

Single Bridge Pier Scour in Uniform and Non-uniform Sediment Beds Under Steady and Unsteady Flow


Mahin Eshaghian¹, Saeed Gohari^{2*}, Saeid Okhravi³

1- Graduate M.Sc student, Dep. of Water Engineering, College of Agriculture, Bu-Ali Sina University, 3869565178, Hamadan, Iran.

2- Assistant Professor, Dep. of Water Engineering, College of Agriculture, Bu-Ali Sina University, 3869565178, Hamadan, Iran.

3- PhD Candidate, Dep. of Water Engineering, College of Agriculture, Bu-Ali Sina University, 3869565178, Hamadan, Iran.

*S.gohari@basu.ac.ir

Received: 20 August 2019, Accepted: 13 October 2019  J. Hydraul. Homepage: www.jhyd.iha.ir

Abstract

Introduction: Bridge scour is one of the most important challenges in river engineering. Research into local scour has primarily focused on studying the impact of different hydrodynamic conditions on scour in a bed of uniformly graded material. However, local scour investigations in a bed of uniformly well-graded material provided knowledge of the underlying processes, field sediment beds are much more complex consisting of non-uniform sediment mixtures ($\sigma_g > 1.4$). In the case of complex sediment beds, selective transport of the finer particles due to unequal mobility can make the bed surface to be armored. There have been relatively few studies reported in the literature relating to scour in complex sediment beds, and most of these relate to quite specific situations. With regards to natural river materials (non-uniform sediments) and its great effects on the dimension and the time evolution of scour hole, the interaction of flow-structures with non-uniform sediments is very crucial due to armor layer development. The aim of this study is to improve understanding of scour development and armoring evolution in non-uniform sediment beds for estimating the scour depth in more realistic field conditions. Therefore, the rate of variation of erosion over time around single cylindrical pier is studied in different bed sediment types.

Methodology: The armored layer due to selective transport of the finer particles in non-uniform sediments causes complexity for predicting equilibrium scour depth. The present experiments on local bridge scour were conducted in hydraulic laboratory of the Bu-Ali Sina University (Hamadan, Iran). The pier model with a diameter of 4 cm was put inside a 0.5 m wide, 10.5 m long and 0.5 m depth rectangular tilting flume. In this study, the number of 15 experiments were organized at five different sediment beds, uniform and non-uniform in two steady flow condition (20 and 35 l/s with the same flow intensity of $u/uc \sim 0.9$) along with an unsteady flow. The duration of tests was fixed at 8 hours in all runs based on the empirical method given by Ettema (1980).

Results and Discussion: The experimental results revealed that with increasing flow rate from 20 to 35 l/s (increasing follow shallowness, h/b) at the same sediment bed, not only larger scour depths were recorded, but also the armor layer became coarser. The comparison between the

bed configurations with uniform and non-uniform sediments represented dramatical reduction of the scour depth regards with increasing sediment non-uniformity. The effect of non-uniform sediments on scour in a current clear water conditions showed that maximum scour depth was less than scour depth in a uniform sand with the same d_{50} value. The comparison between these two mentioned bed configurations showed that the change in geometric standard deviation (σ_g) from 1.4 to 2 (altering the uniform bed to non-uniform), decreased the maximum depth of scour by 70% and 60% in two corresponding experiments. As the armor layer coarser grains remains at upstream flow bed and at the vicinity of scour hole in the same flow intensity, the scour depth was decreased. Otherwise, there was not remarkable decrease on the scour depth by increasing non-uniformity index, since two sediment beds types were non-uniform. Also, a slight increase on scour depth has been observed by reduction of median grain size in the beds with non-uniform sediments at the same geometric standard deviation. By taking into account of the grain size of the armor layer and ice cover roughness, Wu et al. (2014) analyzed the dimensionless maximum scour depth and they found out that with an increase in grain size of the armor layer, the dimensionless maximum scour depth decreases. Singh et al. (2018) investigated the incipient motion for gravel particles in cohesionless sediment mixtures having silt and sand. The visual observations of the channel bed after the end of incipient motion indicated the appearance of gravel particles at the top surface of the sediment bed. The critical shear stress for the gravel particles was found to be lower in the presence of silt. Presence of silt in the mixture affects the critical shear stress for gravel particles. They concluded from the present study that high silt content in the mixture leads to the higher deviation of critical shear stress from the revised Shields curve. They proposed an equation for the determination of critical shear stress of gravel particles in the non-uniform sediment mixture.

Conclusion: The results showed that scour depths were reduced dramatically as sediment non-uniformity index (σ_g) increase in clear water conditions. The larger particles form an armor layer protecting the bed from eroding. The observation indicated that with increasing flow depth, the armor layer coarsens, and larger scour depths were recorded. However, scour depth increase rate was very different for the various bed sediment types.

Keywords: Scour, Flow Pattern, Bridge Pier, Armor Layer, Non-Uniform Sediment.

آبشستگی پایه پل منفرد در بستر رسوبات یکنواخت و نایکنواخت با جریان ماندگار و ناماندگار

مهین اسحاقیان^۱، سعید گوهری^{۲*} و سید سعید اخروی^۳

۱- دانش‌آموخته کارشناسی ارشد سازه‌های آبی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه بوعلی سینا همدان.

۲- استادیار، گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه بوعلی سینا همدان.

۳- دانشجوی دکتری سازه‌های آبی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه بوعلی سینا همدان.

*S.gohari@basu.ac.ir

دریافت: ۱۳۹۸/۰۵/۲۹، پذیرش: ۱۳۹۸/۰۷/۲۱، وب‌گاه نشریه هیدرولیک: www.jhyd.iha.ir

چکیده: آبشستگی پایه پل یکی از مهم‌ترین چالش‌ها و نگرانی‌ها در ایمنی پل‌ها است. با توجه به فیزیک طبیعی مصالح رودخانه‌ای (رسوبات نایکنواخت) و اثرگذاری بالای آن بر ابعاد و تکامل زمانی گودال آبشستگی، بررسی برهم‌کنش جریان و سازه با بستر رسوبی نایکنواخت به دلیل تشکیل لایه سپر دارای اهمیت بالایی است. بدین منظور، بررسی گسترش زمانی آبشستگی در پیرامون تک پایه دایره‌ای در بسترهای رسوبی با شرایط دانه‌بندی متفاوت آزمایش شد. لایه سپر گسترش یافته از انتقال انتخابی ذرات ریزتر در رسوبات نایکنواخت سبب پیچیدگی در برآورد عمق آبشستگی می‌شود. در این پژوهش، ۱۵ آزمایش در قالب ۵ بستر رسوبی مختلف، یکنواخت و نایکنواخت، در دو جریان ماندگار (۲۰ و ۳۵ لیتر بر ثانیه) و یک جریان ناماندگار صورت گرفته است. نتایج نشان داد که با افزایش دبی جریان (افزایش عمق جریان، h/b در شدت جریان همسان، u/uc) در بسترهای رسوبی یکسان، نه تنها عمق آبشستگی در حدود ۲۷ درصد افزایش یافته است، بلکه لایه سپر درشت‌تری در سطح بستر ایجاد می‌شود. مقایسه آزمایش‌های متناظر در بسترهای یکنواخت و نایکنواخت نشانگر کاهش قابل ملاحظه (تا ۷۰ درصد) عمق بیشینه آبشستگی با افزایش میزان نایکنواختی ذرات است. اگرچه میزان کاهش قابل توجهی در عمق آبشستگی با افزایش نایکنواختی ذرات در بین دو بستر نایکنواخت مشاهده نشد. کاهش قطر میانه ذرات (افزایش نسبت $b/d50$) در بسترهای نایکنواخت با در نظرگیری انحراف معیار هندسی یکسان، سبب افزایش میزان عمق آبشستگی شده است.

کلید واژگان: آبشستگی، الگوی جریان، پایه پل، لایه سپر، رسوبات نایکنواخت.

