نشریه مهندسی عمران امیرکبیر

نشریه مهندسی عمران امیرکبیر، دوره ۵۳ شماره ۴، سال ۱۴۰۰، صفحات ۱۵۵۹ تا ۱۵۷۰
DOI: 10.22060/ceej.2019.17029.6436

بررسی آب‌شستگی تکیه‌گاه مستطیلی واقع در کانال مرکب تحت جریان غیرماندگار (مطالعه آزمایشگاهی)

علی‌رضا یزدانی، خسرو حسینی*، حجت کرمی

دانشکده عمران، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران

خلاصه: یکی از پارامترهای مهم در طراحی پایه و تکیهگاه پلها، محاسبه عمق آبشستگی میباشد. روابط اولیه مربوط به تخمین عمق آبشستگی در دههای اخیر غالبا برای جریان ماندگار ارائه شدهاند در حالی‌که در زمان عبور سیلاب، جریان در رودخانه در شرایط غیرماندگار رخ میدهد که دبی جریان بین یک مقدار پایه و اوج متغیر میباشد، پس انتظار نمیرود مقدار آبشستگی محاسبه شده از این روابط با مقدار واقعی که در زمان عبور سیلاب رخ میدهد تطابق زیادی داشته باشد. در این تحقیق به اندازهگیری عمق آبشستگی در محل یک تکیه‌گاه مستطیلی پل در شرایط مختلف جریان ماندگار و همچنین جریان‌های غیرماندگار به ازاء سیلابهایی با هیدروگرافهای مثلثی و پلهای معادل در یک کانال با سطح مقطع مرکب در شرایط آب زلال پرداخته شد. سپس با استفاده از مقادیر آبشستگی اندازهگیری شده در جریانهای ماندگار، رابطهای برای تخمین حداکثر عمق آبشستگی برحسب پارامتر بدون بعد زمان و شرایط جریان تعیین گردیده است. با تغییر زمان وقوع دبی اوج، میزان تاثیر شیب در دو قسمت بالارونده و پایین رونده هیدروگراف مثلثی بر آبشستگی مورد بررسی قرار گرفت. مقایسه آبشستگی در دو هیدروگراف پلهای با زمان تداوم یکسان و تعداد پلههای مختلف نشان داد که اختلاف بین مقادیر آبشستگی حاصل در حد ٪۱/۵ میباشد. همچنین نتایج حاصل از اندازهگیری عمق آبشستگی در هیدروگرافهای مثلثی و پلهای مقایسه گردید.

تاریخچه داوری:
دریافت: ۱۳۹۸/۰۶/۲۱
بازنگری: ۱۳۹۸/۰۸/۲۷
پذیرش: ۱۳۹۸/۰۸/۲۸
ارائه آنلاین: ۱۳۹۸/۰۹/۱۰

کلمات کلیدی:
تکیه‌گاه پل
جریان غیرماندگار
عمق آب‌شستگی
گام زمانی
هیدروگراف پله‌ای

۱- مقدمه

پر هزینه بودن ساخت و تعمیر یک پل و نیز نقش پل در ایجاد ارتباط بین طرفین رودخانه همواره از اهمیت اجتماعی و اقتصادی زیادی برخوردار بوده است. از این‌رو پدیده آب‌شستگی موضعی پی پل‌ها که نقش مهمی در تخریب پل‌ها دارد به میزان زیادی توجه مهندسین را به خود جلب نموده بطوری‌که محاسبه عمق آب‌شستگی در مجاورت پایه و تکیه‌گاه پل‌ها از موضوعات تحقیقاتی مورد توجه مهندسین هیدرولیک در طی دهه‌های اخیر قرار گرفته بوده و تحقیقات فراوانی برای یافتن روابط جهت تخمین عمق آب‌شستگی پی پل‌ها انجام شده‌است. تکیه‌گاه و پایه پل بخشی از پی هر پل را تشکیل می‌دهند و دلیل عمده شکست پل‌ها، وقوع آب‌شستگی در تکیه‌گاه یا پایه در طول زمان عبور سیلاب می‌باشد که نقش باربری نیروهای وارد به سازه را دارند. با یک نگاه به روابط موجود در می‌یابیم که اکثر تحقیقات صورت گرفته بر روی پایه‌ها بوده‌است و این در حالی‌است که تکیه‌گاه نیز دارای اهمیت فراوانی می‌باشد و همچنین پل در شکل عمومی خود می‌تواند از یک دهانه و دو تکیه‌گاه تشکیل شده باشد.

ریچاردسون و دیویس[1] [۱] اشاره کرده‌اند که طبق آمار ارائه شده

* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: khhoseini@semnan.ac.ir

1 Richardson & Davis

حقوق مؤلفین به نویسندگان و حقوق ناشر به انتشارات دانشگاه امیرکبیر داده شده است. این مقاله تحت لیسانس آفرینندگی مردمی (Creative Commons License) در دسترس شما قرار گرفته است. برای جزئیات این لیسانس، از آدرس https://www.creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/legalcode دیدن فرمائید.

توسط اداره راه‌های ایالات متحده آمریکا در سال ۱۹۷۸ از میان ۳۸۳ پل تخریب شده، ٪۲۵ از آن‌ها ناشی از تخریب پایه و ٪۷۲ از آن‌ها ناشی از تخریب تکیه‌گاه بوده است. ساترلند[1] [۲] خرابی‌های پل‌ها در نیوزیلند را در طی سال‌های ۱۹۶۰ تا ۱۹۸۴ بررسی نموده و نتیجه گرفته است که از میان ۱۰۸ خرابی بزرگ، ۲۹ مورد مربوط به خرابی تکیه‌گاه بوده است. رادکیوی[2] [۳] نیز در بررسی‌های خود نشان داده است که یک سوم شکست پل‌ها ناشی از خرابی تکیه‌گاه بوده است. مک‌کی[3] [۴] در گزارشی ٪۷۰ هزینه‌های ناشی از شکست پل‌ها در نیوزیلند را ناشی از خرابی تکیه‌گاه دانست.

چنگ و همکاران[4] [۵] آزمایش‌هایی را بر روی پایه‌های پل در جریان ماندگار و غیرماندگار و در شرایط آب زلال برای رسوبات یکنواخت و غیر یکنواخت انجام دادند و سپس با استفاده از روشی مبتنی بر مفهوم لایه اختلاط روابطی را برای محاسبه تغییرات زمانی عمق آب‌شستگی تحت شرایط جریان ماندگار در رسوبات غیریکنواخت ارائه نمودند و سپس نشان دادند با استفاده از این روابط و مدل هیدروگراف پله‌ای می‌توان با دقت خوبی مقدار آب‌شستگی در زمان عبور سیلاب را در یک رودخانه محاسبه نمود.

لای و همکاران[5] [۶] با در نظر گرفتن هیدروگراف‌های سیل با شاخه‌های بالارونده متفاوت به تحلیل تغییرات زمانی آب‌شستگی موضعی در محل پایه پل تحت شرایط جریان غیرماندگار پرداختند و رابطه‌ای برای تخمین بیشینه عمق آب‌شستگی در شرایط آب‌زلال و رسوبات یکنواخت ارائه‌نمودند. ایشان از دو پارامتر دبی اوج و زمان رسیدن به دبی اوج در هیدروگراف برای نشان دادن غیرماندگاری جریان بهره گرفتند.

کوتیاری و کومار[6] [۷] به بررسی عمق آب‌شستگی در اطراف پایه‌های دایره‌ای شکل پل در شرایط بستر یکنواخت، غیریکنواخت و لایه‌ای در جریان ماندگار و غیرماندگار در شرایط آب زلال پرداختند. ایشان با در نظر گرفتن گرداب اولیه ایجاد شده به عنوان عامل اصلی آب‌شستگی، روشی را برای محاسبه عمق آب‌شستگی بر حسب زمان ارائه نمودند که در زمان‌های طولانی منجر به وقوع بیشینه عمق آب‌شستگی می‌شود.

