

## Research Article

# Experimental Investigation Effect of Geometric Parameters and Hydrograph Shape of a Single Unsubmerged Spur Dike on the Temporal Development of Scouring Around the Structure Under Unsteady Flow

R Farshad<sup>1\*</sup>, S M Kashefipour<sup>1</sup>, M Ghomeshi<sup>1</sup>

Received: September 10, 2022

Accepted: December 4, 2022

Revised: November 27, 2022

Published online: December 22, 2023

1-Ph.D. student, Department of Hydraulic Structures, Faculty of Water and Environmental Engineering, Shahid Chamran University of Ahvaz

2- Prof., Dept. of Hydraulic Structures, Faculty of Water and Environmental Engineering, Shahid Chamran University of Ahvaz

\*Corresponding Author, Email: Farshadreza@gmail.com

## Abstract

### Background and Objectives

A spur dike is one of the structures that play a fundamental role in reducing the shear force on the river bank. The confrontation between this structure and the water flow causes strong eddies in both horizontal and vertical directions around the spur dike, which is the main cause of the scouring phenomenon around the spur dike structure and a result of its failure. Determining the depth of flooding is important because it is an indicator of the amount of flow destruction potential around the structure and is also an important parameter in the design of the foundation dimensions of the structures along the flow path. The findings of steady flow tests, in which the quantity of flow rate is equal to the peak flow rate of the flood hydrograph, are used to establish the maximum scour depth in the design of spur dikes (with a specified return period). The flow characteristics, and therefore the factors causing the scour, change with time in flood waves, and the scour depth after the hydrograph is less than the comparable peak flow rate's equilibrium scour depth (link et al. 2017). The results demonstrated that because the non-steady flow and flow conditions vary in nature during floods, the temporal variations of scouring dimensions around structures under unsteady flow would be fundamentally different from those under steady flow. However, because no study has been performed on scouring around the spur dike under unsteady flow, there is no definite and recorded information in this field, and the magnitude of flood currents in nature makes the need for research in this sector even more pressing. Enhancing our understanding of scouring conditions and their temporal variations over time in the hydrograph will help us build better hydraulic structures.

### Methodology

Experiments were carried out at the Hydraulic Laboratory of the Shahid Chamran University of Ahvaz (Iran) in a flume 10 m long, 0.74 m wide, and 0.60 m deep. In the present study, a single unsubmerged spur dike was considered for three percent permeability of 0% (i.e., impermeable spur dike), 33%, and 66%. Moreover, three spur dike alignment angles  $\theta$  equal to 60° (repelling alignment), 90° (deflecting alignment), and 120° (attractive alignment) were considered.  $\theta$  is the angle between the spur dike and the upstream wall. Totally, 27 experiments were performed in the flow rate range of 15 to 50 LS<sup>-1</sup>.

### Findings

The experiments were designed to examine the impact of widely accepted geometric parameters of the spur dike (as an important and general structure used in river engineering projects to preserve river walls or other important structures such as bridges), such as its permeability (closed and open spur dike) and placement angle relative to the wall in time changes, as well as the maximum scouring depth around the spur dike in unsteady



flow conditions. Furthermore, the influence of the shape of the hydrograph as a variable on the scouring process was explored. The comparison of scour depth variations between various scouring angles shows that the scour depth changes at different angles are nearly identical, and the distinction between scour depth changes in the test angles is small, indicating that the angle has little impact on scour depth changes. The spur dike permeability parameter plays an essential role in the maximum scour depth surrounding the spur dike and its value drops dramatically as permeability rises. Scouring in this area is caused by horseshoe vortex and rising in the spur dike nose. The movement of water through the open spur dike rods minimizes or reduces the intensity of vortices that occur behind the spur dike and near the nose. The process of scouring depth changes caused by all skewed and normal hydrographs has many differences. Since hydrographs skewed to the left (hydrograph with a ratio of peak time to hydrograph continuation time of 0.33) the time of the ascending branch is shorter and the discharge reaches its maximum value quickly, so the slope of the graph of the scour depth changes over time. It is very intense at first and then become insignificant. In hydrographs with a skew to the right (hydrograph with a ratio of peak time to hydrograph continuation time of 0.66), scour depth changes occur in more time.

### **Conclusion**

By comparing the scour depth changes between different angles of the impervious spur dike, it shows that the scour depth changes are the highest at 90 degrees and the lowest at 120 degrees. While in spur dike with the permeability of 33% and 66%, the most changes in scouring depth occur at an angle of 60 degrees. The highest percentage of changes in the maximum scour depth compared to the scour depth in the peak hydrograph is related to the hydrograph with the ratio of the peak time to the duration time of the hydrograph 0.5 (normal distribution). The temporal development of scour depth in all three angles of 90, 60, and 120 degrees and all three hydrographs with the ratio of peak time to hydrograph continuation time is 0.33, 0.5, and 0.66, which is such that with the increase in the permeability of the scour, the scour depth It decreases significantly. Compared to the impermeable spur dike, in the spur dike with permeability of 33% and 66%, the reduction of 48% and 88% in scour depth were observed, respectively. The process of scouring depth changes caused by all skewed and normal hydrographs has many differences.

**Keywords:** Spur dike scour, Spur dike angle, Spur dike permeability, Skewness, Time changes

## مقاله پژوهشی

# بررسی آزمایشگاهی تاثیر پارامترهای هندسی آبشکن منفرد غیر مستغرق و شکل هیدروگراف بر روی توسعه زمانی آبشستگی اطراف آن در جریان غیر ماندگار

رضا فرشاد<sup>۱\*</sup>، سید محمود کاشفی پور<sup>۲</sup>، مهدی قمشی<sup>۲</sup>

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۶/۱۹

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۹/۱۳

تاریخ ویرایش: ۱۴۰۱/۰۹/۰۶

تاریخ انتشار آنلاین: ۱۴۰۲/۱۰/۰۱

۱- دانشجوی دکتری گروه سازه‌های آبی، دانشکده مهندسی آب و محیط زیست، دانشگاه شهید چمران اهواز

۲- استاد گروه سازه‌های آبی، دانشکده مهندسی آب و محیط زیست، دانشگاه شهید چمران اهواز