۱- مقدمه

آبشستگی وابسته است، شناخت تفاوت‌های میان دو نوع آبشستگی آب زلال و بستر زنده مهم می‌باشد. آبشستگی در شرایط بستر زنده هنگامی رخ خواهد داد که سرعت جریان از سرعت آستانه حرکت رسوبات فراتر رود ($u/uc > 1$). برای یک نوع رسوب مشخص، عمق آبشستگی در بستر زنده کمتر از عمق بیشینه آبشستگی در شرایط آب زلال است زیرا در حالت آب زلال رسوبات از بالادست به درون گودال آبشستگی وارد نشده و بیشینه عمق آبشستگی (d_s) محاسبه می‌شود. نتایج بررسی‌های Melville (1997) گویای آن بود که بیشینه عمق آبشستگی در شرایط آب زلال در حدود ۱۰ درصد بیشتر از عمق آبشستگی در حالت بستر زنده

بیش از شش دهه از بررسی پدیده آبشستگی به صورت متمرکز می‌گذرد، اما به دلیل پیچیدگی‌های خاص الگوی آبشستگی و توزیع جریان سه بعدی، همواره مورد توجه پژوهشگران حوزه مهندسی رودخانه بوده است. بنابر بررسی‌های سازمان فدرال ایالات متحده آمریکا در سال ۱۹۷۳، ۲۵ درصد شکست پل‌ها به دلیل آبشستگی پایه‌های آن بوده است (Richardson et al., 1993). از آنجایی که گسترش زمانی گودال آبشستگی و ارتباط بین عمق آبشستگی و سرعت جریان در نزدیکی پایه، به نوع

است. پژوهشگران بیشماری به بررسی آبشستگی موضعی پیرامون سازه‌های هیدرولیکی اعم از پایه پل در رسوبات یکنواخت پرداختند. نتایج آنان سبب تفسیر میدان جریان و الگوی آبشستگی پیرامون سازه‌های هیدرولیکی شده است. گزارش‌های کاملی توسط پیشگامان این زمینه در علم هیدرولیک در سالیان متمادی ارائه شده است (Breusers et al., 1977; Raudkivi and Sutherland, 1981; Melville and Coleman, 2000; Ettema et al., 2006; Sheppard et al., 2011). Lança et al. (2013) در نتایج بررسی‌های خود نشان دادند که عمق آبشستگی پیرامون تک پایه دایره‌ای در زمان t ، در یک آبراهه (کانال) مستطیلی و در شرایط آب زلال به فراسنجه (پارامتر)های بی بعد مطرح شده در رابطه ۱ وابسته است. در این رابطه، d_s عمق آبشستگی، b قطر پایه، u سرعت میانگین جریان در بالادست پایه، u_c سرعت آستانه حرکت رسوبات، d_{50} قطر میانه ذرات رسوب، h عمق جریان در بالادست پایه، σ_g انحراف معیار هندسی ذرات و θ زاویه قرارگیری پایه نسبت به امتداد جریان است.

با در نظرگیری شرایط جریان در حالت آب زلال ($u/u_c \sim 1$) به منظور دستیابی به بیشینه عمق آبشستگی در لحظه تعادل و با $\theta=0^\circ$ ، رابطه ۱ به صورت رابطه ۲ ساده می‌شود.

$$\frac{d_s}{b} = \varphi \left(\frac{h}{b}; \frac{u}{u_c}; \frac{b}{d_{50}}; \frac{ut}{b}; \sigma_g; \theta \right) \quad (1)$$

شرایط مفروض در رابطه ۲ نشان از اثرگذاری‌های مستقیم اندازه ذرات بستر و نایکنواختی رسوبات بر میزان آبشستگی است. با این وجود تحقیقات بسیار کمی در مورد بسترهای رسوبی پیچیده شامل رسوبات مخلوط از ریزدانه تا ذرات درشت صورت گرفته که بیشتر آن‌ها در شرایط خاص آزمایشگاهی انجام شده است. برای نخستین بار Chiew and Melville (1989) به بررسی اثرات رسوبات نایکنواخت در شرایط بسترزنده پرداختند. نتایج آنان نشان داد که عمق تعادل آبشستگی کمتر یا برابر با میزان همانند آن در رسوبات یکنواخت می‌باشد. دلیل این امر را می‌توان تشکیل و گسترش لایه‌ای از ذرات درشت‌دانه در سطح بستر (لایه سپر) عنوان کرد (Okhravi and Gohari, 2018). همچنین

(Raudkivi and Ettema, 1985) نیز به نتایج همانندی در آبشستگی آب زلال دست یافتند. این محققان اثرگذاری‌های سپر شدن بستر را در عمق تعادل آبشستگی بررسی کردند. نتایج این تحقیق نشان داد که عمق تعادل آبشستگی به سرعت جریان وابسته بوده و در سرعت‌های کم (تنش برشی بستر کم)، میزان آن در بسترهای سپر شده کمتر از میزان همسان در بستر رسوبی یکنواخت می‌باشد. در حالی که، Wu et al. (2015) با انجام تحقیقات همانندی در بسترهای رسوبی سپر شده دریافتند که عمق آبشستگی در رسوبات نایکنواخت در زمان افزایش تنش برشی بستر از میزان آستانه، به دلیل فروپاشی لایه سپر بیشتر خواهد بود. در سال‌های اخیر (Singh et al., 2018) به بررسی آستانه حرکت ذرات در مخلوط رسوبات ناچسبیده پرداختند و معادله‌هایی را برای محاسبه تنش برشی بحرانی ذرات درشت‌دانه با در نظرگیری قطر میانه ذرات رسوب، انحراف معیار هندسی ذرات و عامل (فاکتور) مخفی شدن ذرات در رسوبات مخلوط ارائه کردند. لازم به یادآوری است که تمرکز تحقیقات پیشین در رسوبات نایکنواخت به منظور مقایسه اثرگذاری رسوبات نایکنواخت بر میزان تنش برشی بحرانی و عمق آبشستگی بوده است و تحقیق جامعی پیرامون مقایسه اثرگذاری‌های اندازه ذرات و درجه نایکنواختی آن‌ها در بسترهای رسوبی نایکنواخت بر گسترش آبشستگی به صورت آزمایشگاهی انجام نشده است.

نتایج دیگر تحقیقات نشان داده است که با افزایش دبی جریان و تغییر جریان از حالت دائمی به متغیر زمانی (جریان ناماندگار)، درجه سپر سازی بستر افزایش یافته است (Hassan et al., 2006). در دبی بیشینه جریان، سطح‌های سپر شده ممکن است پایداری خود را از دست داده، شکسته شده و در جریان‌های کمتر مورد بازسازی قرار گیرند (Yager et al., 2015). با این تفاسیر هنوز شرایط و فراسنجه‌های تعیین‌کننده پایداری و یا فروپاشی لایه سپر به طور کامل مشخص نیست. شاید یکی از دلایل آن، دشواری در اندازه‌گیری میدانی تغییرپذیری‌های زمانی بافت سطح بستر در طول جریان است. به همین دلیل بررسی روش و عملکرد پایداری لایه سپر با مشاهده و اندازه‌گیری تغییرپذیری‌های مکانی بافت سطحی بستر و تاثیرگذاری‌های

شکل ۱ طرح فلوم و محل انجام آزمایش‌ها را نشان می‌دهد. محل قرارگیری پایه برای انجام آزمایش‌ها صفحه‌ای از جنس پلاستیک تفلون دارای طول ۱/۰۶ متر و هم‌عرض آبراهه بود. همچنین محل آزمایش در بالادست و پایین‌دست توسط سکوهایی از جنس تفلون به طول ۱ متر و ارتفاع ۱۲ سانتی‌متر احاطه شده بود. لازم به یادآوری است که فاصله پایه تا ورودی جریان حدود ۴ متر بود که شرایط گسترش لایه مرزی در این مسیر با سنگ‌چینی و ایجاد شبکه لانه‌زنبوری در محل ورودی جریان فراهم شده است. همچنین سکویی به طول ۱۰ سانتی‌متر و ارتفاع ۱۵ سانتی‌متر و عرض ۰/۵ متر در انتهای محل آزمایش به منظور گردآوری رسوبات شسته شده در انتهای بستر آزمایش تعبیه شده بود. برای اندازه‌گیری عمق آبشستگی در زمان آزمایش از یک لیمنی‌متر با دقت ± 1 میلی‌متر استفاده شده است.

آن بر گسترش و تکامل گودال آبشستگی در شرایط کنترلی آزمایشگاه از جدیدترین بحث‌های پیش روی مهندسان هیدرولیک می‌باشد (Orrú et al., 2016). هدف اصلی این پژوهش تفسیر اثرهای متقابل جریان با رسوبات نایکنواخت بر آبشستگی موضعی پیرامون پایه پل می‌باشد. لذا در این پژوهش، تأثیر نایکنواختی رسوبات بر عمق بیشینه آبشستگی در جریان‌های ماندگار و ناماندگار و در بسترهای رسوبی مختلف بررسی شده است.

۲- مواد و روش

۲-۱- فلوم آزمایشگاهی

این پژوهش در آزمایشگاه هیدرولیک گروه مهندسی آب در دانشگاه بوعلی سینا همدان انجام گرفته است. فلوم آزمایشگاهی موجود از جنس شیشه و کف پلکسی گلاس به طول ۱۰/۵، عرض و ارتفاع ۰/۵ متر و با شیب ۰/۰۰۲ بود.