کریمایی و زراتی[۸] به بررسی تأثیر زمان وقوع اوج سیلاب بر آب‌شستگی دور پایه پل پرداختند و هیدروگراف‌هایی با زمان تداوم یکسان ولی زمان وقوع اوج متفاوت و هیدروگراف‌هایی با دو اوج متوالی و با شرایط جریان متفاوت در زمان اوج را مورد آزمایش قرار دادند. نتایج آزمایش‌های انجام شده نشان داد که برای هیدروگراف‌های با زمان تداوم ثابت، زمان وقوع دبی اوج سیلاب تأثیرناچیزی بر عمق آب‌شستگی نهایی داشته ولی این زمان بر توسعه زمانی آب‌شستگی مؤثر می‌باشد. همچنین برای هیدروگراف‌های با دو اوج متفاوت و زمان تداوم یکسان نیز زمان وقوع اوج‌ها بر توسعه زمانی عمق آب‌شستگی موثر بوده، ولی تأثیر ناچیزی بر عمق آب‌شستگی نهایی دارد. ایشان همچنین تغییرات زمانی عمق آب‌شستگی برای هیدروگراف‌های مورد مطالعه را با استفاده از مدل هیدروگراف پله‌ای و استفاده از روابط برآورد نرخ آب‌شستگی در شرایط جریان ماندگار مورد بررسی قرار دادند و نتیجه گرفتند که در بهترین حالت محاسبه عمق آب‌شستگی نهایی با استفاده از مدل هیدروگراف پله‌ای با خطای متوسطی در حدود ۱۰ درصد همراه می‌باشد.

حسینی و همکاران[۹]در بررسی آزمایشگاهی عمق بیشینه آب‌شستگی و همچنین تغییرات زمانی عمق آب‌شستگی موضعی در تکیه‌گاه‌های کوتاه با دیواره‌های قائم، باله‌ای و نیم دایره‌ای نتیجه گرفتند که ۹۰-۷۰ درصد از عمق آب‌شستگی تعادلی در طی ٪۲۰ ابتدای زمان تعادل آب‌شستگی رخ می‌دهد. همچنین با بهره‌گیری از رگرسیون غیر خطی و شبکه عصبی مصنوعی و سیستم استنتاج عصبی فازی سازگار[7] در تخمین تغییرات زمانی عمق آب‌شستگی تکیه‌گاه و مقایسه آن با روابط تجربی نتیجه گرفتند که مدل رگرسیونی به‌دست آمده با R^2 = ۰/۸۸ دقیق‌تر و کاربردی‌تر است.

محمدپور و همکاران [۱۰] به بررسی آزمایشگاهی تغییرات زمانی عمق آب‌شستگی تکیه‌گاه قائم کوتاه در شرایط آب زلال پرداختند. نتایج آزمایش‌های ایشان نشان داد که ابعاد حفره آب‌شستگی در امتداد جریان در حدود ۳ تا ۵ برابر طول تکیه‌گاه می‌باشد. تحلیل‌ها نشان داد که تکنیک‌های رگرسیون خطی و برنامه‌نویسی ژنتیکی برای محاسبه آب‌شستگی کاربردی‌تر هستند. آنالیزهای حساسیت نشان دادند که پارامترهای t/t_e و L/y و u/u_* به‌ترتیب بیشترین

1 Sutherland
2 Raudkivi
3 Macky
4 Chang et al.
5 Lai et al.
6 Kothyari & Kumar
7 ANFIS

تاثیر را بر روی آب‌شستگی موضعی دارند.

سوابق تحقیقات گذشته نشان می‌دهد که اکثر روابط اولیه مطرح شده در زمینه تخمین عمق آب‌شستگی تکیه‌گاه پل بر اساس نتایج به‌دست آمده از تحقیقات برای شرایط جریان ماندگار استوار بوده است در نتیجه مقدار عمق آب‌شستگی محاسبه شده در این روابط یک مقدار بیشینه خواهد بود که هرگز در طول یک سیلاب رخ نخواهد داد و قطعا پاسخ‌های به‌دست آمده از این روابط اقتصادی نخواهند بود. از این‌رو آنچه‌که در خصوص پدیده آب‌شستگی اهمیت فراوان دارد، شرایط جریان غیرماندگار است که در واقع به خصوصیات هیدروگراف سیلاب عبوری بستگی دارد. از خصوصیات مهم هیدروگراف سیلاب عبوری می‌توان دبی اوج سیلاب، زمان وقوع دبی اوج و زمان تداوم هیدروگراف را نام برد.

در این زمینه تحقیقات فراوانی جهت بهره‌گیری از روابط ارائه شده در خصوص محاسبه حداکثر عمق آب‌شستگی تکیه‌گاه پل در جریان ماندگار و توسعه این روابط به جریان غیرماندگار انجام شده‌است. روابط ارائه شده تحت جریان ماندگار در برگیرنده پارامترهای مربوط به جریان، رسوبات کف و هندسه تکیه‌گاه بوده و غالبا برای کانال مستطیلی به‌دست آمده‌اند. اولیوتو و هگر[1] [۱۱] رابطه‌ای برای محاسبه عمق آب‌شستگی d_s برحسب زمان t به‌دست آوردند و دریافتند که عدد فرود ذره رسوب F_d بیشترین تاثیر را بر پدیده آب‌شستگی دارد. آن‌ها رابطه‌ی ۱ را برای تعیین عمق آب‌شستگی ارائه نمودند.

$$\frac{d_s}{\left(yL_a^2\right)^{\frac{1}{3}}}=0.068N\sigma_g^{-1/2}F_d^{1.5}Log\left(\frac{\left(g'd_{50}\right)^{0.5}}{\left(yL_a^2\right)^{\frac{1}{3}}}t\right) \qquad (۱)$$

که در آن N ضریب شکل و مقدار آن برای پایه‌ی استوانه‌ای برابر با ۱ و برای تکیه‌گاه مستطیلی برابر با ۱/۲۵، L_a طول تکیه‌گاه عمود بر جهت جریان، y عمق جریان، σ_g انحراف معیار توزیع ذرات و d_{50} اندازه متوسط ذرات رسوب و شتاب ثقل کاهش یافته می‌باشند، عدد فرود ذره رسوب و g' شتاب ثقل کاهش یافته[2] از روابط ۲ و ۳ قابل محاسبه‌اند.

$$F_d=\frac{V}{\left(g'd_{50}\right)^{0.5}} \qquad (۲)$$

$$g'=\left(\frac{\rho_s-\rho}{\rho}\right)g \qquad (۳)$$

که V سرعت متوسط جریان، ρ دانسیته سیال، ρ_s دانسیته رسوب و g شتاب جاذبه است.

اولیوتو و هگر با استفاده از رابطه‌ی ۱ روندی را برای محاسبه حداکثر عمق آب‌شستگی پایه و تکیه‌گاه پل در جریان غیرماندگار پیشنهاد نمودند. همچنانکه از این رابطه مشخص است عدد فرود ذره رسوب F_d پارامتر غالب بر فرآیند آب‌شستگی است و طبق نتایج آزمایش‌های انجام شده، عدد فرود آستانه حرکت F_t در محدوده $0/6 < F_t < 1/2$ گزارش شده‌است.