\*مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: Farshadreza@gmail.com

## چکیده

آبشکنها از جمله سازه‌های مهم ساماندهی رودخانه محسوب می‌شوند که به منظور انحراف جریان و حفاظت سواحل رودخانه‌ها به طور گسترده در سراسر جهان مورد استفاده قرار می‌گیرند. با این حال، آبشستگی در اطراف آبشکنها می‌تواند یک مشکل اساسی باشد که بر پایداری و عملکرد هیدرولیکی آنها تأثیر می‌گذارد. تعیین عمق آبشستگی به علت اینکه معرف میزان پتانسیل تخریب جریان در اطراف سازه بوده و همچنین پارامتری مهم در طراحی ابعاد فونداسیون سازه‌های مسیر جریان می‌باشد مهم است. در این مطالعه آزمایشاتی تحت هیدروگرافهایی با سه نسبت زمان پیک به زمان تداوم ۰/۳۳، ۰/۵ و ۰/۶۶، جهت بررسی تاثیر پارامترهای هندسی نفوذپذیری و زاویه استقرار آبشکن روی توسعه زمانی آبشستگی در جریان غیرماندگار صورت پذیرفت. در بررسی اثر زاویه آبشکن مشاهده گردید که به طور کلی زاویه استقرار آبشکن تأثیر قابل ملاحظه‌ای روی روند آبشستگی و مقدار بیشینه آن ندارد. همچنین نتایج نشان می‌دهد با افزایش میزان نفوذپذیری آبشکن، عمق آبشستگی به میزان قابل ملاحظه‌ای کاهش می‌یابد. از دیگر نتایج می‌توان به تاثیر زیاد شاخه صعودی و اثر کم شاخه نزولی هیدروگراف در تغییرات عمق آبشستگی و یکسان بودن تقریبی میزان حداکثر عمق آبشستگی ناشی از عبور هیدروگراف دارای چولگی راست و چپ و هیدروگراف با توزیع گوسی یا نرمال اشاره کرد.

واژه‌های کلیدی: آبشستگی آبشکن، تغییرات زمانی، چولگی، زاویه آبشکن، نفوذپذیری آبشکن،

## مقدمه

و تثبیت و حفاظت دیواره‌ها در راستای جدید، حفاظت موضعی رودخانه در برابر تخریب سازه‌های آبی، پلها (بخصوص تکیه گاههای پل) و دیگر خطوط حیاتی تقاطعی (آب، برق، نفت و گاز) از طریق بهسازی راستای بازه و انحراف جریان از نواحی بحرانی می‌باشد. لذا تحقیقات داخلی و خارجی متعددی (تحت جریان ماندگار) در خصوص زاویه قرارگیری آبشکن در مسیر مستقیم صورت گرفته است. از جمله این تحقیقات می‌توان به تحقیق اهدایی و کاشفی‌پور (۲۰۱۵) (اثر زاویه و نفوذپذیری تک آبشکن بر روی ابعاد چاله آبشستگی در شرایط غیر مستغرق) اشاره نمود که به بررسی زاویه قرارگیری آبشکن در مسیر مستقیم پرداخته است.

آبشکن‌ها به دو شکل نفوذپذیر و غیر قابل نفوذ در پروژه‌های مهندسی رودخانه به کار گرفته می‌شوند. علی‌رغم پژوهش‌های زیادی که در مورد آبشکن‌های نفوذناپذیر انجام شده، در مورد آبشکن‌های نفوذپذیر پژوهش زیادی انجام نشده است. از جمله پژوهش‌های انجام شده می‌توان به کار انجام شده توسط یانگتائو و همکاران (۲۰۱۳) اشاره نمود ایشان طراحی و کاربرد آبشکن‌های نفوذپذیر را با جمع‌آوری و دسته‌بندی پژوهش‌های انجام شده در این زمینه منتشر نمودند. برای آبشکن‌های نفوذپذیر، جریان تا حدی در سازه نفوذ می‌کند که منجر به کاهش قابل توجه سرعت، قدرت گرداب و نیروی برشی در دماغه آبشکن می‌شود (لی و همکاران ۲۰۰۵). و از این رو کاهش قابل ملاحظه‌ای از حداکثر عمق آبشستگی در دماغه آبشکن مشاهده می‌شود (فکوکا و همکاران ۲۰۰۰).

ازیامان و همکاران (۲۰۲۲) بر روی اثر پارامترهای مختلف مانند دانه بندی رسوب، عمق جریان، زاویه استقرار و طول آبشکن بر روی آبشستگی اطراف تک آبشکن در یک فلوم مستقیم تحت جریان ماندگار

فرآیندهای آبشستگی و فرسایش در سطوح بستر و سواحل رودخانه‌های طبیعی و همچنین آبراهه‌های ساخته شده (به عنوان مثال کانال‌های آبیاری یا ناوبری)، چالش‌های مهمی هستند که برای مدیریت مناسب منابع آب باید به طور موثر با آن‌ها مقابله شود. اثر متقابل جریان با رسوب در یک رودخانه ممکن است باعث فرآیندهای تجمع و تخریب بستر شود که در مهندسی کنترل رودخانه ضروری است. فرآیندهای آبشستگی در بستر جریان عامل اصلی تغییرات ژئومورفیک است که منجر به از دست دادن زمین، انتقال بیش از حد رسوبات و سپس کاهش کیفیت آب می‌شود (پاندی و همکاران ۲۰۲۱). از جمله روش‌های متداول و اقتصادی برای حفاظت غیرمستقیم دیواره رودخانه‌ها، آبشکن‌ها می‌باشند. آبشکن‌ها بر خطوط جریان تاثیر گذاشته و موجب انحراف آن‌ها از دیواره‌های فرسایش پذیر به میانه رودخانه می‌شوند و با کاهش سرعت، از شدت برخورد جریان با دیواره کاسته و توانایی رسوبگذاری جریان را افزایش می‌دهند (کوپلاند ۱۹۸۳). احداث سازه‌هایی نظیر آبشکن در مسیر جریان باعث ایجاد جریان آشفته‌ی چرخشی و گردابی در اطراف آن خواهد شد. این جریان‌های گردابی به همراه تمرکز شدید سرعت‌ها و آشفته‌گی در دماغه بالادست، مکانیزم اصلی آبشستگی موضعی به حساب می‌آیند. ترکیب این عوامل منجر به برداشته شدن مواد بستر از حوالی تکیه‌گاه و توسعه یک حفره آبشستگی شده که در درازمدت باعث ایجاد حفره‌های بزرگ در محل دماغه آبشکن شده و احتمال شکست سازه را به دنبال خواهد داشت (شفاعی بجمستان ۲۰۱۴).

از جمله اهداف احداث سازه‌های آبشکن هدایت خط القعر جریان در جهت مناسب، اصلاح مسیر رودخانه به منظور کنترل سیلاب و یا کاهش خطر پیشروی رودخانه به اراضی ساحلی و فرسایش و تخریب دیواره‌ها و تاسیسات جانبی از طریق کاهش یا تنظیم عرض رودخانه

پرداختند. آنها در این تحقیق سه زاویه استقرار آبشکن ۴۵، ۹۰ و ۱۳۵ درجه را مورد بررسی قرار دادند و نتایجشان نشان داد که زاویه استقرار آبشکن تاثیر قابل توجهی بر عمق آبشستگی ندارد و حداکثر عمق آبشستگی در زاویه ۹۰ درجه رخ می‌دهد.