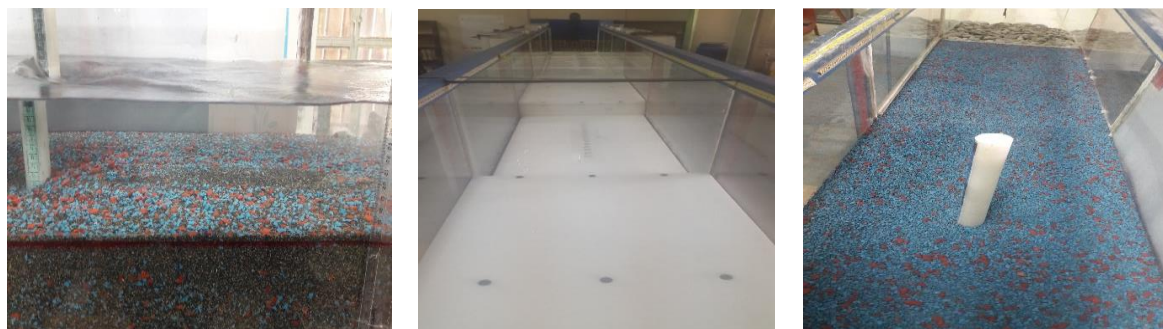
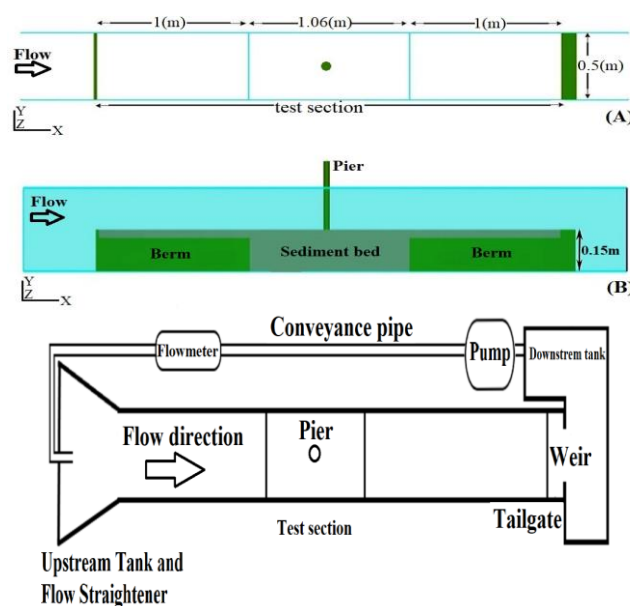


Fig. 1 Flume schematic and sediment bed section (berm and pier model)

شکل ۱ نمای کلی فلوم و منطقه بستر رسوبی (سکو و پایه)

۲-۲- بستر جریان

رسوبات با استفاده از الک‌های استاندارد در اندازه‌های مختلف دانه‌بندی شد تا برای تهیه بستر رسوبی مورد نیاز با قطر میانگین ذرات خاص استفاده شد. رسوبات درشت در دو دسته ۶/۳۵-۹/۵ و ۴/۷۵-۶/۳۵ میلی‌متر، رسوبات متوسط در دسته ۲-۴/۷۵ میلی‌متر و رسوبات ریز در دو دسته ۱/۱۹-۲ و ۰/۶-۱/۱۹ میلی‌متر قرار گرفتند. برای نمایش هر چه بهتر لایه سپر در بستر رسوبات نایکنواخت، رسوبات درشت و متوسط به ترتیب با رنگ‌های روغنی قرمز و آبی رنگ‌آمیزی شدند.

به منظور بررسی آبشستگی موضعی پیرامون پایه در رسوبات مختلف، ۵ بستر رسوبی یکنواخت و نایکنواخت برای این پژوهش با قطر میانگین ذرات (d_{50}) ۲، ۱، ۱، ۱ و ۳/۵ میلی‌متر آماده شد. اثرگذاری‌های اندازه ذرات در قالب نسبت b/d_{50} بیان می‌شود. معیار نایکنواختی رسوبات بر مبنای انحراف معیار هندسی ذرات است ($\sigma_g = \sqrt{(d_{84}/d_{16})}$). d_{16} و d_{84} اندازه‌های از رسوبات هستند که ۸۴ و ۱۶ درصد ذرات در نمودار توزیع اندازه ذرات از آن‌ها کوچکترند. هنگامی که $\sigma_g < 1.4$ باشد رسوبات به صورت یکنواخت و در خلاف این صورت نایکنواخت در نظر گرفته می‌شوند (Dey, 2014). خلاصه‌ای از ویژگی‌های فیزیکی بسترهای مورد استفاده در این پژوهش در جدول ۱ نشان داده شده است. در این پژوهش دو بستر اول و پنجم دارای رسوبات یکنواخت با انحراف معیار هندسی حدود ۱/۴ و سه بستر دوم، سوم و چهارم دارای رسوبات نایکنواخت با انحراف معیار هندسی ۲/۲، ۲/۱ و ۳ هستند. لازم به یادآوری است که فراوانی شمار ذرات درشت و ریز در بسترهای مورد آزمایش و اثرگذاری‌های آن بر میزان درشتی لایه سپر به طور مستقیم با فراسنجه نایکنواختی ذرات رسوب (σ_g) در بستر بیان می‌شود.

مدل پایه استوانه‌ای به مانند سکوها از جنس پلاستیک تفلون انتخاب شد. با در نظر گیری معیار Melville and Sutherland (1988) برای دستیابی به اطمینان از بی تأثیر بودن دیوار بر پایه ($b > 0.12B$)، قطر پایه ($b = 4 \text{ cm}$) در نظر گرفته شد (B عرض فلوم می‌باشد). همچنین با توجه به قطر پایه، بیشینه عمق آبشستگی برآوردی در بیشتر

رابطه‌های ارائه شده کمتر از ۱۰ سانتی‌متر بود و به همین دلیل در جهت اطمینان بالاتر، ضخامت رسوبات بستر ۱۳ سانتی‌متر در نظر گرفته شد. همچنین رسوبات روی سکوها بالادست و پایین دست نیز اضافه شدند تا شرایط رسوبی پیش و پس از پایه یکسان باشد.

جدول ۱ ویژگی‌های رسوب‌های مورد استفاده

n%	σ_g	d_{16}	d_{84}	d_{50}	Bed Configuration
(Porosity)	(mm)	(mm)	(mm)		
35.5	1.45	1.59	3.35	2	Configuration 1
29.68	2.17	1	4.75	2	Configuration 2
26.61	2.08	0.5	2.16	1.09	Configuration 3
28.84	2.98	0.51	4.57	1.04	Configuration 4
33.33	1.4	2.34	4.62	3.48	Configuration 5

۲-۳- تنظیم دبی جریان

از آنجایی که یکی از هدف‌های اصلی این پژوهش، بررسی شکل‌گیری، تکامل و پایداری لایه سپر است، لذا سه دبی جریان مختلف (Q)، شامل دبی ۲۰ و ۳۵ لیتر بر ثانیه جریان ماندگار و یکنواخت به منظور بررسی اثرگذاری نسبی عمق جریان بر میزان آبشستگی (h/b) به همراه یک جریان ناماندگار با دبی بیشینه ۳۵ لیتر بر ثانیه در نظر گرفته شد. همچنین اعماق جریان (h) لازم برای تنظیم آستانه جریان (u/u_c) با استفاده از معادله‌های ارائه شده توسط Melville and Coleman (2000) محاسبه شد. از آنجایی که تمرکز این پژوهش بر اثرگذاری انواع رسوبات مختلف بر پدیده آبشستگی است، $u/u_c \sim 0.9$ برای همه‌ی آزمایش‌های با جریان ماندگار تنظیم شده است. بنابراین در این پژوهش منظور از افزایش دبی جریان، افزایش عمق جریان است. لازم به یادآوری است که تنظیم عمق جریان و سرعت آستانه حرکت در رسوبات نایکنواخت (u_a) با استفاده از روش یاد شده و با در نظرگیری بیشترین اندازه ذرات موجود در نمودار توزیع اندازه ذرات (d_{max}) هر بستر صورت می‌گیرد و در حقیقت از قطر میانگین ذرات لایه سپر برای محاسبه u_a و تنظیم شرایط آستانه حرکت استفاده شده است. لذا تنظیم شرایط یکسان آستانه حرکت ذرات برای همه‌ی آزمایش‌ها در رسوبات یکنواخت و نایکنواخت به منظور دستیابی به بیشینه عمق آبشستگی در شرایط آب زلال انجام شد.

۱۰، ۱۵ و ۲۰ و به طور عموم در جلو و کنار پایه به ترتیب برای بسترهای یکنواخت و نایکنواخت صورت گرفت تا میزان افزایش یا کاهش عمق آبشستگی در هر گام و در روند کلی آبشستگی به روشنی مشخص شود. در شکل ۲ آبنگار (هیدروگراف) مربوط به جریان ناماندگار مشاهده می‌شود. لذا در این تحقیق اثرگذاری‌های تغییر پیوسته دبی و سرعت جریان در قالب آبنگار مربوطه بر میزان عمق آبشستگی بررسی شده است.