در این تحقیق ضمن انجام آزمایش‌های جریان ماندگار و به‌دست آوردن رابطه‌ای برای تخمین مقدار عمق آب‌شستگی نهایی در تکیه‌گاه، پارامترهای موثر بر آب‌شستگی تحت تاثیر عبور جریان غیرماندگار و هیدروگراف‌های مطرح شده مورد بررسی قرار گرفته است. از طرفی برای شبیه‌سازی شرایط طبیعی یک رودخانه از یک کانال با مقطع مرکب به جای کانال مستطیلی بهره گرفته‌شده‌است. جانمایی تکیه‌گاه در کانال مرکب به منظور لحاظ نمودن جریانات ثانویه در آب‌شستگی تکیه‌گاه می‌باشد که خود به عنوان یک موضوع جداگانه قابل توسعه می‌باشد.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- تجهیزات

برای انجام آزمایش‌های این تحقیق از یک دستگاه فلوم واقع در آزمایشگاه هیدرولیک دانشگاه آزاد نجف آباد استفاده شد. فلوم مطابق شکل ۱ به طول ۱۲ متر، عرض ۱ متر و ارتفاع ۰/۸ متر که در انتهای آن یک دریچه که با کابل حرکت می‌کند و برای کنترل عمق به‌کار می‌رود استفاده شده‌است. ناحیه فرسایش‌پذیر در فاصله ۶ متری از ابتدای فلوم و دارای طول ۳/۵ متر و عمق ۴۲ سانتی‌متر می‌باشد.

پمپ مورد استفاده در فلوم دارای دبی اسمی ۱۲۰ لیتر در ثانیه است و دبی توسط یک دستگاه دبی‌سنج اولتراسونیک که بر روی لوله مکش پمپ نصب شده اندازه‌گیری می‌شود. صفحه نمایشگر دبی‌سنج مطابق شکل ۲ بر روی دستگاهی نصب شده که با اتصال پمپ و دبی‌سنج به درایور داخل آن، عمل ایجاد و کنترل دبی‌های مختلف را

1 Oliveto & Hager
2 Reduced gravitational acceleration

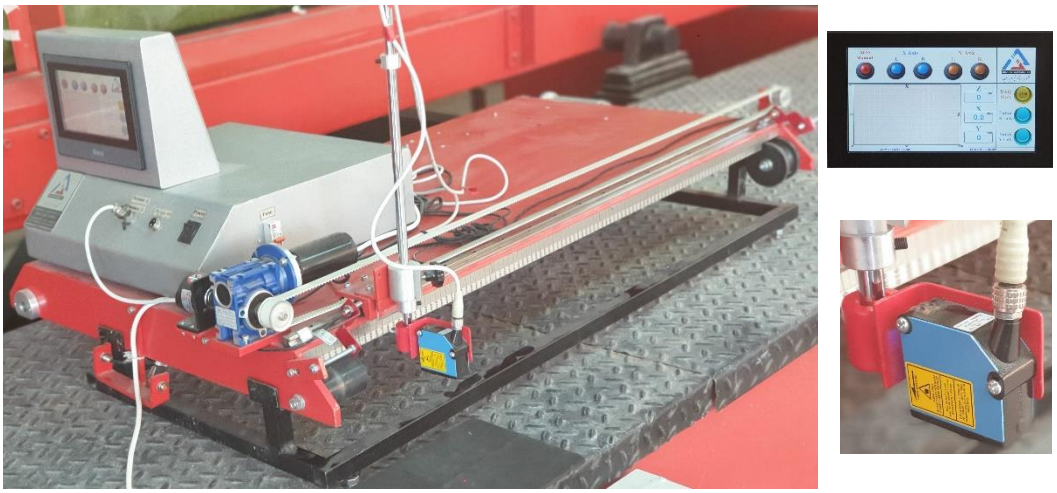
شکل ۱. فلوم آزمایشگاهی
Fig. 1. Experimental flum

شکل ۲. نمایشگر دستگاه دبی‌سنج
Fig. 2. Flow meter monitor

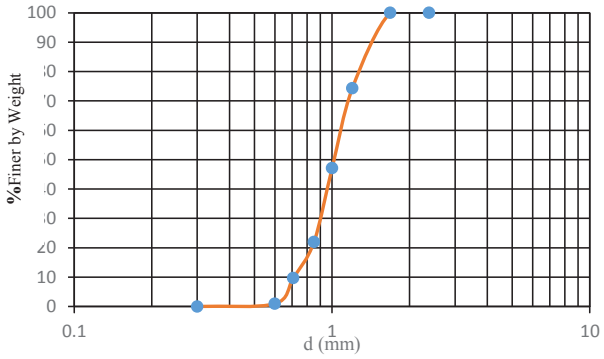
انجام می‌دهد. دبی‌های مختلف از طریق تغییر در فرکانس برق و تغییر در سرعت گردش موتور پمپ ایجاد می‌شود. برای ایجاد هیدروگراف می‌توان با تنظیم دستگاه و اتصال آن به کامپیوتر، هیدروگراف از پیش طراحی شده را ایجاد نمود. بدین ترتیب می‌توان در هر لحظه با تنظیم عمق در فلوم، شرایط خواسته شده در جریان را ایجاد نمود.

برای اندازه‌گیری تغییرات شکل بستر از یک دستگاه برداشت پروفیل رسوب لیزری که در شکل ۳ نشان داده‌شده با امکان حرکت در جهت طولی و عرضی کانال و بهره‌گیری از یک سنسور لیزری با دقت ۰/۵ میلی‌متر استفاده گردید. رسوبات استفاده شده در کف کانال از جنس سیلیس با دانه‌بندی نشان داده شده در شکل ۴ می‌باشد. مطابق دانه‌بندی فوق قطر متوسط اندازه رسوب d_{50} =۱ mm و ضریب یکنواختی σ_g =۱/۳۶ در محدوده دانه‌بندی یکنواخت ۱/۴ > σ_g در نظر گر فته شده‌است[۵] .

از آن‌جایی‌که هدف از انجام این تحقیق بررسی عمق آب‌شستگی در دماغه تکیه‌گاه پل‌ها واقع در سیلاب‌دشت است، عرض سیلاب‌دشت



شکل ۳. دستگاه پروفیل رسوب
Fig. 3. Bed Profiler



شکل ۴. منحنی دانه‌بندی رسوبات کف

Fig. 4. Sediment size distribution curve

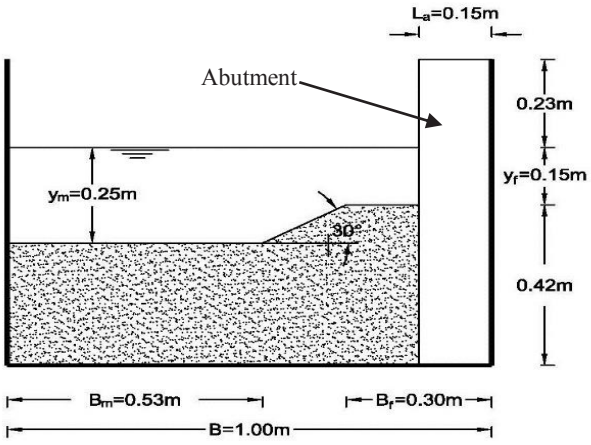
B_f نسبت به عرض فلوم B می‌بایست به نحوی انتخاب گردد که دیواره کانال اصلی (دیواره مقابل تکیه‌گاه) بر آب‌شستگی موضعی در دماغه تکیه‌گاه تاثیر ناچیزی داشته باشد. طبق نظر بالیو[1] [۱۲] به ازای $B_f/B <$ ۰/۳۳ تاثیر دیواره در آب‌شستگی ناچیز است پس ۰/۳= انتخاب شد و پس از انجام آزمایش مشخص شد که تاثیر دیواره کانال اصلی بر فرسایش در محل تکیه‌گاه ناچیز است و بنابراین mm B_f =۳۰۰ انتخاب گردید.