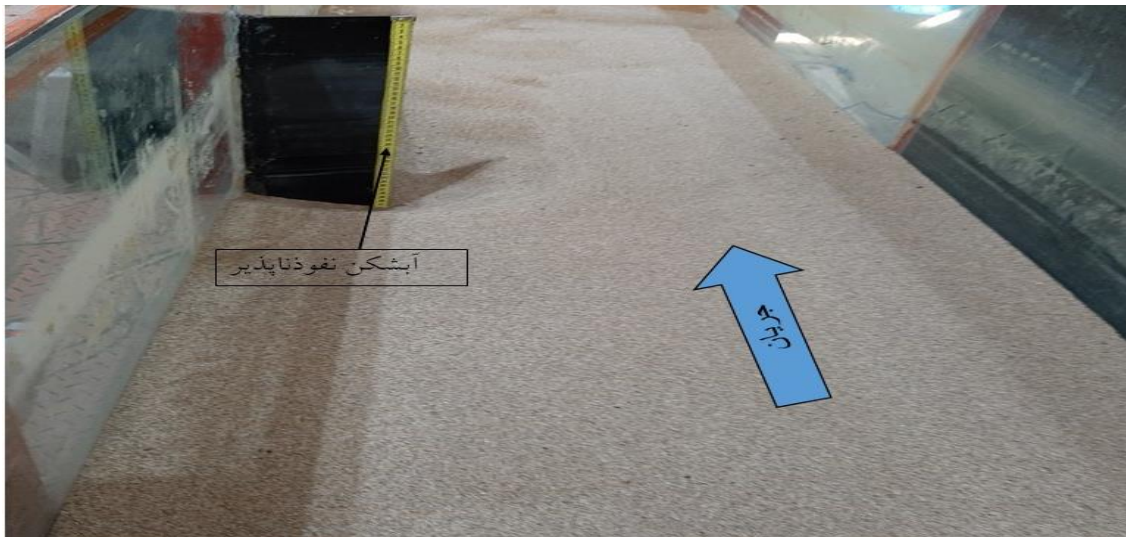
معمولا در بررسی‌های آبشستگی اطراف سازه‌های آبی از جمله آبشکن‌ها، شرایط را آب زلال فرض می‌نمایند جایی که در آن هیچ انتقال رسوب بوسیله جریان نزدیک-شونده از بالادست به مناطق مستعد آبشستگی در اطراف آبشکن وارد نشود. به عبارت دیگر در جریان با شرایط آب زلال سرعت متوسط جریان از سرعت بحرانی آستانه حرکت رسوبات در بالادست کمتر است و اصطلاحا گفته می‌شود آبشستگی تحت بستر زنده نیست که در آن رسوبات توسط جریان نزدیک‌شونده به عنوان بار بستر و یا بار معلق می‌توانند به چاله آبشستگی منتقل گردند (پاندی و همکاران ۲۰۱۵).

برای تعیین بیشینه عمق آبشستگی در طراحی آبشکن‌ها، از نتایج آزمایش‌ها تحت جریان دائمی استفاده می‌شود که در این آزمایش‌ها مقدار دبی، برابر با دبی پیک هیدروگراف سیلاب (با دوره بازگشت مشخص) در نظر گرفته می‌شود. این در حالی است که در امواج سیل ویژگی‌های جریان و در نتیجه پارامترهای موثر بر آبشستگی در طول زمان تغییر می‌کند و عمق آبشستگی پس از هیدروگراف کمتر از عمق آبشستگی تعادلی مرتبط با دبی اوج مربوطه است (لینک ۲۰۱۷). بیشتر مطالعات در زمینه آبشستگی تحت جریان غیردائمی، حول پایه‌های پل است. در بیشتر مطالعات انجام شده برای تخمین آبشستگی حول پایه‌های پل تحت جریان دائمی، عمق آبشستگی تعادلی به عنوان بیشینه عمق آبشستگی در نظر گرفته می‌شود. طبق مطالعه رودکیوی (۱۹۸۶)، مدت زمان لازم برای آزمایش جهت به تعادل رسیدن عمق آبشستگی ۵۰ ساعت است که مدت زمان متناظر آن برای یک سیلاب واقعی در طبیعت به عنوان یک نمونه واقعی،

ممکن است فراتر از حد معقول باشد. چرا که در بیشتر رودخانه‌ها، به استثناء رودخانه‌های بزرگ، مدت زمان تداوم برای پیک سیلاب بسیار کوتاه‌تر است. پس در رودخانه‌های معمولی به دلیل اینکه مدت زمان سیلاب برای رسیدن عمق آبشستگی به حالت تعادل کافی نیست، مقدار عمق آبشستگی ممکن است کمتر از عمق تعادلی آبشستگی باشد (پینتر و همکاران ۲۰۱۰، شمپا و همکاران ۲۰۲۰ و گو و همکاران ۲۰۲۰). بنابراین استفاده از دبی پیک سیلاب تحت جریان دائمی با زمان آزمایش طولانی، منجر به عمق آبشستگی تعادلی می‌شود که همخوانی مناسبی با شرایط جریان غیردائمی نداشته و استفاده از دبی پیک سیلاب در طراحی ممکن است عمق آبشستگی را به میزان قابل توجهی دست بالا تخمین زند (چانگ و همکاران ۲۰۰۴ و الیوتو و هگر ۲۰۰۵). و در مطالعه‌ای دیگر ملویل و چیو (۱۹۹۹) دریافتند که ۵۰ تا ۸۰ درصد از بیشینه عمق آبشستگی نهایی در اطراف سازه -آبی در ۱۰٪ ابتدایی مدت زمان تعادل اتفاق می‌افتد. برای نمونه اگر یک سیلاب به مدت ۱۰٪ زمان تعادل بطول بیانجامد، عمق آبشستگی ناشی از سیلاب ۵۰٪ - کمتر از عمق آبشستگی تعادلی بدست می‌آید. بنابراین برای تعیین عمق آبشستگی متناظر با دبی پیک، بررسی زمان پیک و استفاده از هیدروگراف سیلاب به جای جریان دائمی ضروری بنظر می‌رسد (لو و همکاران ۲۰۱۱). یزدانی و همکاران (۲۰۲۱) آبشستگی تکیه گاه مستطیلی واقع در کانال مرکب تحت جریان غیرماندگار با هیدروگرافهای پله‌ای و مثلثی مورد بررسی قرار دادند. آنها نتیجه گرفتند که با تغییر در زمان وقوع دبی اوج، مقدار آبشستگی نهایی تغییر نمی‌کند اما توسعه زمانی آبشستگی متفاوت است. همچنین در مقایسه نتایج حاصل از اندازه گیری عمق آبشستگی در هیدروگرافهای مثلثی و پله ای مشخص گردید، اختلاف ناچیزی بین مقادیر نهایی آبشستگی در هیدروگرافهای پله ای و مثلثی وجود دارد.