۲-۴- زمان آزمایش

مدت زمان انجام آزمایش‌ها باید به گونه‌ای انتخاب شود که نه تنها بیشینه عمق آبشستگی پدیدار شود بلکه فرآیند آبشستگی به تعادل برسد. به منظور تعیین زمان تعادل، معیارهای متفاوتی توسط محققان بیشمار تعریف شده است (Ettema, 1980). در این پژوهش از معیار Ettema (1980) استفاده شده است. بر این مبنا، مدت زمانی که نرخ افزایش عمق آبشستگی کمتر از یک میلی‌متر ($\Delta d_s < 1 \text{ mm}$) در ۲۴ ساعت باشد، به عنوان زمان تعادل آبشستگی تعریف شده است. لذا به منظور تعیین زمان تعادل، آزمایش‌های بلندمدت بیش از ۲۴ ساعت، در بسترهای رسوبی مختلف صورت گرفت و بنابر نتایج بدست‌آمده، مدت زمان ۸ ساعت برای همه‌ی آزمایش‌های با جریان ناماندگار این پژوهش در نظر گرفته شد. اگرچه آزمایش‌های جریان ناماندگار در قالب یک آبنگار ۵ ساعته تنظیم شده است.

با توجه به آن که تغییرپذیری‌های عمق آبشستگی در ساعت‌های اولیه زیاد است، لذا توالی اندازه‌گیری‌های عمق آبشستگی در ساعت اول به صورت هر ۵ دقیقه، ساعت دوم هر ۱۰ دقیقه و از ساعت سوم تا ساعت هشتم به صورت هر ۳۰ دقیقه انجام شد.

۲-۵- برداشت پستی و بلندی بستر

به منظور برداشت پستی و بلندی (توپوگرافی) بستر رسوبی پس از آزمایش از یک متر لیزری مدل لایکا (Leica) D810 به ابعاد $3 \times 5/5 \times 3/16$ سانتی‌متر و با دقت اندازه‌گیری ± 1 میلی‌متر در بازه ۲۵۰ متر (محصول کشور اتریش) استفاده

جریان ناماندگار بررسی شده در این پژوهش دارای ۱۵ گام با زمان تداوم ۲۰ دقیقه بوده که ۶ گام آن در بازوی بالارونده آبنگار (هیدروگراف) و ۹ گام بعدی در بازوی پایین‌رونده آبنگار تنظیم شده بود (در مجموع زمان تداوم آبنگار ۵ ساعت است). بیشینه دبی جریان تنظیمی این آبنگار نیز معادل با دبی بیشینه مورد استفاده در آزمایش‌های با جریان ماندگار (۳۵ لیتر بر ثانیه) انتخاب شد. همچنین دبی پایه ۸/۵ لیتر بر ثانیه نیز بر مبنای کمترین دبی تأمین شده توسط پمپ و مبدل جریان مستقیم به متناوب (اینورتور) و برای شرایط $u/u_c=0.5$ به عنوان زمان آغاز آبشستگی تعیین شده است. بنابراین، بر مبنای شرایط جریان (میزان دبی مشخص) و حد آستانه سرعت، اعماق جریان برای گام‌های اول $u/u_c=0.5$ ، دوم $u/u_c=0.6$ ، سوم $u/u_c=0.7$ ، چهارم $u/u_c=0.8$ ، پنجم $u/u_c=0.9$ ، ششم $u/u_c=0.95$ ، هفتم $u/u_c=0.9$ ، هشتم $u/u_c=0.85$ ، نهم $u/u_c=0.8$ ، دهم $u/u_c=0.75$ ، یازدهم $u/u_c=0.7$ ، چهاردهم $u/u_c=0.65$ ، پانزدهم $u/u_c=0.6$ ، شانزدهم $u/u_c=0.55$ و هجدهم $u/u_c=0.5$ تنظیم شدند. بنابر نتایج بررسی‌های (Tabarestani and Zarrati, 2017) کمترین زمان لازم برای هر گام زمانی در شرایط همسان آزمایش یاد شده ۶ دقیقه می‌باشد و لذا اعمال گام زمانی ۲۰ دقیقه در این پژوهش مناسب به نظر می‌رسد. نکته قابل توجه آن است که در نیمه دوم هر گام زمانی ۲۰ دقیقه، جریان به حالت ماندگار نزدیک شده تا اینکه باردیگر شدت جریان ورودی تغییر می‌کند. برای هر گام از جریان ناماندگار تنظیمی، ۶ مرتبه خواندن عمق بیشینه آبشستگی در دقیقه‌های ۲/۵، ۵، ۷/۵،

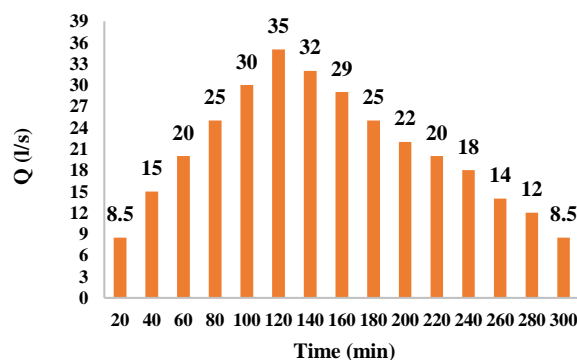


Fig. 2 Hydrograph used in the present study
شکل ۲ آبنگار (هیدروگراف) مورد استفاده در این تحقیق

جریان ناماندگار صورت گرفته است. به طور کلی می‌توان گفت که با افزایش دبی جریان به دلیل افزایش عمق جریان، عمق آبشستگی افزایش خواهد یافت. اما این موضوع در نوع بسترهای مختلف دارای درصد متفاوتی است.

میزان افزایش عمق آبشستگی با افزایش دبی از ۲۰ به ۳۵ لیتر بر ثانیه (اثر افزایش نسبی عمق جریان در u/u_c همسان) در بستر اول ۱۸ درصد، بستر دوم ۶۱ درصد، بستر سوم ۱۶ درصد، بستر چهارم ۲۳ درصد و بستر پنجم ۱۹ درصد می‌باشد (جدول ۲). به طور کلی در بسترهای مختلف میزان افزایش عمق آبشستگی به صورت میانگین در حدود ۲۷ درصد است. البته این میزان در بستر دوم بیشتر از دیگر بسترهای رسوبی مشاهده شده است. دلیل این امر، نایکنواخت بودن رسوبات بستر و دامنه گسترده اندازه ذرات موجود در بستر دوم در عین درشتی نسبی (d_{50}) ذرات آن بستر است. نتایج یاد شده به صورت جداگانه برای هر بستر قابل تفسیر است. به طور کلی بررسی شرایط جریان در آزمایش‌های ۲۰ و ۳۵ لیتر بر ثانیه نشان داد که نزدیک به ۸۲ درصد عمق آبشستگی نهایی در ۳۰ دقیقه ابتدایی در آزمایش‌های با دبی ۲۰ لیتر بر ثانیه و نزدیک به ۷۰ درصد در آزمایش‌های با دبی ۳۵ لیتر بر ثانیه ایجاد شده است که نشانگر اهمیت بسیار بالای آبشستگی در لحظه‌های ابتدایی است. تکامل زمانی عمق آبشستگی در پژوهش‌های (Lança et al. (2013 و Oliveto and Hager (2002) نتایج همانندی را نشان می‌دهد. همچنین همان‌طور که در جدول ۲ نیز مشاهده می‌شود، در جریان‌های ناماندگار به طور عموم میزان عمق بیشینه آبشستگی در گام ششم آب‌نگار (بیشینه دبی جریان) رخ نداده است و در گام‌های پس از آن مشاهده شده است. دلیل این امر، بالاتر بودن نرخ فرسایش رسوبات پیرامون پایه نسبت به نرخ فرسایش رسوبات در بالادست پایه در گام‌های پس از گام ششم و به ویژه در بسترهای نایکنواخت است. لذا در گام‌های بعدی نیز میزان عمق آبشستگی رو به افزایش است تا هنگامی که نرخ فرسایش رسوبات در محل پایه و در بالادست آن برابر شوند (Tabarestani and Zarrati, 2014). به عنوان نمونه عمق بیشینه آبشستگی در خواندن دقیقه ۱۲۷/۵ و در گام هفتم از جریان ناماندگار در

شد. شبکه تهیه شده برای برداشت پستی و بلندی سطح بستر دارای بیش از ۲۳۰۰ نقطه است. لازم به یادآوری است که یک متر ابتدایی و انتهایی رسوبات روی سکوه‌های بالادست و پایین دست با شبکه 10×5 و ناحیه $1/0.6$ متری وسطی با شبکه متغیر 2×2 و 2×1 برداشت شد. دلیل تفاوت در ناحیه وسط، افزایش میزان دقت برداشت پستی و بلندی بستر در محل قرارگیری پایه می‌باشد. پس از محاسبه‌های لازم بر نقطه‌های برداشتی توسط متر لیزری، پستی و بلندی سطح بستر توسط نرم‌افزار Surfer برای هر آزمایش ترسیم شد. در شکل ۳ شبکه نقطه‌های یاد شده به منظور برداشت پستی و بلندی بستر رسوبات در پایان هر آزمایش مشاهده می‌شود.