لازم است طول تکیه‌گاه عمود بر جهت جریان نسبت به عرض سیلاب‌دشت به‌نحوی انتخاب گردد که علاوه بر جلوگیری از تاثیر دیواره، عمق آب‌شستگی در حد عمق چاله رسوب در فلوم باشد. با انتخاب نسبت طول تکیه‌گاه به عرض سیلاب‌دشت برابر با L_a/B_f =۱ یعنی با مقادیر B_f =L_a =۳۰۰ mm اقدام به ساخت مدل شد و مشاهده گردید به ازائ دبی ۸۰ لیتر در ثانیه، مقدار آب‌شستگی در حدی است که به کف فلوم می‌رسد. از این‌رو اقدام به طراحی مدل و ساخت تکیه‌گاه با طول کوتاه‌تر L_a =۱۵۰ mm گردید و مشاهده شد که مقادیرآب‌شستگی موضعی در حد قابل قبول بوده و ارتفاع ماسه در چاله فرسایش جواب‌گوی مقادیر حداکثر آب‌شستگی موضعی ایجاد شده‌است. از طرفی با توجه به این معیار که تکیه‌گاه در سیلاب‌دشت قرار دارد اثر طول تکیه‌گاه و عرض سیلاب‌دشت در آب‌شستگی قابل صرف نظر است [۱۳].

در این تحقیق پهنای تکیه‌گاه در امتداد جریان برابر با ۱۵۰ mm است و طبق [۱۴] تاثیری بر عمق آب‌شستگی ندارد.

اندازه‌گیری عمق آب‌شستگی از طریق خط‌کش مدرج نصب شده بر روی دماغه تکیه‌گاه و قرائت آن به کمک دوربین واقع در خارج

1 Ballio



شکل ۵. مقطع عرضی فلوم در محل تکیه‌گاه

Fig. 5. Cross-section of the flume at the abutment

از فلوم انجام گردید. با انتخاب تکیه‌گاه کوتاه $L_a/y<1$ بر اساس مرجع [۱۵] می‌توان از اثر عمق جریان بر آب‌شستگی صرف نظر نمود، لذا مقدار عمق جریان در سیلاب‌دشت y_f =۱۵۰ mm و به تبع آن در کانال اصلی y_m =۲۵۰ mm انتخاب شد. جهت کنترل عمق در کانال یک خط‌کش درفاصله ۱ متری بالادست محل قرارگیری تکیه‌گاه بر روی دیواره فلوم نصب گردید.

۲-۲- محاسبات مقطع مرکب

طبق مشاهدات حرکت ذرات رسوب در کانال اصلی زودتر از سیلاب‌دشت رخ می‌دهد پس تنش برشی در کف کانال اصلی زودتر از سیلاب‌دشت به حالت بحرانی می‌رسد. از این‌رو سرعت برشی بحرانی در کانال اصلی با توجه به اندازه ذره رسوب و عمق جریان از نمودار شیلدز برابر با u_{*c} = ۰/۰۲۴ m/s محاسبه گردید. با استفاده از رابطه‌ی ۴ ضریب شزی و دبی جریان در مقطع مرکب به روش چاو[2] [۱۶] برابر با ۸۸/۷ لیتر در ثانیه محاسبه گردید.

$$C = 18Log\left(\frac{12R}{d_{50}+\frac{3.3\nu}{u_*}}\right) \quad (۴)$$

که C ضریب شزی، R شعاع هیدرولیکی و لزجت سینماتیکی سیال می‌باشد.

با توجه به آزمایش‌های انجام شده مشاهده شد که حرکت در

2 Chow

بستر کانال اصلی در دبی۸۴ لیتر در ثانیه یعنی در محدوده ۹۵٪ معیار آستانه حرکت شیلدز $u_*/u_{*c}=0.95$ رخ می‌دهد. از آنجاییکه تغییرات زمانی آب‌شستگی به ازای $u_*/u_{*c}<0.5$ متوقف می‌شود[۱۷] و هدف از انجام این تحقیق بررسی آب‌شستگی در شرایط آب زلال است، برای اطمینان از اصول ایجاد شرایط آب زلال، محدوده شرایط جریان $0.5<u_*/u_{*c}<0.9$ انتخاب گردید.

در جدول ۱ به ازای هریک از شرایط جریان انتخاب شده در این تحقیق سرعت برشی u_* در کانال اصلی معین شد. سپس با داشتن سرعت برشی، ضریب شزی و دبی جریان در کانال اصلی و سیلاب‌دشت با بهره گیری از نرم‌افزار اکسل محاسبه گردید. مطابق این جدول آزمایش های جریان ماندگار با علامت S که نشانه ماندگاری جریان و عدد مجاور، نشان دهنده شرایط جریان با توجه به نسبت سرعت برشی به سرعت برشی بحرانی است.

۳-۲- آنالیز ابعادی

عمق آب‌شستگی تعادلی (حداکثر عمق آب‌شستگی) در تکیه‌گاه به متغیرها و پارامترهای زیر بستگی دارد [۱۵] :

$$d_{se}=f(\rho,\nu,V,y,\rho_s,d_{50},\sigma_g,L,Sh,Al,G,g) \qquad (۵)$$

که d_{se} عمق آب‌شستگی تعادلی، ν لزجت سینماتیک سیال، y عمق جریان، L طول تکیه‌گاه، Sh و Al پارامترهای مربوط به شکل و امتداد تکیه‌گاه و G پارامتر مربوط به اثرات توزیع عرضی

جدول ۱. نتایج حاصل از آب‌شستگی نهایی در جریان ماندگار

Table 1. Results of final scouring in steady flow

شماره آزمایش	$t_e(s)$	$d_{se}(mm)$	$Q(lit/s)$	u_*/u_{*c}
S-۰/۹۰	۱۷۹۵۳۲	۲۶۶	۷۹/۷	۰/۹
S-۰/۸۵	۱۷۹۵۳۲	۲۳۶	۷۵/۲	۰/۸۵
S-۰/۸۰	۱۷۲۱۸۸	۲۲۵	۷۰/۷	۰/۸۰
S-۰/۷۷	۱۶۹۲۰۰	۱۹۲	۶۷/۷	۰/۷۷
S-۰/۷۵	۱۶۹۲۰۰	۱۵۶	۶۶/۲	۰/۷۵
S-۰/۷۰	۱۶۲۰۰۰	۱۴۷	۶۱/۷	۰/۷۰
S-۰/۶۵	۱۵۸۴۰۰	۱۰۲	۵۷/۲	۰/۶۵
S-۰/۶۳	۱۵۱۲۰۰	۹۰	۵۵/۷	۰/۶۳
S-۰/۶۰	۱۴۴۰۰	۸۴	۵۲/۷	۰/۶۰

جریان و شکل سطح مقطع کانال بالادست می‌باشند. با استفاده از قضیه باکینگهام می‌توان پارامترهای بدون بعد موثر در مقدار آب‌شستگی تعادلی را محاسبه نمود. عمق آب‌شستگی در هر لحظه علاوه بر پارامترهای فوق به پارامتر بدون بعد زمان نیز بستگی دارد [۱۸]:

$$\frac{d_s}{d_{se}}=f\left(\frac{t}{t_e},\frac{L}{y},\frac{d_{50}}{L},\frac{V^2}{gd_{50}},\mathrm{Re},\sigma_g,Al,Sh,G\right) \qquad (۶)$$

که d_s عمق آب‌شستگی در لحظه t و t_e زمان تعادلی آب‌شستگی می‌باشد.