دیواره‌های فلوم از شیشه بوده و دارای مخازن ورودی و خروجی و قسمتی برای آرام کردن جریان است. عمق جریان با استفاده از دریچه انتهایی تنظیم می‌شود. به منظور جلوگیری از آبشستگی ناخواسته جریان ورقه ای ناشی از عمق کم جریان، فلوم در ابتدا با نرخ کم پر شد. شیب فلوم و هندسه کانال نزدیک‌شونده نیز ثابت می‌باشد. آزمایشات در یک بستر رسوبی و در فاصله ۴ متر از تانک ورودی به فلوم انجام شد. رسوبات مورد استفاده از جنس ماسه با چگالی نسبی ۲/۶۵ و اندازه متوسط ذرات یعنی  $d_{50}$  معادل ۰/۸ میلیمتر بود. جهت حذف تأثیر غیر یکنواختی رسوبات بر آبشستگی، انحراف معیار هندسی ذرات باید کمتر از ۱/۴ باشد ریکار (۲۰۰۵). منحنی توزیع دانه‌بندی رسوب تهیه و بر اساس آن انحراف معیار هندسی معادل  $\sigma_g = \sqrt{\frac{d_{84}}{d_{16}}} = 1.22$  محاسبه گردید که در آن  $d_{84}$  و  $d_{16}$  به ترتیب اندازه ذراتی است که ۸۴ درصد و ۱۶ درصد کل ذرات از آنها کوچکتر

طبق یافته‌های اخیر می‌توان دریافت، با توجه به اینکه در طبیعت در زمان سیل جریان غیردائمی و شرایط جریان متفاوت است پس تغییرات زمانی ابعاد آبشستگی حول سازه‌ها تحت جریان غیردائمی، کاملاً متفاوت با جریان دائمی خواهد بود ولی از آنجا که تاکنون در زمینه آبشستگی اطراف آبشکن تحت جریان غیردائمی پژوهشی گسترده و جامع انجام نشده است بنابراین اطلاعات روشن و مستندی در این زمینه در دست نیست و گستردگی جریان‌های سیلابی در طبیعت نیاز به پژوهش در این زمینه را بیش از پیش ضروری می‌سازد. افزایش دانش ما از شرایط آبشستگی و تغییرات زمانی آن در طول زمانی هیدروگراف می‌تواند کمک موثری در طراحی مناسب سازه‌های هیدرولیکی باشد. پس در این پژوهش سعی می‌شود آبشستگی حول آبشکن تحت جریان غیردائمی بررسی شود و اثر برخی از پارامترهای هندسی مانند زاویه و نفوذپذیری آبشکن و پارامترهای



می‌باشند.

در این آزمایش‌ها سه درصد نفوذپذیری شامل صفر (آبشکن بسته)، ۳۳ درصد و ۶۶ درصد و سه زاویه قرارگیری نسبت به بالادست جریان ۶۰ درجه (دافع)، ۹۰ درجه (قائم) و ۱۲۰ درجه (جاذب) برای تک آبشکن غیرمستغرق در نظر گرفته شد. برای آبشکن با صفر درصد نفوذپذیری از صفحات پلکسی گلاس با ارتفاع ۵۰

هیدرولیکی، مانند شکل هیدروگراف (چولگی) بر میزان آبشستگی تحت جریان غیردائمی مورد ارزیابی قرار می‌گیرد.

#### مواد و روش‌ها

آزمایش‌ها این تحقیق در فلوم آزمایشگاهی به طول ۱۰ متر و عرض ۰/۷۴ متر و عمق ۰/۶ متر در آزمایشگاه هیدرولیک دانشگاه شهید چمران اهواز انجام گرفت. جنس

نسبت به دیواره فلوم، محاسبه شده و در کلیه شرایط، معادل ۲۰ درصد عرض فلوم در نظر گرفته شد. در شکل ۱ نمایی از فلوم و آبشکن نفوذناپذیر نشان داده شده است.

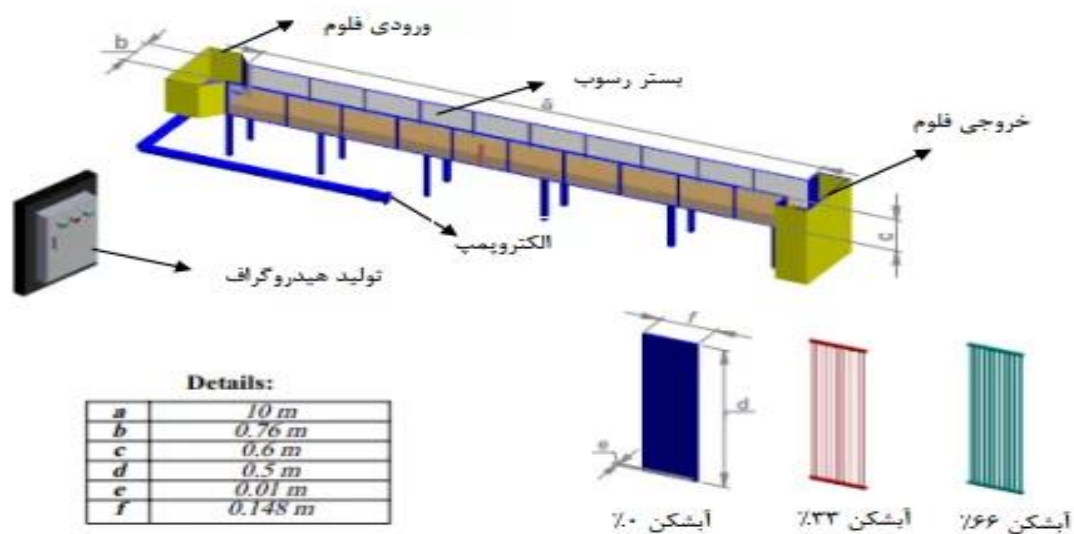
#### شکل ۱- نمایی از فلوم و آبشکن نفوذناپذیر.