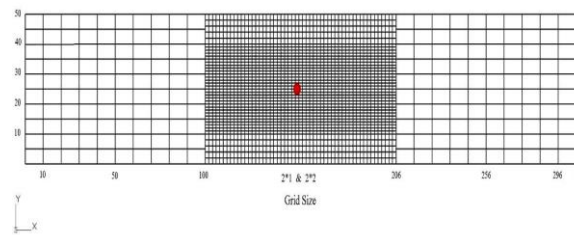


Fig. 3 Sediment section grid size
شکل ۳ شبکه‌بندی بستر رسوبی محل آزمایش

۴- نتایج و بحث

۴-۱- نتایج

در این پژوهش ۱۵ آزمایش در قالب ۵ بستر رسوبی مختلف و در سه نوع دبی جریان انجام شد. مقایسه بسترهای رسوبی یکنواخت و نایکنواخت با در نظرگیری d_{50} یکسان و σ_g متفاوت (بستر اول و دوم-بستر سوم و چهارم) و یا d_{50} متفاوت و σ_g یکسان (بستر دوم و سوم-بستر اول و پنجم) در شرایط همسان u/u_c امکان پذیر می‌باشد (به جدول ۱ رجوع شود). افزون بر این، امکان مقایسه اثرگذاری‌های افزایش دبی جریان (عمق جریان) و تغییر نوع جریان از ماندگار به ناماندگار نیز در این پژوهش فراهم می‌باشد. در این بخش به صورت خلاصه سعی خواهد شد تا به اثرهای دبی جریان، اندازه متوسط ذرات رسوبی و انحراف معیار هندسی ذرات بر میزان آبشستگی پیرامون تک پایه پرداخته شود. آزمایش اول هر بستر با دبی ۲۰ لیتر بر ثانیه، آزمایش دوم هر بستر با دبی ۳۵ لیتر بر ثانیه و آزمایش سوم آن با

آزمایش‌های با جریان ناماندگار بین آزمایش اول هر بستر (دبی ۲۰ لیتر بر ثانیه) و آزمایش دوم همان بستر (دبی ۳۵ لیتر بر ثانیه) قرار می‌گیرد (جدول ۲). افزون بر این گسترش گودال آبشستگی در دبی ۳۵ لیتر بر ثانیه نیز به مراتب از دبی ۲۰ لیتر بر ثانیه بیشتر است که نشانگر تأثیر قابل ملاحظه دبی جریان (اثرگذاری‌های افزایش عمق جریان) بر گسترش گودال آبشستگی است (جدول ۲). همچنین، میزان ابعاد گودال آبشستگی و میزان رسوبات شسته شده از بستر جریان در پایان آزمایش در آزمایش‌های با دبی ۳۵ لیتر بر ثانیه از دبی ۲۰ لیتر بر ثانیه بیشتر است.

به منظور بررسی اثرگذاری‌های انحراف معیار هندسی ذرات با شرط ثابت بودن اندازه متوسط ذرات بستر، آزمایش‌های بستر اول و دوم ($d_{50}=2\text{ mm}$) و بسترهای سوم و چهارم ($d_{50}=1\text{ mm}$) را می‌توان به صورت جداگانه مقایسه کرد. مقایسه بستر اول و دوم نشان داد که با تغییر انحراف معیار هندسی ذرات از $1/4$ به 2 (تبدیل رسوبات یکنواخت به نایکنواخت)، عمق بیشینه آبشستگی در سه آزمایش متناظر آن‌ها به ترتیب 70 ، 60 و 70 درصد کاهش یافته است که مقادیر بسیار قابل توجهی است (شکل ۵). اما نتایج مقایسه بسترهای سوم و چهارم نشان داد که افزایش میزان انحراف معیار هندسی ذرات از 2 به 3 ، به نسبت مورد پیشین، تأثیر قابل توجهی بر کاهش میزان عمق آبشستگی نداشته است. درصد کاهش میزان عمق بیشینه آبشستگی در آزمایش‌های متناظر این دو بستر به ترتیب 8 ، 2 و $7/5$ درصد بوده است. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که افزایش میزان انحراف معیار هندسی ذرات هنگامی که بستر از یکنواخت به غیریکنواخت تبدیل شود، سبب کاهش قابل ملاحظه آبشستگی در بستر خواهد شد. در حالی که در دو بستر نایکنواخت، افزایش میزان انحراف معیار هندسی ذرات سبب کاهش قابل ملاحظه آبشستگی نخواهد شد، اگرچه میزان آبشستگی به دلیل درشت‌تر شدن لایه سپر گسترش یافته پیرامون پایه، کاهش یافته است.

افزایش میزان نایکنواختی ذرات به معنای افزایش دامنه اندازه ذرات موجود در بستر رسوبات است. لذا هنگامی که بستر رسوبات از یکنواخت به نایکنواخت تبدیل می‌شود، میزان عمق آبشستگی به طرز قابل ملاحظه‌ای تغییر می‌یابد.

بستر اول و در خواندن دقیقه $142/5$ از گام هشتم جریان ناماندگار در بستر دوم رخ داده است (شکل ۴)، در حالی که در دقیقه 120 ، دبی بیشینه جریان در گام ششم آب‌نگار به پایان رسیده است. همچنین گاهی به دلیل ورود ذرات از بالادست و پیرامون پایه متأثر از گودال آبشستگی در رسوبات یکنواخت و یا ورود ذرات ریز از بالادست پایه به محل گودال آبشستگی در رسوبات نایکنواخت، عمق آبشستگی اندازه‌گیری شده در محل پایه پس از گام با بیشینه عمق آبشستگی کاهش یافته است. همچنین دلیل دیگر را می‌توان در ترسیب دوباره رسوباتی که در گام‌های پیشین از بستر جدا شده اما به دلیل کاهش تنش برشی جریان فرصت خروج از گودال آبشستگی را نیافتند، عنوان کرد.

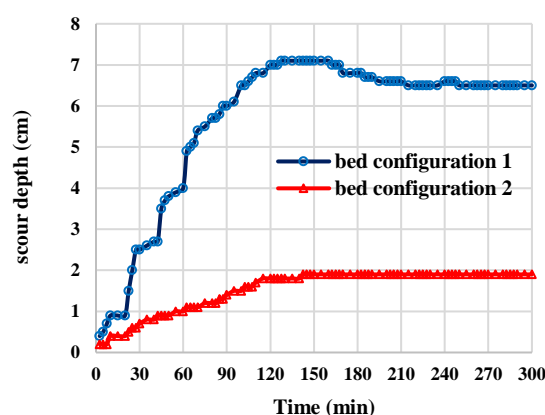


Fig 4. Temporal variation of scour at bed configurations 1 & 2 (similar d_{50} with different σ_g) at unsteady flow
 شکل ۴ منحنی گسترش زمانی آبشستگی در بسترهای اول و دوم (d_{50} مشابه با σ_g متفاوت) در جریان ناماندگار

تأثیر تغییر سرعت در 15 گام آب‌نگار سبب افزایش و یا کاهش شدت تنش برشی شده که به فرسایش و یا رسوب‌گذاری در بستر جریان منجر می‌شود. لذا به‌طور عموم در بازوی بالارونده به دلیل افزایش شدت تنش برشی رسوبات فرسایش یافته و در بازوی پایین‌رونده به مرور زمان کاهش می‌یابد. لازم به یادآوری است که در رسوبات نایکنواخت الگوی آبشستگی بستر جریان گاهی از الگوی پیش‌بینی شده پیروی نمی‌کند و دلیل آن تصادفی بودن حرکت رسوبات می‌باشد. نکته قابل توجه دیگر آن است که میزان عمق بیشینه آبشستگی در حالت تعادل در همه‌ی

افزایش میزان نایکنواختی ذرات بستر، اختلاف بین اندازه ذرات ریز و درشت بستر افزایش یافته و لایه سپر درشت‌تری در بستر مشاهده شده است. به همین دلیل عمق آبشستگی با افزایش σ_g ، کاهش می‌یابد. نکته قابل توجه در آزمایش‌ها، نبود کاهش قابل ملاحظه در عمق آبشستگی با افزایش میزان σ_g از ۲ به ۳ بود، زیرا تغییر قابل توجهی در اندازه لایه سپر دو بستر دوم و سوم ملاحظه نشد.

به عنوان نمونه، نمودار تغییرپذیری‌های زمانی گسترش عمق آبشستگی در آزمایش با دبی ۲۰ لیتر بر ثانیه بستر اول و دوم در شکل ۵ نشان داده شده است. همان‌طور که به روشنی مشخص است عمق آبشستگی در بستر دوم به میزان قابل توجهی در زمان همسان پایین‌تر بوده و زمان لازم برای ثابت شدن بستر و نبود تغییر قابل توجه در سطح رسوبات بستر نیز به دلیل تشکیل سریع لایه سپر بسیار کمتر می‌باشد. لایه سپر گسترش یافته پیرامون پایه در آزمایش با دبی ۲۰ لیتر بر ثانیه در بستر دوم (شکل ۶) سبب کاهش قابل توجه عمق آبشستگی از ۶/۱ به ۱/۸ سانتی‌متر شده است (شکل ۵).

