصلی در جریان غیرماندگار.

Figure 8. Time evolution of scour depth around the bridge pier for the main tests in unsteady flow conditions.

جریان با کاربرد مواد نانوساختار، عمق آب‌شستگی از حدود ۴۷ میلی‌متر به حدود ۱۸ میلی‌متر کاهش یافته است.

در شکل ۹ وضعیت پروفیل عمق آب‌شستگی بستر کانال در دو حالت آزمایش شاهد و اصلی برای دبی بیشینه جریان (دبی ۲۰ لیتر بر ثانیه) ارائه شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود در این دبی



شکل ۹- مقایسه پروفیل طولی آب‌شستگی در آزمایش‌های شاهد و اصلی در دبی جریان ۲۰ لیتر بر ثانیه.

Figure 9. Comparison of scour hole profiles for the base and main tests in flow rate of 20 l/s.

اطراف پایه‌پل را از آب‌شستگی محافظت نموده است. نیز مشاهده می‌شود.

در شکل ۱۰ نمایی از وضعیت حفره آب‌شستگی در شرایط تعادلی آزمایش‌های این پژوهش را نشان می‌دهد. در این شکل، لایه سفیدرنگ مواد نانورس که



شکل ۱۰- نمایی از وضعیت حفره آب‌شستگی که با مواد نانورس محافظت شده است.

Figure 10. A view of the scour hole protected by nano-clay.

(۱) نتایج نشان داد که پله‌های شاخه صعودی هیدروگراف دبی جریان نقش مؤثرتری در توسعه حفره آب‌شستگی نسبت به پله‌های شاخه نزولی یا پایین‌رونده هیدروگراف دارند. به همین دلیل است که در شاخه نزولی احتمال توقف توسعه حفره آب‌شستگی وجود داشته و احتمالاً این وضعیت حتی

### نتیجه‌گیری کلی

در این پژوهش آزمایشگاهی اثر مواد نانوساختار در کاهش عمق بیشینه آب‌شستگی در محل پایه‌پل استوانه‌ای در شرایط جریان غیرماندگار و در حالت آب‌شستگی آب زلال مورد بررسی قرار گرفته است. مهم‌ترین یافته‌های این پژوهش عبارت‌اند از:

بیشینه آبشستگی از حدود ۴۸ میلی متر به حدود ۱۷ میلی متر کاهش یافته است که بیانگر حدود ۶۳ درصد کاهش است. همچنین در این دبی جریان، محدوده آبشستگی از حدود ۲۰ سانتی متر در پایین دست پایه پل به حدود ۱۰ سانتی متر کاهش یافته است. (۴) نتایج این پژوهش می تواند بیانگر موفقیت قابل ملاحظه مواد نانو ساختار در کنترل روند آبشستگی به ویژه در دبی های سیلابی باشد که بحرانی ترین شرایط برای آبشستگی شدید بستر آبراهه در محل پایه پل بوده و احتمال تخریب این سازه بسیار بیش تر است. همچنین با توجه به این که مواد نانورس از جنس خاک می باشد، بنابراین این مواد از نظر زیست محیطی قابلیت سازگاری مناسبی با سیستم رودخانه و اکولوژی آن داشته و کاربرد آن قابل توصیه می باشد. همچنین انتظار می رود با افزایش غلظت مواد نانورس در بستر آبراهه، کارایی بهتری از این مواد در کاهش عمق بیشینه آبشستگی در محل سازه های هیدرولیکی مشاهده شود.

ممکن است باعث کاهش عمق بیشینه آبشستگی (عمق نهایی آبشستگی) نسبت به جریان ماندگار شود. این مسأله توسط پژوهشگران مختلفی نیز گزارش شده است.

(۲) نتایج آزمایشگاهی کاربرد مواد نانورس با غلظت ۱ درصد و در چهار دبی جریان متفاوت نشان داد که در هر دو شرایط جریان ماندگار و غیرماندگار، با افزایش دبی جریان اثر مواد نانورس در کاهش عمق بیشینه آبشستگی افزایش می یابد. تأثیر این مواد در کاهش عمق آبشستگی از نظر مقدار برای هر دو حالت جریان ماندگار و غیرماندگار تقریباً یکسان است اما از نظر درصد کاهش، به دلیل عمق کم تر آبشستگی در جریان غیرماندگار، درصد کاهش در این حالت بیش تر از جریان ماندگار است.