سپس پمپ روشن شده و آب با دبی خیلی ناچیز در حد چند لیتر بر ثانیه در فلوم جاری می‌شد تا بستر به آرامی اشباع شود. بعد از بالا آمدن آب در فلوم، به آرامی با تغییر در ارتفاع دریچه آب به عمق اولیه جریان به‌ازای دبی پایه هیدروگراف رسید و پمپ با توجه به نوع آزمایش شروع به کار می‌کرد. با شروع هر آزمایش عبور هیدروگراف فیلمبرداری و عکاسی از آزمایش بوسیله دوربین مخصوص زیر آب مدل (Digital Borescope QO8 mm-3m Model) صورت می‌گرفت و به کامپیوتر منتقل می‌گردید. سپس با استفاده از تصاویر گرفته شده عمق آبشستگی برای هر زمان دلخواه و مناسب، بوسیله نرم افزار GetData Graph Digitizer اندازه گیری می‌شد. بعد از انجام آزمایش نیز برداشت مختصات توپوگرافی بستر توسط دستگاه Bed Profiler با دقت ۰/۱ میلی متر صورت می‌پذیرفت که این دستگاه دارای یک ریل متحرک برای حرکت لیزر عمق‌سنج خود در طی عرض فلوم می‌باشد که فرمان حرکت آن توسط کاربر از طریق نرم‌افزار واسط به دستگاه داده می‌شود و حرکت طولی دستگاه نیز توسط کاربر به صورت دستی صورت می‌گیرد. در نهایت، داده‌های جمع‌آوری شده (مقادیر x، y و z) در یک فایل اکسل به رایانه پشتیبان منتقل می‌شدند. در شکل ۲ نمای شماتیک فلوم آزمایشگاهی و ابعاد آبشکن‌های مورد استفاده آورده شده است.

و ضخامت ۱ سانتیمتر استفاده شد. برای ساخت آبشکن نفوذپذیر از میله‌های برنجی به ارتفاع ۵۰ سانتیمتر و قطر ۴ میلیمتر، که در دو صفحه پلکسی در بالا و پایین تثبیت شده بودند، بهره گرفته شد. همچنین طول مؤثر آبشکن در شرایط عمودی، جاذب و دافع، با توجه به زاویه نصب

دستگاه تولید جریان غیرماندگار از ۶ قسمت اصلی شامل نرم افزار مبتنی بر رایانه، مدار کنترلر و واسط نرم افزار و اینورتر، اینورتر، پمپ و الکتروموتور، دبی‌سنج الکترومغناطیس و فلوم آزمایشگاهی تشکیل شده است. این دستگاه قابلیت تولید هیدروگراف‌هایی با زمان‌های تداوم و پیک و دبی‌های دلخواه با دقت تغییر ۰/۱ لیتر بر ثانیه را دارد. سیستم ایجاد جریان غیرماندگار یا تولید هیدروگراف به این صورت عمل می‌نمود که ابتدا تمام اطلاعات مربوط به رابطه دبی و زمان به بخش نرم افزار کامپیوتر داده می‌شود. با اجرای برنامه دستور صادر شده از نرم افزار به کمک سیستم‌های واسط به اینورتر منتقل و سپس دستور تنظیم دور موتور پمپ متناسب با دبی فراخوان شده از رایانه به سیستم اعمال و دبی تعریف شده توسط سیستم اعمال می‌گردد. لازم به توضیح است که این سیستم در ابتدای ساخت به طور کامل و دقیق واسنجی شده است. علاوه بر آن این امکان وجود داشت تا هم زمان دبی جریان به کمک یک دبی‌سنج الکترومغناطیس مدل MegAb 3000 با دقت  $\pm 0.25$  اندازه گیری شود و بدین ترتیب سیستم قادر به درستی آزمایشی دبی مدنظر در هر لحظه است.

در ابتدای آزمایش پس از تسطیح بستر، ابتدا دریچه انتهایی فلوم تا عمقی بیشتر از عمق مدنظر بسته می‌شد



شکل ۲- نمایی از فلوم آزمایشگاهی و جزئیات آبشکن های مورد استفاده.

شد. از طرفی به ازای دبی‌های کمتر از ۱۵ لیتر بر ثانیه و عمق جریان ۱۳/۷ سانتیمتر و عدد فرود ۰/۱۲ هیچگونه آبشستگی موضعی حول آبشکن رخ نمی‌داد پس هیدروگراف‌ها از دبی پایه ۱۵ لیتر بر ثانیه شروع شد. زمان تداوم هیدروگراف یکی از مشخصه‌های تأثیرگذار بر پدیده آبشستگی اطراف پایه پل و کوله و آبشکن می‌باشد. در شرایط رودخانه‌های طبیعی این زمان می‌تواند طولانی، چند ساعت تا چندین روز برای رودخانه‌های دائمی (برای مثال رودخانه کارون خوزستان) باشد (سلامتیان، ۱۳۹۲). از طرفی قابل پیش‌بینی است که با افزایش هر چه بیشتر زمان تداوم، عمق نهایی آبشستگی همچنان افزایش می‌یابد.

برای محاسبه تقریبی زمان پیک و تداوم هیدروگراف‌های تولید شده در آزمایشگاه، با توجه به محدودیت‌ها و امکانات آزمایشگاهی، تجربه محققین دیگر (باباخانی و همکاران ۱۳۹۷، ابوالفتحی و همکاران ۲۰۲۱، خواجوی و همکاران ۲۰۲۱) و قابلیت‌های موجود در سیستم تولید هیدروگراف و برداشت و ذخیره فیلم، زمان پایه مورد استفاده ۶۰ دقیقه در نظر گرفته شد.

برداشت نقاط جهت تهیه هیدروگراف با توزیع نرمال در زمان‌های ۰، ۲۵، ۵۰، ۷۵ و ۱۰۰ درصد زمان کل

آزمایش‌های مربوط به این پژوهش در حالت جریان غیرماندگار انجام گرفت. عمق و دبی جریان در آزمایش‌های انجام یافته به شکلی انتخاب شدند که شرایط آب زلال برقرار باشد. بدین منظور سرعت جریان در شرایط پیک جریان غیرماندگار به میزان ۹۵ درصد سرعت برشی بحرانی یا سرعت برشی در شرایط آستانه حرکت رسوبات ( $U_{*c}$ ) محدود شد. برای برآورد سرعت بحرانی یا سرعت آستانه حرکت رسوبات ( $U_c$ ) از رابطه زیراستفاده گردید (سوی و همکاران ۲۰۱۰).

$$\frac{U_c}{U_{*c}} = 5.75 \text{Log} \left( \frac{h}{2d_{50}} \right) + 6 \quad [1]$$

در این رابطه  $h$  عمق جریان نزدیک شونده بر حسب متر و  $d_{50}$  قطر متوسط رسوبات بر حسب متر است.