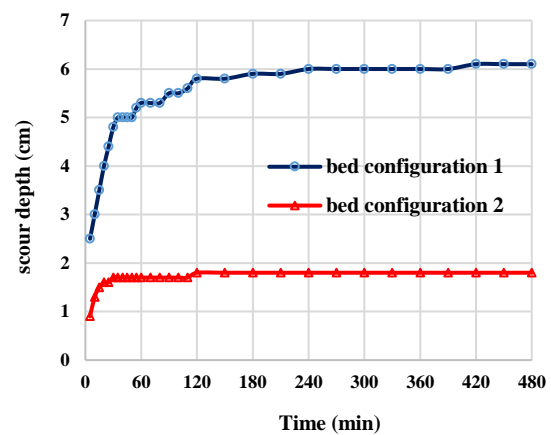


Fig 5. Temporal variation of scour at bed configurations 1 & 2 for flow discharge of 20 L/s (steady state)

شکل ۵ منحنی گسترش زمانی آبشستگی در آزمایش با دبی ۲۰ لیتر بر ثانیه در بسترهای اول و دوم

دلیل این امر، گسترش لایه سپر ناشی از انتقال ذرات ریز از بستر رسوبات می‌باشد. لایه سپر گسترش یافته در بالادست و پیرامون پایه از فرسایش بیشتر رسوبات کاسته و سبب کاهش عمق آبشستگی می‌شود. گسترش لایه سپر تنها در رسوبات نایکنواخت صورت می‌گیرد و در رسوبات یکنواخت لایه سپری شکل نمی‌یابد. لازم به یادآوری است که با

جدول ۲ نتیجه‌های هیدرولیکی مشاهده‌ای و محاسبه‌ای

Table 2 Observed and computed hydraulic results

Transported sediments (Kg)	Scour hole dimension (xxy) (cm)	Time to reach equilibrium state (min)	ds (cm)	Q (l/s)	h/b	h (cm)	Bed configurations	Number of experiments
2.2	32×26	420	6.1	20	2.25	9	Configuration 1	1
4.1	40×30	390	7.2	35	3.5	14	Uniform sediment bed	2
1.4	32×25	250 of 300	6.5	unsteady	-	-	$d_{50}=2$ mm, $\sigma_g=1.4$	3
2.2	22×18	120	1.8	20	2	8	Configuration 2	4
5.3	28×20	330	2.9	35	3.18	12.7	Non-uniform sediment bed	5
3	20×23	142.5 of 300	1.9	unsteady	-	-	$d_{50}=2$ mm, $\sigma_g=2$	6
10.8	28×18	390	3.8	20	2.3	9.2	Configuration 3	7
13.8	34×19	100	4.4	35	3.7	14.8	Non-uniform sediment bed	8
9.4	24×16	165 of 300	4	unsteady	-	-	$d_{50}=1$ mm, $\sigma_g=2$	9
8.9	18×17	300	3.5	20	2.08	8.3	Configuration 4	10
11.1	26×18	270	4.3	35	3.33	13.3	Non-uniform sediment bed	11
8.5	28×17	107.5 of 300	3.7	unsteady	-	-	$d_{50}=1$ mm, $\sigma_g=3$	12
0.01	14×12	240	3.1	20	1.73	6.9	Configuration 5	13
0.02	20×14	150	3.7	35	2.8	11	Uniform sediment bed	14
0.02	16×11	135 of 300	3.2	unsteady	-	-	$d_{50}=3.5$ mm, $\sigma_g=1.4$	15

شدن اندازه ذرات بستر (افزایش b/d_{50}) را در افزایش عمق آبشستگی بیان می‌کند. همچنین در مقایسه بسترهای اول و پنجم نیز می‌توان به این نتیجه رسید که با افزایش میزان اندازه ذرات بستر از ۲ به $۳/۵$ میلی‌متر، میزان عمق آبشستگی کاهش یافت. درصد کاهش میزان عمق آبشستگی در سه آزمایش متناظر این دو بستر به ترتیب ۴۹، ۴۹ و ۵۱ می‌باشد.

۴-۲- بحث

همان‌طور که پیشتر نیز گفته شد، نسبت u/u_c نمایانگر آستانه حرکت ذرات است. برای $u/u_c < 1$ ، شرایط آبشستگی آب زلال برای رسوبات یکنواخت و نایکنواخت صادق است (Melville and Sutherland, 1988). اگر $\sigma_g < 1.4$ باشد، رسوبات به صورت یکنواخت بوده و برای $u/u_c > 1$ ، آبشستگی بستر زنده رخ می‌دهد. در حالی که اگر $\sigma_g > 1.4$ و $u/u_c < u_a/u_c$ باشد، فرآیند سپر شدن بستر در حالت آب زلال رخ می‌دهد. در نهایت هنگامی که $u/u_a > 1$ باشد، هیچ لایه سپری شکل نمی‌گیرد و شرایط آبشستگی به صورت بستر زنده خواهد بود. همچنین در $u/u_c > 4$ ، عمق آبشستگی مستقل از σ_g خواهد بود (Baker, 1986).

همان‌طور که در آزمایش‌های این پژوهش نیز دیده شد، در جریان‌های با سرعت کم در رسوبات نایکنواخت، لایه سپر در آبراهه بالادست شکل گرفته و شرایط همانند به آبشستگی آب زلال تنظیم شده بود. همچنین مشاهده شد که با افزایش سرعت جریان در دبی ۳۵ لیتر بر ثانیه، لایه سپر درشت‌تر شده و عمق آبشستگی نسبت به زمان افزایش می‌یابد. بزرگترین اندازه لایه سپر ممکن برای ذرات رسوبی مشخص در سرعت u_a رخ می‌دهد. بنابراین بیشینه عمق آبشستگی ممکن برای σ_g خاص در سرعت $u = u_a$ رخ می‌دهد. (Melville and Sutherland (1988) در نتایج بررسی‌های خود عنوان کردند که هر اندازه از رسوبات دارای مقدار خاصی از u_c یا u_a هستند و این مقدار وابسته به اندازه ذرات، دانه‌بندی و یا d_{max} آن‌ها است. همان‌طور در این پژوهش نیز مشاهده شد که در بسترهای رسوبی مختلف، هر چقدر d_{max} افزایش یابد (σ_g بیشتر)، لایه سپر درشت‌تر شده و میزان u_a متناظر نیز افزایش خواهد داشت.

مقایسه پستی و بلندی برداشتی پیرامون پایه پل در دو بستر اول و دوم نیز گواه تغییرپذیری‌های بسیار قابل توجه در گودال آبشستگی است. همان‌طور که در شکل ۷-ب مشاهده می‌شود بستر جریان و نیم‌رخ طولی آبشستگی به طرز قابل ملاحظه‌ای دارای پستی و بلندی بوده که به دلیل جابه‌جایی ذرات ریز از محل خود در رسوبات نایکنواخت است. از آنجایی که شرایط جریان در آستانه $u/u_c \sim 0.9$ و برای اندازه متوسط ذرات تنظیم شده است، رسوبات ریزتر در همه‌ی بستر شسته شده و سبب ناهمگونی قابل توجهی در سطح بستر می‌شود. البته لازم به یادآوری است که مقادیر بازه محور z ترسیمی در شکل ۷-ب با محور z در شکل ۷-الف (بستر اول) متفاوت است. بیشترین میزان فرسایش ذرات (عمق بیشینه آبشستگی) و رسوب‌گذاری (تپه موجود در پایین دست پایه) به همراه مختصات نقطه‌های یاد شده در شکل ۷ حک شده است.