(۳) در شرایط جریان غیرماندگار و در دبی بیشینه جریان (دبی ۲۰ لیتر بر ثانیه)، بیش ترین درصد کاهش عمق آبشستگی نسبت به عدم استفاده از مواد نانورس اتفاق افتاده است. در این دبی جریان، عمق

#### منابع

1. Banyhashem, A. 2005. Scorching under the influence of non-uniform flow. Master's Degree, Sharif University of Technology, Faculty of Civil Engineering. 114p. (In Persian)
2. Behnia, S., and Shawahi, A. 2010. Introduction to nanoclay and their application in civil engineering. National Conference on New Civil Engineering Findings. Najafabad. 7p. [https://www.civilica.com/Paper-NCEC01-NCEC01\\_088.html](https://www.civilica.com/Paper-NCEC01-NCEC01_088.html). (In Persian)
3. Borghei, S.M., Kabiri-Samani, A.R., and Banihashem, S.A. 2012. Influence of unsteady flow hydrograph shape on local scouring around bridge pier. Water Management, 165: 9. 473-480.
4. Breusers, N.H.C., Nicolet, G., and Shen, H.W. 1977. Local scour around cylindrical piers. J. Hydraul. Res. IAHR. 15: 3. 211-252.
5. Breusers, N.H.C., and Raudkivi, A.J. 1991. Scouring. 2<sup>nd</sup> Hydraulic Structures Design Manual, IAHR, A.A. Balkema, Rotterdam, The Netherlands. 143p.
6. Chang, W.Y., Lai, J.S., and Yen, C.L. 2004. Evolution of scour depth at circular bridge piers. J. Hydraul. Eng. ASCE. 130: 9. 905-913.
7. Chong K.P., and Garboczi, E.J. 2002. Smart and Designer Structural Material Systems. Progress in Structural Engineering and Materials. 4: 417-430.
8. Chiew, Y.M., and Mellville, B.W. 1987. Local scour around bridge piers. J. Hydraul. Res. IAHR. 25: 1. 15-26.
9. Chiew, Y.M. 1992. Scour protection at bridge piers. J. Hydraul. Eng. ASCE. 118: 11. 1260-1269.
10. Chiew, Y.M., and Lim, F.H. 2000. Failure behavior of riprap layer at bridge piers under live-bed conditions, J. Hydr. Engin. 126: 1. 43-55.



11. Ebrahimi, S., and Mohammad Vali Samani, A. 2011. Effect of non-uniform flow on the scour depth around the base plates in the presence of the elongated layer. The 10th Hydraulic Conference of Iran. Hydraulic Company of Iran, Gilan University. 9p. [https://www.civilica.com/Paper-IHC10-IHC10\\_175.html](https://www.civilica.com/Paper-IHC10-IHC10_175.html). (In Persian)
12. Heidarpour, M. 2002. Control and reduction of local scour at bridge piers by using slot, Proc. International Conf. on Fluvial Hydraulics, 3-6 Sept., Louvain-la-Neuve, Belgium. 2: 1069-1072. (In Persian)
13. Khosravani Moghaddam, A., and Ghorbani, A. 2011. Effect of nanoclay on engineering properties of sticky soils. Sixth National Congress on Civil Engineering, Semnan. 5p. [https://www.civilica.com/Paper-NCCE06-NCCE06\\_0680.html](https://www.civilica.com/Paper-NCCE06-NCCE06_0680.html). (In Persian)
14. Kumar, V. 1996. Reduction of scour around bridge piers using protection devices. Ph.D. Disertation, University of Roorkee, India.
15. Kumar, V., Ranga Raju, K.G., and Vittal, N. 1999. Reduction of local scour around bridge piers using slots and collars. J. Hydraul. Eng. ASCE. 125: 12. 1302-1305.
16. Lai, J.S., Chang, W.Y., and Yen, C.L. 2009. Maximum local scour depth at bridge piers under unsteady flow. J. Hydraul. Eng. ASCE. Pp: 810-821.
17. Lambe, T.W., and Whitman, R.V. 1969. Soil mechanics. SI version, John Wiley, New York, 32p.
18. Lauchlan, G.S., and Melville, B.W. 2001. Riprap protection at bridge piers. J. Hydraul. Eng. ASCE. 127: 5. 412-418.
19. Melville, B.W., and Hadfield, A.C. 1999. Use of sacrificial piles as pier scour countermeasures. J. Hydraul. Eng. ASCE. 125: 11. 1221-1224.
20. Melville, B.W., and Chiew, Y.M. 1999. Time scale for local scour at bridge piers. J. Hydraul. Eng. 125: 1. 59-65.
21. Mia, M.F., and Nago, H. 2003. Design method of time-dependent local scour at circular bridge pier. J. Hydraul. Eng. ASCE. 129: 6. 420-427.
22. Mortazavi, V. 2012. Experimental Investigation of the Effect of Input Hydrograph Characteristics and Characteristics on Base Scouring in Non-Constant Flux Conditions. Master's Degree, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Faculty of Water and Soil Engineering. 88p. (In Persian)
23. Raudkivi, A.J., and Ettema, R. 1983. Clear-water scour at cylindrical piers. J. Hydraul. Eng. ASCE. 109: 3. 338-350.
24. Richardson, E.V., and Davis, S.R. 1995. Evaluating scour at bridges. Hydraul. Eng. Circular No.18, FHWA-IP-90-017.
25. Shafai Bajestan, M. 2005. Shafae Bajestan, M. Theoretical and practical principals of sediment hydraulic. Shahid Chamran University of Ahvaz, 586p. (In Persian)
26. Tregnaghi, M., Marion, A., Colemans, S., and Tail, S. 2010. Effect of flood Recession on Scouring at Bed Sills. J. Hydraul. Eng. ASCE. 136: 4. 204-213.
27. Worman, A. 1989. Riprap protection without filter layers. J. Hydraul. Eng. ASCE. 115: 12. 1615-1630.
28. Zarrati, A.R., Gholami, H., and Mashahir, M.B. 2004. Application of collar to control scouring around rectangular bridge piers. J. Hydraul. Res. IAHR. 42: 1.97-103.
29. Zarrati, A.R., Nazariha, M., and Mashahir, M.B. 2006. Reduction of local scour in the vicinity of bridge pier groups using collars and riprap. ASCE. J. Hyd. Eng. 132: 2. 154-161.