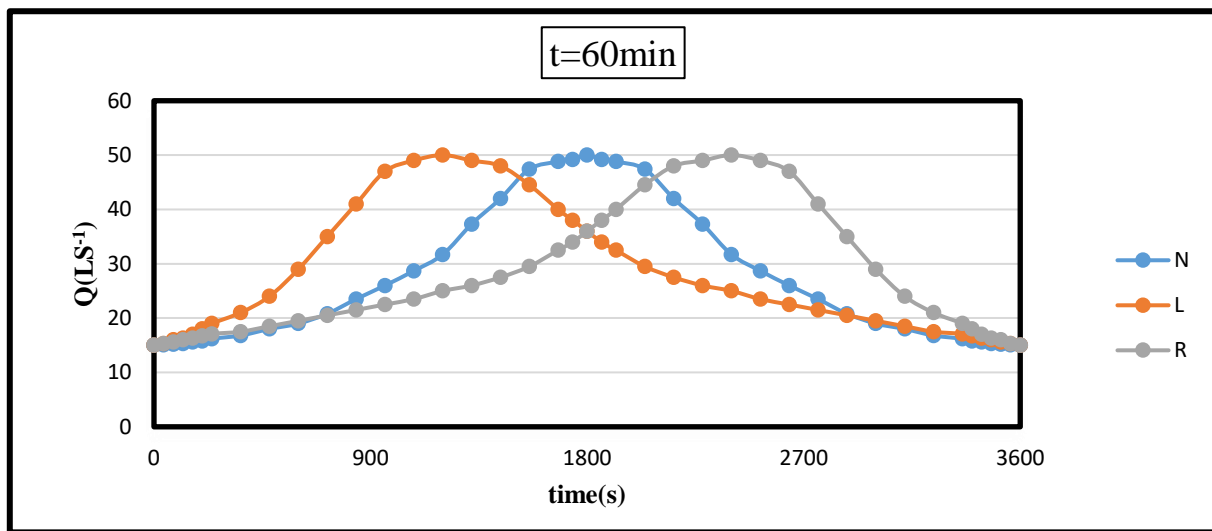
طبق رابطه ۱ و شرایط موجود در آزمایشگاه و با توجه به مقادیر عمق جریان و ارتفاع دریچه پائین دست و قطر ذرات، چنانچه دبی هیدروگراف به ۵۰ لیتر بر ثانیه و عمق جریان به ۲۰/۲ سانتیمتر با عدد فرود ۰/۲۴ برسد آستانه حرکت ذرات اتفاق می‌افتد. پس برای اینکه شرایط آزمایش در محدوده آب زلال باقی بماند ماکزیمم دبی پیک برای هیدروگراف‌ها ۵۰ لیتر بر ثانیه در نظر گرفته



دقیقه بررسی گردید. در شکل ۳ هیدروگرافها نشان داده شده و در جدول ۱ شرایط هندسی و هیدرولیکی جریان عنوان شده است. در جدول (۱)  $Q_b$  دبی پایه و  $Q_p$  دبی پیک هیدروگراف،  $Fr = \frac{u}{\sqrt{gh}}$  عدد فرود جریان،  $u$  سرعت متوسط جریان،  $g$  شتاب جاذبه،  $h$  عمق جریان،  $\theta$  زاویه آبشکن نسبت به دیوار بالادست،  $\varphi$  درصد نفوذپذیری آبشکن،  $t_b$  زمان تداوم هیدروگراف  $F_d = \frac{u}{\sqrt{(s-1)gd_{50}}}$  عدد فرود ذرات،  $s = \rho_s / \rho$  جرم مخصوص دانه‌های جامد،  $\rho_s$  جرم مخصوص رسوب،  $\rho$  جرم مخصوص آب می‌باشد.

هیدروگراف صورت گرفت. همچنین برای برداشت نقاط جهت تهیه هیدروگراف‌های با چولگی به چپ زمانهای ۰، ۱۰، ۲۰، ۲۵، ۳۳، ۴۰، ۵۰، ۷۵ و ۱۰۰ درصد و با چولگی راست، زمان‌های ۰، ۱۰، ۲۰، ۲۵، ۴۰، ۵۰، ۶۰، ۶۷، ۷۵ و ۱۰۰ درصد زمان کل هیدروگراف در نظر گرفته شد.

با انجام ۲۷ آزمایش اثر زاویه و نفوذپذیری آبشکن روی تغییرات زمانی عمق آبشستگی در هیدروگراف‌هایی با سه نسبت زمان پیک به زمان تداوم ( $t_p/t_b$ ) ۰/۳۳، ۰/۵ و ۰/۶۶ که به ترتیب چولگی به چپ (L)، توزیع گوسی یا نرمال (N) و چولگی به راست (R) و با زمان تداوم ۶۰



شکل ۳- هیدروگرافهای استفاده شده در جریان غیر ماندگار.

جدول ۱- شرایط هندسی و هیدرولیکی جریان.

	$Q$ (LS <sup>-1</sup> )	$F_r$	$\theta$ (°)	$\varphi$ (%)	$t_b$ (min)	$h$ (cm)	$U_c/U_{*c}$	$F_d$	$t_p/t_b$
$Q_b$	۱۵	۰/۱۲	۶۰، ۹۰، ۱۲۰	۰، ۳۳، ۶۶	۶۰	۱۳/۷	۰/۴۸	۱/۳	۰، ۳۳، ۰، ۵۰، ۰، ۶۶
$Q_p$	۵۰	۰/۲۴	۶۰، ۹۰، ۱۲۰	۰، ۳۳، ۶۶	۶۰	۲۰/۲	۰/۹۵	۲/۹۳	۰، ۳۳، ۰، ۵۰، ۰، ۶۶

قطر میله ها و فواصل آنها می باشند که ارتباط آنها بر طبق رابطه زیر مشخص می شود:

$$ds = f(u, h, \rho_s, \rho, g, d_{50}, B, L, \theta, S_0, \varphi, \sigma_g, sh, u_c, t_b, t) \quad [۲]$$

### آنالیز ابعادی

عوامل موثر بر عمق آبشستگی در اطراف آبشکن نفوذپذیر در کانال شامل شرایط جریان، ماهیت رسوبات،

$$\frac{d_s}{L} = f(\Theta, \phi, \frac{t}{t_b}, F_d) \quad [۴]$$

### نتایج و بحث

آزمایش‌ها به نحوی برنامه ریزی شدند تا اثر پارامترهای هندسی آبشکن شامل میزان نفوذپذیری آن و زاویه استقرار آن نسبت به دیواره و پارامتر هیدرولیکی شکل هیدروگراف از نظر چولگی بر روی تغییرات زمانی عمق آبشستگی اطراف آبشکن در شرایط جریان غیر ماندگار بررسی گردد.