شکل ۶ لایه سپر ایجاد شده در پیرامون پایه در بستر دوم
Fig 6. Developed armor layer at the vicinity of sediment bed configuration 2

به منظور بررسی اثرگذاری‌های اندازه متوسط ذرات بستر (b/d_{50}) با شرط ثابت بودن انحراف معیار هندسی ذرات، آزمایش‌های بستر دوم و سوم ($\sigma_g = 2$) و بسترهای اول و پنجم ($\sigma_g = 1.4$) را می‌توان به صورت جداگانه مقایسه شد. لازم به یادآوری است که هر دو بستر دوم و سوم، بسترهای رسوبی نایکنواخت بوده و بسترهای اول و پنجم، دارای رسوبات یکنواخت هستند. مقایسه بستر دوم و سوم نشان داد که با تغییر اندازه میانگین ذرات از ۲ به ۱ میلی‌متر، میزان عمق آبشستگی بستر افزایش یافته است. زیرا در شرایط یکسان جریان، ذرات درشت‌تر در سطح بستر فرسایش کمتری می‌یابند. میزان افزایش عمق بیشینه آبشستگی در سه آزمایش متناظر این دو بستر، ۵۳، ۳۴ و ۵۳ درصد می‌باشد که بسیار قابل توجه بوده و اثر کوچک

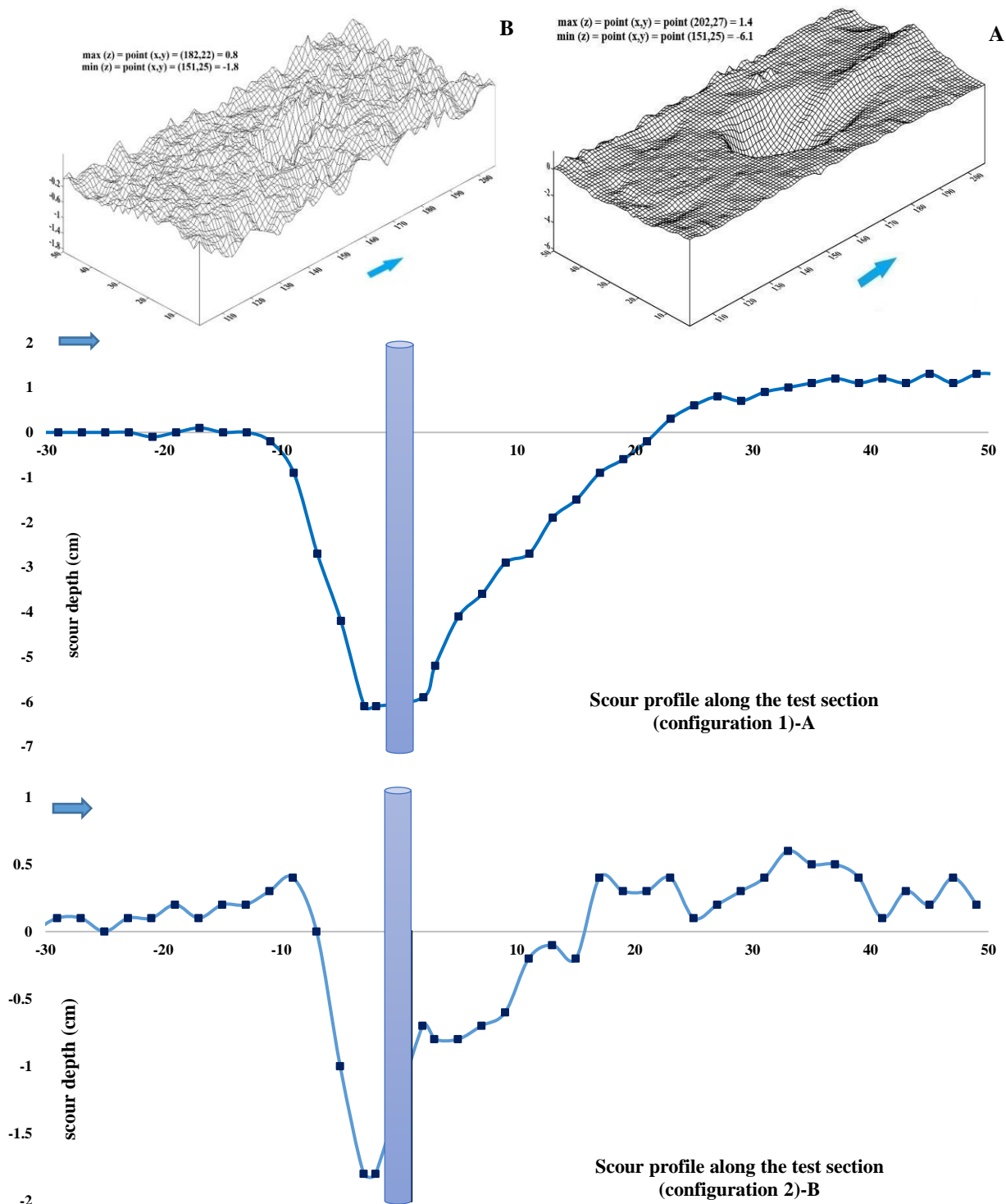


Fig. 7 Topographic map of the selected tests with the same flow discharge of 20 L/s at bed configurations 1(A) & 2(B) شکل ۷ پستی و بلندی سطح بستر در آزمایش‌های منتخب با دبی همسان ۲۰ لیتر بر ثانیه (مشابه h/b) در بسترهای اول (A) و دوم (B)

در رسوبات نایکنواخت و اثرگذاری‌های آن بر عمق آبشستگی به دلیل تشکیل لایه سپر پرداختند. نتایج بررسی‌های این پژوهشگران نشان داد که عمق تعادل آبشستگی به سرعت جریان وابسته بوده و در سرعت‌های

محققان بیشماری چون (Chiew and Melville (1989), Pournazeri Haghighat, Raudkivi and Ettema (1985) and Li (2014) و همچنین در سال‌های اخیر Orrú et al. (2016) با استفاده از پردازش تصویر، به بررسی آبشستگی

نتایج مشاهده‌های این پژوهش همگام با نتایج بررسی‌های Lee and Sturm (2004) و Sheppard et al. (2009) می‌باشد. Ettema (1980) برای آبشستگی موضعی پایه نشان داد که برای نسبت‌های درشتی کوچک، اندازه ذرات منفرد رسوبات به اندازه‌ای بزرگ هستند که از فرسایش و گسترش گودال آبشستگی جلوگیری کنند. نتایج بررسی‌های این محقق نشان داد که با افزایش b/d_{50} تا حدود ۵۰، عمق آبشستگی افزایش می‌یابد. محدوده اندازه ذرات این پژوهش ($b/d_{50} < 50$) نیز نمایانگر اثرات قابل توجه اندازه ذرات بر میزان عمق آبشستگی است. بررسی‌های Sheppard et al. (2004) برای مقادیر بالای نسبت درشتی رسوبات ($b/d_{50} > 50$) نشان از کاهش قابل ملاحظه عمق آبشستگی می‌باشد (Sheppard et al., 2004).

از مهم‌ترین فراسنجه‌های مؤثر در این پژوهش اثرگذاری‌های افزایش عمق جریان (h/b) در قالب افزایش دبی جریان و با ثابت نگه‌داشتن u/u_c می‌باشد. Guo (2012) در نتایج بررسی‌های خود عنوان کرد که با افزایش این نسبت تا محدوده $h/b < 6$ ، عمق آبشستگی در رسوب‌های یکنواخت و نایکنواخت افزایش می‌یابد. در این بررسی، اعماق جریان در این محدوده قرار دارد (جدول ۲) و مشاهده می‌شود که با افزایش این نسبت، عمق آبشستگی نیز افزایش یافته است. دلیل این امر، کاهش اثرگذاری‌های گرداب‌های سطحی بر نیروی گرداب نعل‌اسبی با افزایش عمق جریان است (Melville, 2008). اثرگذاری‌های عمق جریان به عرض پایه نیز در این پژوهش به صورت شکل ۹ می‌باشد.

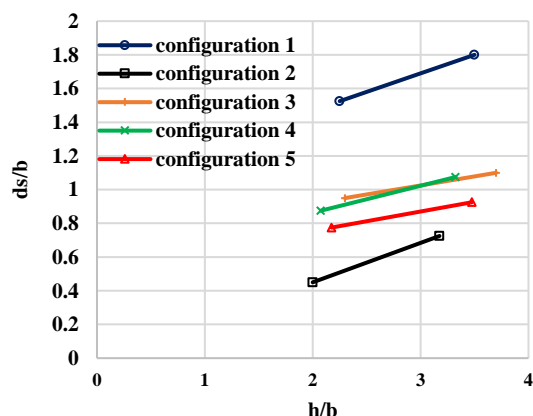


Fig. 9 The effect of flow shallowness on scour depth for uniform and non-uniform sediments

شکل ۹ اثرگذاری عمق جریان بر میزان عمق آبشستگی در رسوبات یکنواخت و نایکنواخت

کم (تنش برشی بستر کم)، میزان آن در بسترهای سپر شده کمتر از میزان همسان در بستر یکنواخت می‌باشد. در حالی که عمق آبشستگی در رسوبات نایکنواخت در هنگام افزایش تنش برشی بستر از میزان آستانه، به دلیل فروپاشی لایه سپر بیشتر خواهد بود.

در بررسی رسوبات نایکنواخت، یکی از فراسنجه‌های اساسی اثرگذاری‌های نسبت درشتی ذرات (نسبت قطر پایه به قطر میانه ذرات، $\frac{b}{d_{50}}$) است. شکل ۸ ارتباط عمق آبشستگی با این نسبت بی بعد را نشان می‌دهد. در این شکل دو بستر رسوبی یکنواخت (بستر اول و پنجم) با نسبت $\frac{b}{d_{50}} = 20$ و $11/48$ و نسبت بی بعد عمق آبشستگی به قطر پایه (ds/b) 0.775 و 1.525 و 0.45 و 0.95 برای رسوبات نایکنواخت دو بستر دوم و سوم (انحراف معیار هندسی یکسان) نسبت‌های $\frac{b}{d_{50}} = 20$ و 40 و نسبت (ds/b) 0.45 و 0.95 برای دبی 20 لیتر بر ثانیه مشخص شده است.