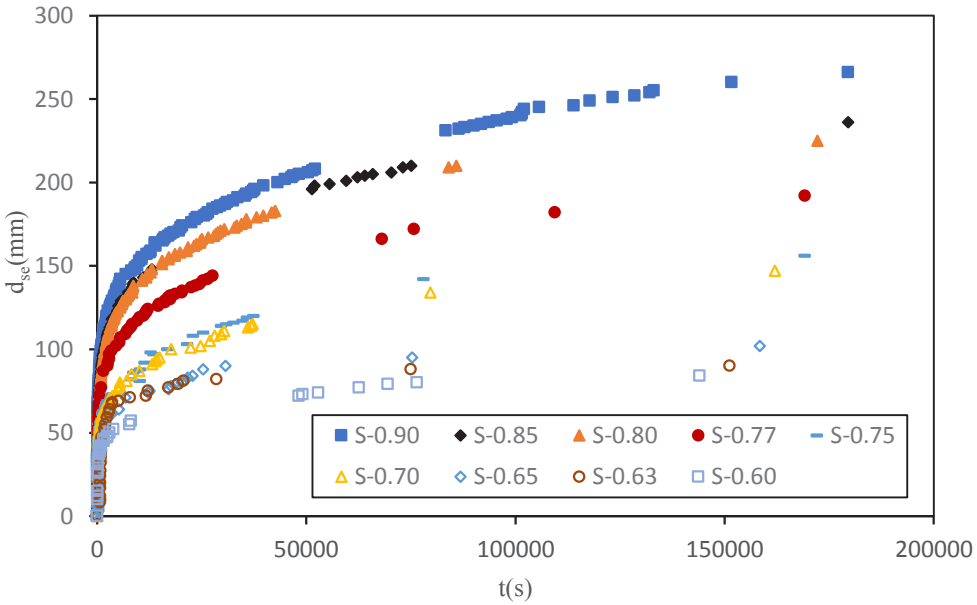
از آن‌جایی‌که در این تحقیق $L_a>50d_{50}$ است از اثر اندازه رسوب می‌توان صرف نظر نمود. در تکیه‌گاه قائم و با امتداد عمود بر جریان واقع در سیلاب‌دشت و با فاصله کافی از لبه کانال اصلی، تاثیر پارامترهای Sh و Al و G از رابطه فوق حذف می‌گردد. همچنین اثر معیار توزیع دانه‌بندی رسوبات به علت یکنواختی دانه بندی رسوبات حذف می‌گردد. از طرفی می‌توان به خاطر قوی بودن سیستم گردابی در اطراف پایه و تکیه‌گاه، از اثرات لزجت در فرآیند آب‌شستگی صرف‌نظر کرد [۱۳, ۱۵]. همچنین می‌توان عبارت مربوط به شدت جریان را با عبارت u_*/u_{*c} جایگزین نمود[۱۹]. بدین ترتیب رابطه ۷ را می‌توان چنین ارائه نمود:

$$\frac{d_s}{d_{se}}=f\left(\frac{t}{t_e},\frac{u_*}{u_{*c}}\right) \qquad (۷)$$

۴-۲- محاسبه عمق آب‌شستگی

به منظور به‌دست آوردن رابطه ای برای محاسبه تغییرات زمانی عمق آب‌شستگی تکیه‌گاه در شرایط آب زلال $u_*/u_{*c}<1$ جریان ماندگار و عمق ثابت، با به‌کار بری ضریب کالیبراسیون a و توان‌های b و c برای پارامترهای بدون بعد زمان t/t_e و عبارت u_*/u_{*c} رابطه‌ی ۸ از رابطه‌ی ۷ حاصل شد.

$$\frac{d_s}{d_{se}}=a\left(\frac{t}{t_e}\right)^b\left(\frac{u_*}{u_{*c}}\right)^c \qquad (۸)$$



شکل ۶. منحنی تغییرات عمق آب شستگی تکیه گاه برحسب زمان تحت جریان ماندگار

Fig. 6. Temporal variations of abutment scour depth under steady flow

۳- نتایج و بحث

۳-۱- تحلیل آزمایش های جریان ماندگار

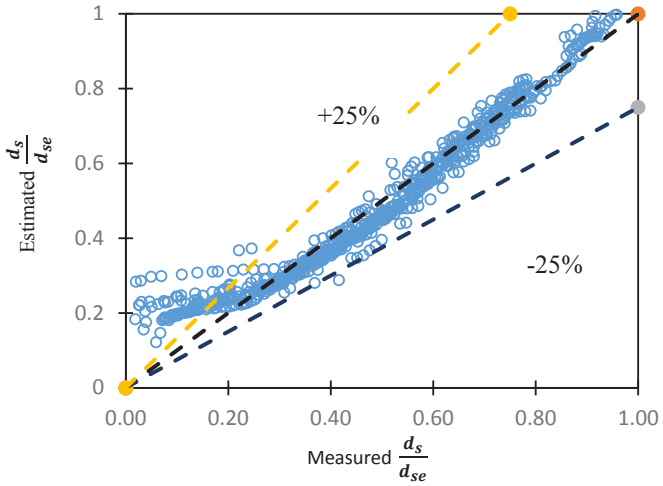
در جدول ۱ و شکل ۶ نتایج مربوط به آزمایش های جریان ماندگار ارائه شده است. با استفاده از رگرسیون چند متغیره، ضرایب رابطه‌ی ۸ محاسبه شد و مقدار جذر میانگین مربعات خطا[1] برابر با ۰/۰۵۵ و R^2=۰/۹۴۳ به‌دست آمد.

با به‌کارگیری رابطه‌ی ۹ مقدار عمق آب‌شستگی در شرایط مختلف

$$\frac{d_s}{d_{se}} = 1.035\left(\frac{t}{t_e}\right)^{0.223}\left(\frac{u_*}{u_{*c}}\right)^{-0.287} \quad (۹)$$

جریان تخمین زده شد و سپس با مقادیر آب‌شستگی اندازه‌گیری شده مقایسه گردید. نتیجه این مقایسه در شرایط مختلف جریان در شکل ۷ نشان داده شده‌است. در مقایسه مقادیر محاسبه شده از رابطه‌ی ۹ با مقادیر اندازه‌گیری شده نتیجه گرفته‌شد که در محدوده‌ی ٪۲۰ اولیه آب‌شستگی مقادیر محاسبه شده، ٪۲۵ بیشتر از مقادیر اندازه‌گیری شده‌است. به عبارت دیگر مقدار آب‌شستگی در لحظات اولیه که دارای نرخ تغییرات بیشتری می‌باشد، کمتر از آب‌شستگی محاسبه شده از رابطه‌ی ۹ است که این پدیده به خاطر شروع آب‌شستگی از کناره دیواره تکیه‌گاه و سپس افزایش آن در دماغه تکیه‌گاه می‌باشد.

شکل ۸ نمای سه بعدی چاله آب‌شستگی ایجاد شده و شکل ۹ توپوگرافی آب‌شستگی در اطراف دیواره تکیه‌گاه در آزمایش S =۰/۶۰ که به وسیله‌ی دستگاه برداشت پروفیل رسوب اندازه‌گیری شده‌است را نشان می‌دهد.



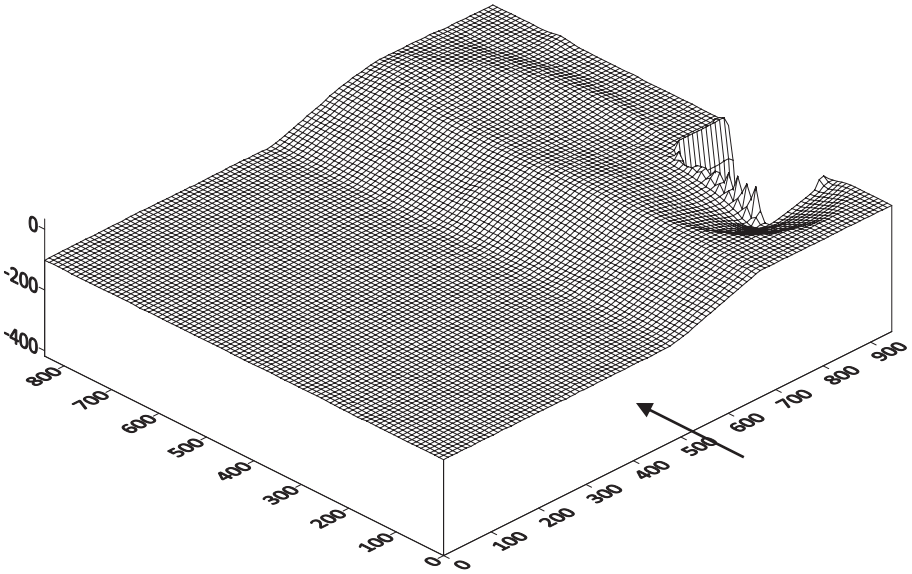
شکل ۷. مقایسه مقادیر بدون بعد آب‌شستگی اندازه‌گیری شده و محاسبه شده