#### اثر زاویه آبشکن بر توسعه زمانی آبشستگی

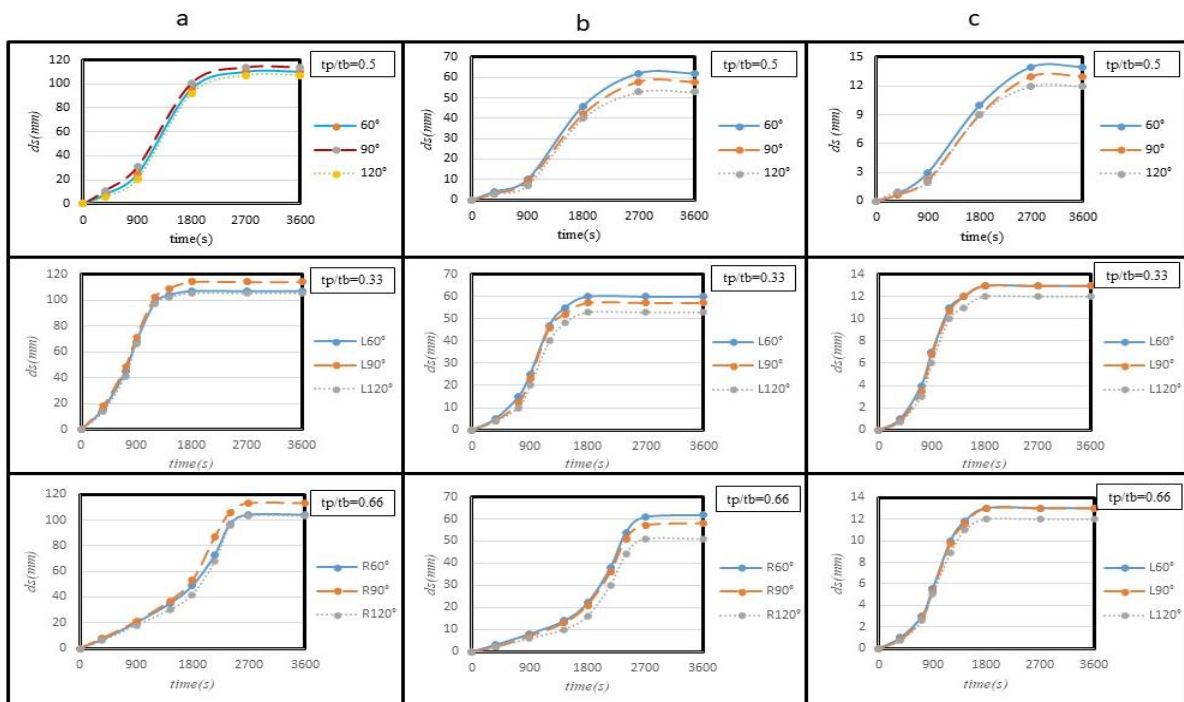
در شکل ۴ نتایج بیشینه عمق آبشستگی برای آبشکن نفوذناپذیر، آبشکن نفوذپذیر با نفوذپذیری ۳۳٪ و ۶۶٪ تحت هیدروگراف با توزیع گوسی یا نرمال، چولگی چپ و راست (چولگی به چپ با حرف L و چولگی به راست با حرف R) در زوایای مختلف نشان داده شده است. در نمودارهای ذیل  $d_s$  عمق آبشستگی در دماغه آبشکن بر حسب میلی‌متر می‌باشد.

که  $u$  سرعت متوسط جریان،  $h$  عمق جریان،  $\rho_s$  جرم مخصوص رسوب،  $\rho$  جرم مخصوص آب،  $g$  شتاب ثقل،  $d_{50}$  قطر متوسط ذرات رسوبی،  $B$  عرض فلوم،  $L$  طول آبشکن،  $\Theta$  زاویه قرارگیری آبشکن نسبت به دیواره فلوم،  $S_0$  شیب طولی کف فلوم،  $\phi$  درصد نفوذپذیری آبشکن،  $\sigma_g$  انحراف استاندارد توزیع اندازه ذره،  $sh$  شکل آبشکن،  $u_c$  سرعت جریان در آستانه حرکت ذرات رسوب،  $t_b$  زمان پایه هیدروگراف،  $t$  زمان از شروع آزمایش.

با توجه به ثابت بودن شتاب ثقل، شیب کانال، شکل آبشکن، عرض مجرا  $g, S_0, sh, B$  حذف می‌شوند. ثابت بودن سیال و مصالح بستر نیز متغیرهای منجر به حذف متغیرهای  $d_{50}, \rho_s, \rho, \sigma_g$  می‌شود و متغیرهای باقیمانده به صورت زیر خواهد بود.

$$d_s = f(u, L, \Theta, \phi, \sigma_g, u_c, t_b, t) \quad [۳]$$

با در نظر گرفتن کلیه پارامترها و تحلیل ابعادی به روش  $\pi$  باکینگهام، معادله نهایی به صورت زیر در می‌آید.



شکل ۴- نتایج عمق آبشستگی تحت هیدروگراف های با نسبت زمان پیک به زمان تداوم هیدروگراف ۰/۵، ۰/۳۳ و ۰/۶۶ در زوایای مختلف برای آبشکن‌های a: نفوذناپذیر، b: نفوذپذیری ۳۳٪، c: نفوذپذیری ۶۶٪

جریانهای گردابه‌های اطراف آبشکن نفوذناپذیر در زاویه ۹۰ درجه نسبت به زاویه‌های ۶۰ و ۱۲۰ درجه می‌باشد.

در شکل‌های a و b و c مشاهده می‌گردد که در آبشکنها با نفوذپذیری ۳۳٪ و ۶۶٪ بیشترین تغییرات عمق آبشستگی در زاویه ۶۰ درجه (یعنی آبشکن دافع) رخ می‌دهد. همانگونه که ذکر گردید مقایسه شکل های a تا c بیانگر این نکته است که به طور کلی زاویه استقرار آبشکن تاثیر قابل ملاحظه ای روی روند آبشستگی و مقدار بیشینه آن ندارد، با این حال دیده می‌شود که در آبشکن‌های نفوذپذیر تاثیر زاویه بر روی روند آبشستگی و تغییرات بیشینه آن موثرتر می‌باشند. برای نشان دادن اثر زاویه استقرار آبشکن، درصد تغییرات حداکثر عمق آبشستگی نسبت به عمق آبشستگی در پیک هیدروگراف در جدول ۲ آمده است. همانگونه که دیده می‌شود بیشترین درصد تغییرات ماکزیم عمق آبشستگی نسبت به عمق آبشستگی در پیک هیدروگراف مربوط به هیدروگراف با نسبت زمان پیک به زمان تداوم هیدروگراف ۰/۵ (توزیع نرمال) می‌باشد. همچنین این تغییرات با افزایش نفوذپذیری آبشکن افزایش می‌یابد که علت این نکته زاویه برخورد جریان و عبور آن از بخش نفوذپذیر است.