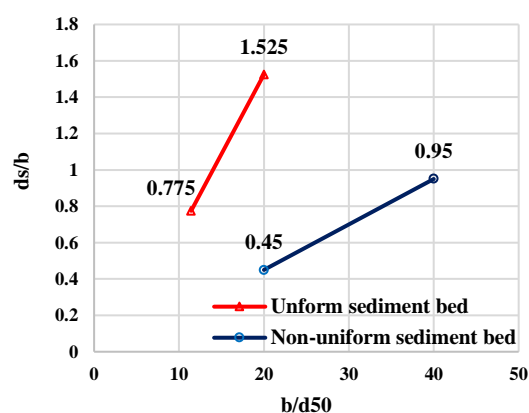


Fig. 8 The effect of sediment coarseness on scour depth for uniform and non-uniform sediments

شکل ۸ اثرگذاری نسبت درشتی رسوبات بر عمق آبشستگی در رسوبات یکنواخت و نایکنواخت

همان‌گونه که در شکل ۸ مشاهده می‌شود، افزایش نسبت درشتی نسبی رسوبات (کاهش میزان قطر ذرات) سبب افزایش میزان عمق آبشستگی خواهد شد و برعکس، کاهش میزان نسبت درشتی نسبی رسوبات (افزایش میزان قطر ذرات) سبب کاهش میزان عمق آبشستگی در رسوبات یکنواخت و نایکنواخت شده است. روند یکسانی در این نسبت بین رسوبات یکنواخت و نایکنواخت دیده می‌شود.

۵- نتیجه گیری

در این پژوهش به بررسی آبشستگی موضعی پایه پل با در نظرگیری برهمکنش جریان و سازه در بسترهای رسوبی مختلف با دامنه اندازه ذرات متفاوت پرداخته شده است. نتایج این پژوهش نشان داد که با افزایش دبی جریان از ۲۰ به ۳۵ لیتر بر ثانیه (افزایش عمق جریان در شرایط همسان u/u_c) عمق آبشستگی به صورت کلی ۲۷ درصد افزایش یافت. نتایج منحنی گسترش زمانی عمق آبشستگی در جریان‌های یکنواخت نشان داد که در حدود ۷۰-۸۰ درصد عمق آبشستگی در ۳۰ دقیقه ابتدایی برقراری جریان رخ داده است. در جریان‌های ناماندگار، عمق بیشینه آبشستگی در گام اوج (پیک) آبنگار (حداکثر دبی جریان) رخ نداده است و به صورت متناوب در گام‌های بعدی مشاهده شده است. این امر نشان از بالاتر بودن نرخ آبشستگی ذرات رسوبی پیرامون پایه به نسبت رسوبات بالادست در گام‌های ابتدایی بازوی پایین‌رونده آبنگار می‌باشد.

تغییر بستر رسوبی جریان از یکنواخت به نایکنواخت سبب کاهش قابل ملاحظه عمق آبشستگی تا بیش از ۶۰ درصد شد. دلیل این موضوع تشکیل لایه سپر در بستر بالادست پایه و در گودال آبشستگی بوده که از حفر بیشتر بستر جلوگیری می‌کند. اگرچه، افزایش میزان انحراف معیار هندسی ذرات در بسترهای رسوبی نایکنواخت نیز سبب کاهش میزان عمق آبشستگی شده است، اما میزان کاهش یاد شده نسبت به تبدیل بستر یکنواخت به نایکنواخت بسیار کمتر می‌باشد.

۶- منابع

- Baker, R. E. (1986). Local scour at bridge piers in non-uniform sediment. thesis presented to the University of Auckland, at Auckland, New Zealand, in partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Engineering, 91p.
- Breusers, H. N. C., Nicollet, G. and Shen, H.W. (1977). Local scour around cylindrical piers. *J. Hyd. Research., IAHR*, 15(3), 211-252.
- Chiew, Y.M. and Melville, B.W. (1989). Local scour at bridge piers with non-uniform sediments. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers*, 87(2), 215-224.
- Dey, S. (2014). *Fluvial hydrodynamics (hydrodynamic and sediment transport phenomena)*. Springer, pp. 508-511.
- Ettema, R. (1980). Scour at bridge piers. Rep. No. 216, Univ. of Auckland, Auckland, New Zealand.
- Ettema, R., Kirkil, G. and Muste, M. (2006). Similitude of large-scale turbulence in experiments on local scour at cylinders. *J. Hyd. Eng., ASCE* 132(1), 33-40.
- Guo, J. (2012). Pier scour in clear water for sediment mixtures. *J. Hyd. Research., IAHR*, 50(1), 18-27.
- Hassan, M.A., Egozi, R. and Parker, G. (2006). Experiments on the effect of hydrograph characteristics on vertical grain sorting in gravel bed rivers. *Water Resour. Res.* 42, W09408, doi:10.1029/2005WR004707.
- Lança, R., Fael, C., Maia, R., Pêgo, J. P. and Cardoso, A. H. (2013). Clear-water scour at pile groups. *J. Hyd. Eng., ASCE*, 139(10), 1089-1098.
- Lee, S. O. and Sturm, T. W. (2009). Effect of sediment size scaling on physical modeling of bridge pier scour. *J. Hyd. Eng., ASCE*, 135(10), 793-802.
- Melville, B. W. (2008). The physics of local scour at bridge piers. In *Fourth International Conference on Scour and Erosion*, pp. 28-38.
- Melville, B.W. (1997). Pier and abutment scour: integrated approach. *J. Hyd. Eng. (ASCE)* 123(2), 125-136.
- Melville, B.W. and Coleman, S.E. (2000). *Bridge scour*. Water Resources Publications, Highland's ranch, Colorado, USA, 550 p.
- Melville, B.W. and Sutherland, A.J. (1988). Design method for local scour at bridge piers. *J. Hyd. Eng., ASCE*, 114(10), 1210-1226.
- Okhravi S. S. and Gohari, S. (2018). Determination of form friction factor of armored gravel-bed rivers. *J. Hydraul.* 13(3), 1-16. (in Persian)
- Oliveto, G. and Hager, W. H. (2002). Temporal evolution of clear-water pier and abutment scour. *J. Hyd. Eng., ASCE*, 128(9), 811-820.
- Orrú, C., Blom, A., Chavarrías, V., Ferrara, V. and Stecca, G. (2016). A new technique for measuring bed surface texture during flow and application to degraded sand-gravel laboratory experiment. *Water Resour. Res.*, 52 (9), 7005-7022.
- Pournazeri, S., Haghghat, H. and Li, S. S. (2014). A bridge pier scour model with non-uniform sediments. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers- Water Management*, 167(9), 499-511.

- Singh, U.K., Ahmad, Z., Kumar, A. and Pandey, M. (2018). Incipient Motion for Gravel Particles in Cohesionless Sediment Mixtures. Iran, J. Sci. Technol. Trans. Civ. Eng., 43(2), 253-262.
- Tabarestani, M. K. and Zarrati, A. R. (2014). Effect of Hydrograph Peak Time on Local Scour around Bridge Pier., J. Hydraul. 9(3), 15-32. (in Persian)
- Tabarestani, M. K. and Zarrati, A. R. (2017). Local scour calculation around bridge pier during flood event. KSCE J. Civ. Eng., 21(4), 1462-1472.
- Wu, P., Hirshfield, F. and Sui, J. (2015). Armor layer analysis of local scour around bridge abutments under ice cover. River Res. Appl., 31(6), 736-746.
- Yager, E., Kenworthy, M. and Monsalve, A. (2015). Taking the river inside: Fundamental advances from laboratory experiments in measuring and understanding bed load transport processes. Geomorphology, 244, 21-32.
- Raudkivi, A.J. and Ettema, R. (1985). Clear-water scour at cylindrical piers. J. Hyd. Eng., ASCE, 109(3), 338-350.
- Raudkivi, A.J. and Sutherland, A.J. (1981). Scour at bridge crossings. Report No. 51, Road Research Unit, National Roads Board, Wellington, New Zealand.
- Richardson, E.V., Harrison, L.J., Richardson, J.R. and Davis, S.R. (1993). Evaluating scour at bridges. Publication number FHWA-IP-90-017, Federal Highway Administration, US Department of Transportation, Washington DC.
- Sheppard, D. M, Demir, H. and Melville, B. W. (2011). Scour at wide piers and long skewed piers (Vol. 682). Transportation Research Board, Washington, DC.
- Sheppard, D. M., Odeh, M. and Glasser, T. (2004). Large scale clear-water local pier scour experiments. J. Hyd. Eng., ASCE, 130(10), 957-963.