Fig. 7. Comparison of dimensionless values of scour measured and calculated

۳-۲- تحلیل آزمایش های جریان غیر ماندگار

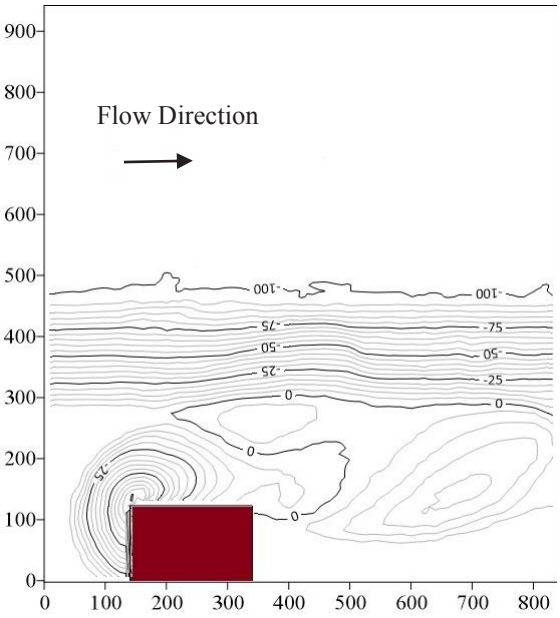
به منظور بررسی مقدار عمق آب شستگی تکیه گاه، در جریان غیرماندگار هیدروگراف ¬ ساده مثلثی متقارن مطابق شکل ۱۰ استفاده شد که در آن t_p زمان وقوع دبی اوج، t_s بازه زمانی وقوع

1 RMSE



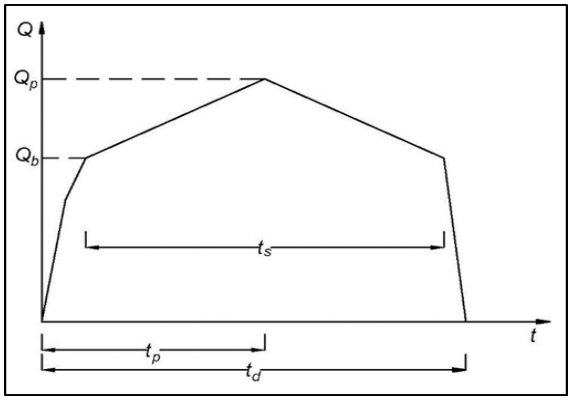
شکل ۸. نمای سه بعدی چاله آب‌شستگی در آزمایش S-0.6

Fig. 8. Three dimensional sketch of scour hole in S-0.6 test



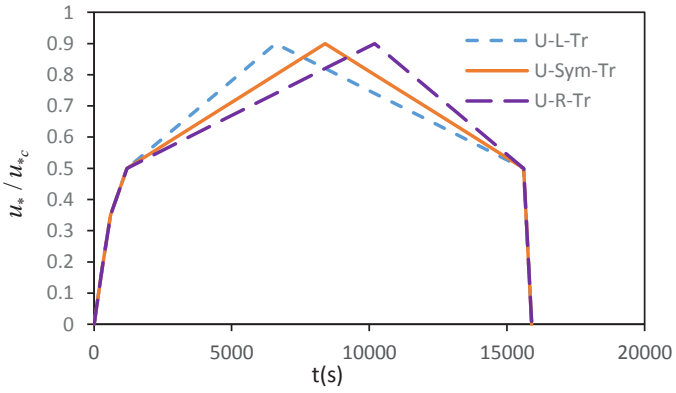
شکل ۹. توپوگرافی آب‌شستگی در آزمایش S-0.6

Fig. 9. Scour topography in the test S-0.6



شکل ۱۰. شمای هیدروگراف مثلثی

Fig. 10. Triangular hydrograph schema



شکل ۱۱. هیدروگراف‌های مورد آزمایش

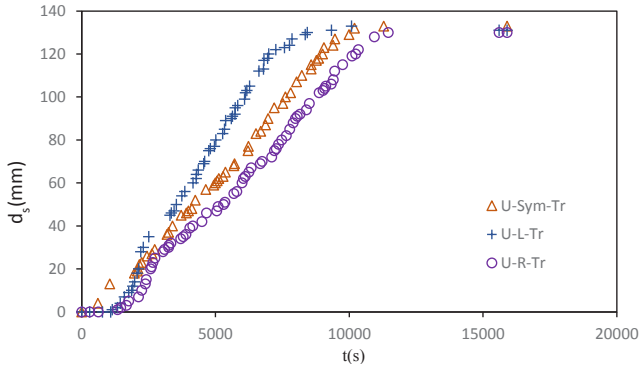
Fig. 11. Tested hydrograghs

آب‌شستگی، t_d زمان تداوم هیدروگراف، Q_p دبی اوج و Q_b دبی آستانه حرکت رسوب (آغاز آب‌شستگی) در نظر گرفته‌شد. جهت بررسی تاثیر زمان وقوع دبی اوج بر عمق آب‌شستگی تکیه‌گاه، هیدروگراف‌های غیر متقارن نیز مطابق شکل ۱۱ طراحی گردید و محدوده تغییرات دبی در تمامی آن‌ها از ۴۳/۷ تا ۷۹/۷ لیتر در ثانیه که معادل با تغییرات پارامتر u_*/u_{*c} از ۰/۵تا ۰/۹ می‌باشد در نظر

جدول ۲. مشخصات و نتایج مربوط به آب‌شستگی در هیدروگراف‌های مثلثی مورد آزمایش

Table 2. Characteristics and results of scouring in triangular tested hydrograph

$d_{se}(mm)$	$Q_b(lit/s)$	$Q_p(lit/s)$	$t_d(s)$	$t_s(s)$	$t_p(s)$	شماره آزمایش
۱۳۱	۴۳/۷	۷۹/۷۲	۱۵۹۰۰	۱۴۴۰۰	۶۶۰۰	U-L-Tr
۱۳۳	۴۳/۷	۷۹/۷۲	۱۵۹۰۰	۱۴۴۰۰	۸۴۰۰	U- Sym-Tr
۱۳۰	۴۳/۷	۷۹/۷۲	۱۵۹۰۰	۱۴۴۰۰	۱۰۲۰۰	U-R-Tr



شکل ۱۲. تغییرات زمانی آب‌شستگی تکیه‌گاه در هیدروگراف‌های مثلثی مورد آزمایش

Fig. 12. Temporal variations of abutment scouring in triangular hydrographs tested

گرفته شده‌است. در این هیدروگراف‌ها حرف U نشان دهنده جریان غیرماندگار، بخش دوم نشان دهنده تقارن یا عدم تقارن شکل به سمت چپ و یا راست و عبارت سوم نوع هیدروگراف را از لحاظ مثلثی و پله‌ای بودن نشان می‌دهد. مشخصات و نتایج حاصل از آب‌شستگی در هیدروگراف‌های مورد آزمایش در جدول ۲ ارائه گردیده است.