## Experimental Study on Effect of Nanostructures to Control Local Scour of Bridge Piers for Unsteady Flows

E. Ghasemi<sup>1</sup>, \*A. Zahiri<sup>2</sup>, A.A. Dehghani<sup>2</sup> and M. Meftah Halaghi<sup>2</sup>

<sup>1</sup>M.Sc. Graduate of Water Structures, Dept. of Water Engineering, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Iran, <sup>2</sup>Associate Prof., Dept. of Water Engineering, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Iran

Received: 12.22.2017; Accepted: 01.27.2019

### Abstract

**Background and Objectives:** One of the major topics in river engineering is design and construction of the bridges. Beside their stability considerations, estimating the maximum depth of scour in the vicinity of the pier is also very important. Scour is one of the most important reasons for instability and ultimately the collapse of the bridges. While most of the previous researches on bridge piers scour are mainly focused on steady flow conditions, in rivers and especially during flood events, the flow is unsteady and the time variations of flow discharge could be rather fast and rapid. The results of studies have shown that taking into account the unsteady flow would cause more economic and realistic prediction for the maximum depth of scour around the bridge piers. So far, many different methods have been used to protect piers of the bridges. In this research, a non-structural and environmental friendly solution has been used to reduce the depth of the scour of bridge piers in unsteady flow conditions.

**Materials and Methods:** So far, nanostructured materials have been used mainly for improving concrete resistance behavior and earthen rural roads. In order to achieve the research objectives, the combination of nanostructured materials, called Nano-clay was used in a flume bed around the bridge piers. Several experiments for both steady and unsteady flow conditions were conducted on a cylindrical pier with a diameter of 35 mm, in a channel with a 9.5 m length, height and width of 40 cm and a slope of 0.001. Experiments have been carried out in two different cases, with and without the Nano clay materials on the channel bed. For simulating unsteady flow conditions, some stepped triangular hydrographs with a time to peak of 7.5 minutes and peak flows of 8, 12, 16 and 20 liters per seconds were used in two different modes of with and without Nanostructure materials.

**Results:** The results of experiments in unsteady flow conditions indicated that with the presence of nano-materials and with increasing the flow discharges, the maximum scouring depth around the bridge piers reduces. It has been also shown that the maximum reduction of scour depth was nearly 62.86% which was happened at maximum flow discharge of 20 lit/sec. In this particular flow discharge, the maximum scour depth has been reduced from 47.4 mm to 18 mm. The minimum reduction of scour depth was about 56.15% which was happened at the minimum flow discharge of 8 lit/sec.

**Conclusion:** The time evolution of scour around bridge pier has been studied and compared in both cases, with and without presence of nano-materials. In the presence of nano-materials and for all maximum discharges, it has been observed that the scouring process at initial time steps was similar to the condition without nano-materials but with a sharper trend. The trend in later time steps has experienced with the lower changes and finally has reached to a constant value.

**Keywords:** Bridge pier, Hydrograph, Nano-clay, Scour protection, Unsteady flow

---

\* Corresponding Author; Email: zahiri@gau.ac.ir

*Arch*