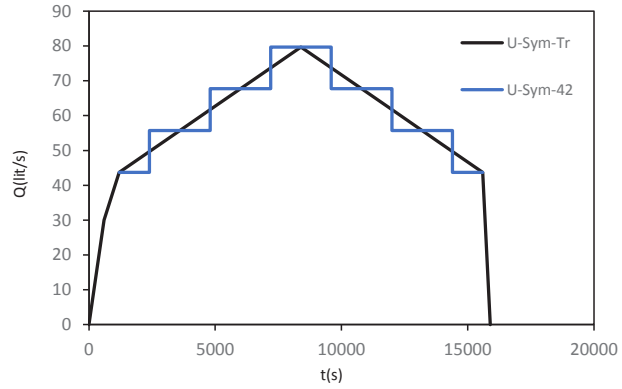
تغییرات زمانی آب‌شستگی تکیه‌گاه در هر یک از هیدروگراف‌های مورد آزمایش در شکل ۱۲ نشان داده شده‌است. طبق این شکل مقدار آب‌شستگی نهایی در هیدروگراف‌های U-Sym-Tr، U-L-Tr و U-R-Tr تقریبا برابر است و نشان دهنده عدم تاثیر زمان وقوع دبی اوج t_p در مقدار آب‌شستگی نهایی است. به عبارتی عدم تقارن در شکل هیدروگراف تاثیری بر میزان آب‌شستگی نهایی ندارد. اما زمان رسیدن به آب‌شستگی نهایی بستگی به زمان اوج هیدروگراف و شیب قسمت بالارونده هیدروگراف دارد. با کاهش زمان وقوع دبی اوج و افزایش شیب منحنی بالارونده، آب‌شستگی نهایی زودتر رخ می‌دهد. به عبارتی با کاهش زمان دبی اوج، در شاخه بالارونده هیدروگراف، آب‌شستگی با شدت بیشتری نسبت به شاخه پایین‌رونده رخ می‌دهد. اختلاف بین مقدار آب‌شستگی نهایی درهیدروگراف‌های مثلثی متقارن و غیر متقارن بسیار اندک و عملا برابراست، بنابراین در ادامه تحقیق هیدروگراف مثلثی متقارن به عنوان هیدروگراف مبنا برای طراحی هیدروگراف‌های پله‌ای مورد استفاده قرار گرفت. زراتی و کریمایی[۸] در بررسی آب‌شستگی موضعی در اطراف پایه‌های پل نیز نشان دادند که برای هیدروگراف‌های با زمان تداوم ثابت زمان وقوع دبی اوج سیلاب تاثیر ناچیزی در عمق آب‌شستگی نهایی دارد ولی این زمان بر توسعه زمانی آب‌شستگی موثر است.

مدت زمان آب‌شستگی در هیدروگراف‌ها برابر با ۱۴۴۰۰ ثانیه در نظرگرفته شده که معادل فاصله زمانی شرایط جریان در پارامتر u_*/u_{*c}=۰/۵ در شاخه بالارونده و پایین‌رونده است. دو هیدروگراف پله‌ای مورد استفاده به ترتیب با گام‌های زمانی ۲۵۲۰ ثانیه (۴۲ دقیقه) و ۱۸۰۰ ثانیه (۳۰ دقیقه) که مشخصات آن‌ها در جدول ۳ ارائه‌گردیده، در شکل‌های ۱۳ و ۱۴ نشان داده شده‌اند. در جدول

جدول ۳. مشخصات هیدروگراف‌های پله‌ای مورد آزمایش

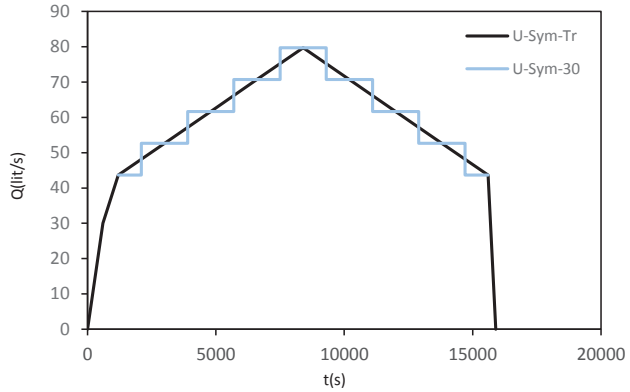
Table 3. Characteristics of stepped hydrographs used in experiments

$\Delta t(s)$	$Q_b(lit/s)$	$Q_p(lit/s)$	$t_d(s)$	$t_s(s)$	$t_p(s)$	شماره آزمایش
۲۵۲۰	۴۳/۶۸	۷۹/۷۲	۱۵۹۰۰	۱۴۴۰۰	۶۶۰۰	U-Sym-42
۱۸۰۰	۴۳/۶۸	۷۹/۷۲	۱۵۹۰۰	۱۴۴۰۰	۶۶۰۰	U-Sym-30



شکل ۱۳. هیدروگراف مثلثی متقارن و پله‌ای با Δmin 42=t

Fig. 13. Symmetrical and stepped triangular hydrograph with Δt=42 min



شکل ۱۴. هیدروگراف مثلثی متقارن و پله‌ای با Δmin 30=t

Fig. 14. Symmetrical and stepped triangular hydrograph with Δt=42 min

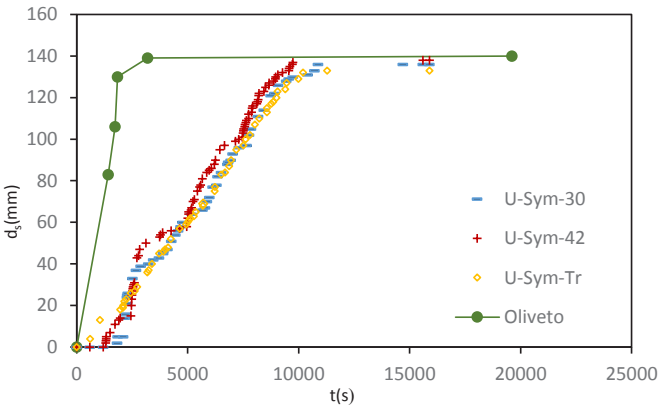
جدول ۴. مقایسه آب‌شستگی نهایی در هیدروگراف‌های مثلثی و پله‌ای

Table 4. Comparing of final scour depth in stepped and triangular hydrographs

نوع هیدروگراف	هیدروگراف پله‌ای		هیدروگراف مثلثی
آب‌شستگی نهایی(میلی‌متر)	U-Sym-42 ۱۳۸	U-Sym-30 ۱۳۶	U-Sym-Tr ۱۳۳

۴ مقادیر آب‌شستگی اندازه‌گیری شده از دو هیدروگراف با گام‌های زمانی ۴۲ و ۳۰ دقیقه U-Sym -۲۴ و U-Sym -۳۰ در مقایسه با هیدروگراف Tr-U-Sym ارائه گردیده که منحنی تغییرات زمانی آب‌شستگی در این هیدروگراف‌ها در شکل ۱۵ نشان داده شده و مشخص گردید دو هیدروگراف پله‌ای دارای اختلاف ۱/۵٪ و عملا برابر بوده و اختلاف آن‌ها با مقدار حاصل از هیدروگراف مثلثی حدود ۳/۷٪ است.

برای مقایسه نتایج به دستآمده در این تحقیق با تحقیقات مشابه، از رابطه‌ی ۱ برای محاسبه تغییرات زمانی عمق آبشستگی تکیهگاه در جریان غیرماندگار مطابق شکل ۱۵ استفاده گردید. می‌توان مشاهده نمود که در منحنی تغییرات زمانی به روش الیوتو سرعت آبشستگی در ابتدا زیاد و سپس در انتها بسیار کاهش می‌یابد. اختلاف مقدار آبشستگی نهایی تخمین زده شده به روش الیوتو نسبت به آزمایشهای انجام شده در تحقیق ۵/۲ ٪ + است، در روش الیوتو سهم بیشتر آبشستگی تا زمانی در حدود ۲۰ ٪ زمان مشابه در هیدروگراف های مورد آزمایش است.



شکل ۱۵. تغییرات زمانی آب‌شستگی تکیه‌گاه در هیدروگراف‌های مثلثی و پله‌ای

Fig. 15. Temporal variations of abutment Scouring in Triangular and Stepped Hydrographs

۴- نتیجه‌گیری

در این تحقیق آب‌شستگی بستر سیلاب‌دشت در یک کانال با مقطع مرکب در محل دماغه تکیه‌گاه مستطیلی و تحت تاثیر عبور هیدروگراف ساده یک سیل به صورت آزمایشگاهی مورد بررسی قرار گرفته است. آب‌شستگی در شرایط آب زلال در رسوبات با دانه‌بندی

یکنواخت و با عمق ثابت در نظر گرفته شد. با تشخیص کمیت‌های موثر بر آب‌شستگی و انجام آنالیز ابعادی رابطه‌ای برای محاسبه تغییرات زمانی آب‌شستگی بر حسب پارامترهای بدون بعد موجود در مسئله تعریف گردید. سپس با استفاده از نتایج آزمایش های جریان ماندگار رابطه ای با جذر میانگین مربعات خطا ۰/۰۵۵ و R۲=۰/۹۴۳ محاسبه گردید. هیدروگراف‌های مورد مطالعه در این تحقیق دارای زمان تداوم یکسان می‌باشند. با تغییر در زمان وقوع دبی اوج مشاهده شد که مقدار آب‌شستگی نهایی تغییر نمی‌کند اما توسعه زمانی آب‌شستگی متفاوت است. با مقایسه مقادیر نهایی آب‌شستگی در هیدروگراف‌های پله‌ای وغیر پله‌ای مشخص گردید که اختلاف ناچیزی بین مقادیر به‌دست آمده وجود دارد.

با استفاده از رابطه پیشنهادی اولیوتو و هگر [۱۴] توسعه زمانی آب‌شستگی محاسبه گردید و اختلاف مقدار نهایی با مقادیر آزمایشگاهی ۵/۲ ٪ است.

۵- تشکر و قدردانی

ازهمکاری دانشگاه آزاد نجف آباد به خاطر در اختیار قرار دادن آزمایشگاه هیدرولیک جهت انجام این تحقیق کمال تشکر و قدردانی را دارد.

۶- فهرست علائم

a ضریب کالیبراسیون

Al پارامتر مربوط به امتداد تکیه‌گاه

b ضریب کالیبراسیون

B عرض کانال، m

B_f عرض سیلاب‌دشت، m

c توان

C ضریب شزی

d قطر ذرات رسوب، mm

d_{50} قطر متوسط ذرات رسوب، mm

d_s عمق آب‌شستگی، mm

d_{se} عمق آب‌شستگی تعادلی، mm

F_d عدد فرود ذره‌رسوب

F_t عدد فرود آستانه حرکت

g شتاب ثقل، m/s^2

g' شتاب ثقل کاهش‌یافته، m/s^2

G اثرات توزیع عرضی جریان و شکل سطح مقطع کانال بالادست

L_a طول تکیه‌گاه عمود بر جهت جریان، m

N ضریب شکل

Q_b دبی آستانه حرکت رسوب، lit/s

Q_p دبی اوج، lit/s

R ضریب همبستگی

R_e عدد رینولدز

Sh پارامتر مربوط به شکل تکیه‌گاه

t زمان، s

t_d زمان تداوم هیدروگراف، s

t_e زمان تعادل آب‌شستگی، s

t_p زمان وقوع دبی اوج، s

t_s بازه زمانی وقوع آب‌شستگی، s

u_* سرعت برشی، m/s

u_{*c} سرعت برشی بحرانی، m/s

V سرعت متوسط جریان، m/s

y عمق جریان، m

y_f عمق سیلاب‌دشت، m

y_m عمق کانال اصلی، m

علایم یونانی

ρ دانسیته سیال، kg/m^3

ρ_s دانسیته رسوب، kg/m^3

ν لزجت سینماتیکی سیال، m/s^2

σ_g ضریب یکنواختی ذرات رسوب

زیرنویس‌ها

a تکیه‌گاه

c بحرانی

d تداوم

e تعادل

f سیلاب‌دشت

m کانال اصلی

p اوج

s آب‌شستگی

t آستانه حرکت

مراجع

[1] E.V. Richardson, S.R. Davis, Evaluating scour at bridges, United States. Federal Highway Administration. Office of Technology Applications, 1995.

[2] A. Sutherland, Reports on bridge failure, RRU Occasional Paper, National Roads Board, Wellington, New Zealand, (1986).

[3] A.J. Raudkivi, Loose boundary hydraulics, CRC Press, 1998.

[4] G. Macky, Survey of roading expenditure due to scour, CR 90-09, Department of Scientific and Industrial Research, Hydrology Centre, Christchurch, New Zealand, (1990).

[5] W.Y. Chang, J.S. Lai, C.L. Yen, Evolution of scour depth at circular bridge piers, Journal of Hydraulic Engineering, 130(9) (2004) 905-913.

[6] J.S. Lai, W.Y. Chang, C.L. Yen, Maximum local scour depth at bridge piers under unsteady flow, Journal of Hydraulic Engineering, 135(7) (2009) 609-614.

[7] U.C. Kothyari, A. Kumar, Temporal variation of scour around circular compound piers, Journal of Hydraulic Engineering, 138(11) (2012) 945-957.

[8] A.R. Zarrati, M. Karimaei, Effect of Hydrograph Peak Time on Local Scour around Bridge Pier, Journal of Hydraulic 9(3) (2014) 18, (in Persian).

[9] K. Hosseini, H. Karami, H. Hosseinjanzadeh, A. Ardeshir, Prediction of Time-varying Maximum Scour Depth Around Short Abutments using Soft Computing Methodologies-A Comparative Study, KSCE Journal of Civil Engineering, 20(5) (2015) 2070-2081.

[10] R. Mohammadpour, A.A. Ghani, H.M. Azamathulla, Estimation of dimension and time variation of local scour at short abutment, International journal of river basin management, 11(1) (2013) 121-135.

[11] G. Oliveto, W.H. Hager, Temporal evolution of clear-water pier and abutment scour, Journal of Hydraulic Engineering, 128(9) (2002) 811-820.

[12] F. Ballio, Local and contraction scour at bridge abutments, in: Building Partnerships, (2000), pp. 1-9.

[13] S.E. Coleman, C.S. Lauchlan, B.W. Melville, Clear-water scour development at bridge abutments, Journal of Hydraulic Research, 41(5) (2003) 521-531.

[14] G. Oliveto, W.H. Hager, Further results to time-dependent local scour at bridge elements, Journal of Hydraulic Engineering, 131(2) (2005) 97-105.

[15] B. Melville, Local scour at bridge abutments, Journal of Hydraulic Engineering, 118(4) (1992) 615-631.

[16] V.T. Chow, Open-channel hydraulics, McGraw-Hill, (1959) Chap. 6 pp. 136-140.

[17] U.C. Kothyari, R.C.J. Garde, K.G. Ranga Raju, Temporal variation of scour around circular bridge piers, Journal of Hydraulic Engineering, 118(8) (1992) 1091-1106.

[18] A. Cardoso, R. Bettess, Effects of time and channel geometry on scour at bridge abutments, Journal of Hydraulic Engineering, 125(4) (1999) 388-399.

[19] S.Y. Lim, Equilibrium clear-water scour around an abutment, Journal of Hydraulic Engineering, 123(3) (1997) 237-243.

برای ارجاع به این مقاله از عبارت زیر استفاده کنید:

A. R. Yazdani, K. Hosseini, H. Karami, Investigation of Scouring at Rectangular Abutments in a Compound Channel under Unsteady Flow (Experimental Study), Amirkabir J. Civil Eng., 53(4) (2021): 1559-1570.

DOI: 10.22060/ceej.2019.17029.6436