جدول ۲- درصد تغییرات حداکثر عمق آبشستگی نسبت به عمق آبشستگی در پیک هیدروگراف.

در شکل ۴ مقایسه تغییرات عمق آبشستگی بین زوایای مختلف آبشکن نشان می‌دهد که تغییرات عمق آبشستگی در زوایای مختلف تقریباً مشابه یکدیگر می‌باشد و اختلاف بین تغییرات عمق آبشستگی در زوایای آزمایش اندک بوده و زاویه اثر چندانی بر روی تغییرات عمق آبشستگی ندارد. همچنین می‌توان مشاهده کرد که بیشینه عمق آبشستگی پس از عبور جریان از پیک هیدروگراف و بر روی شاخه نزولی به مقدار ثابتی می‌رسد که علت آن کاهش دبی و تنش در شاخه نزولی هیدروگراف است. به عبارت دیگر شاخه روند آبشستگی تا مدتی پس از پیک هیدروگراف ادامه خواهد داشت و بیشینه عمق آبشستگی در شاخه نزولی اتفاق می‌افتد این نتیجه با نتایج آبشستگی تحت جریان غیردائمی حول پایه پل نیز همخوانی دارد (اولیوتو و هگر ۲۰۰۲).

در شکل ۵a از مقایسه تغییرات عمق آبشستگی بین زوایای مختلف آبشکن نفوذناپذیر نشان می‌دهد که تغییرات عمق آبشستگی در زاویه ۹۰ درجه بیشترین و در زاویه ۱۲۰ درجه کمترین می‌باشد. این مسئله به دلیل افزایش قدرت جریانهای رو به پایین و قدرت بیشتر

زاویه آبشکن(درجه)	نسبت زمان پیک به زمان تداوم هیدروگراف		نفوذپذیری(درصد)
	۶۰	۹۰	
	۸٪	۱۱٪	۳۳٪
نفوذناپذیر	۱۳٪	۱۱٪	۵٪
	۷٪	۶٪	۶۶٪
	۲۲٪	۱۹٪	۳۳٪
۳۳٪	۲۶٪	۲۸٪	۵٪
	۲۵٪	۲۵٪	

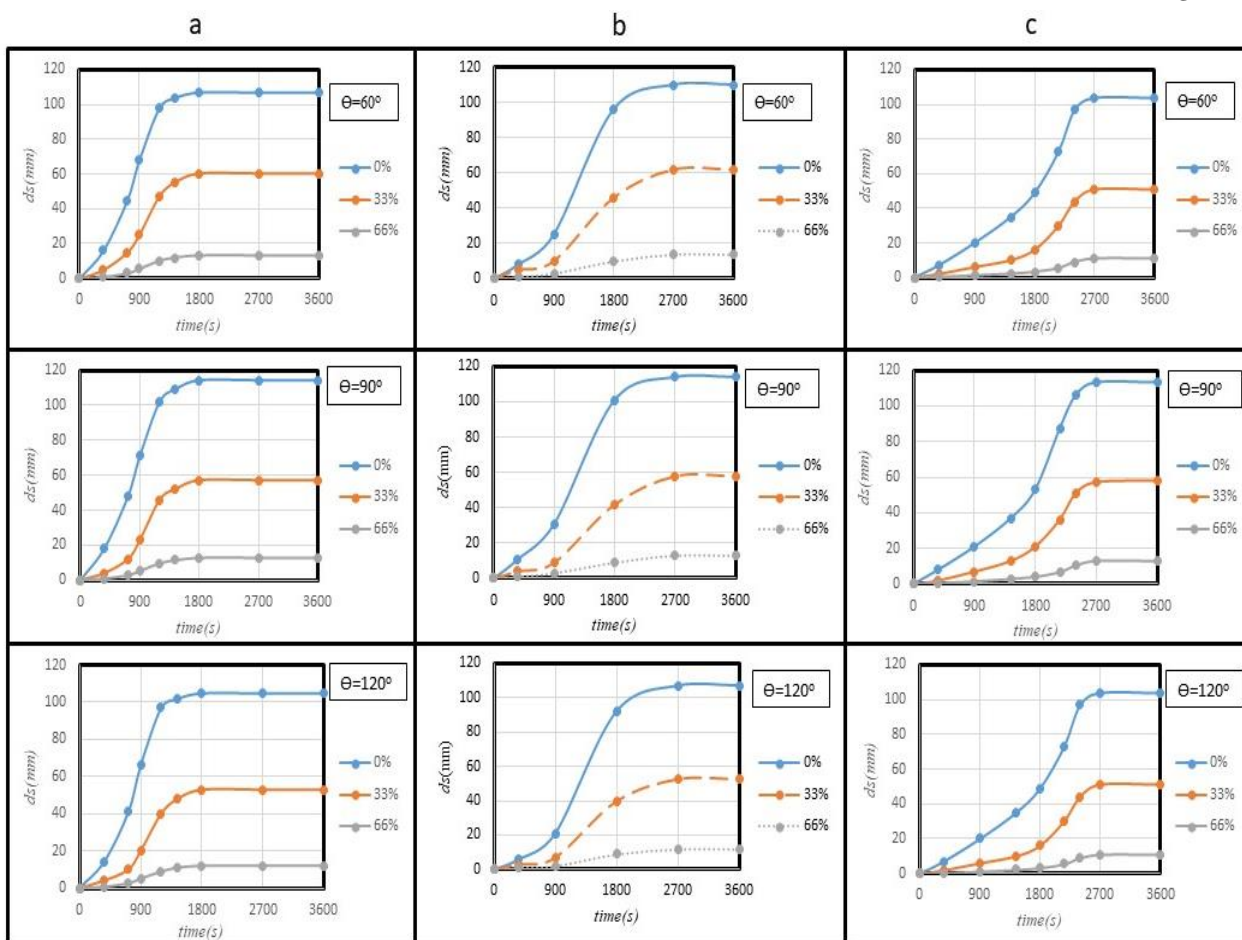
ادامه جدول ۲

۰/۶۶	%۱۳	%۱۲	%۱۴
۰/۳۳	%۲۳	%۲۵	%۲۶
۰/۵	%۲۹	%۳۱	%۲۵
۰/۶۶	%۱۷	%۱۹	%۱۸

اثر نفوذپذیری آبشکن بر روی تغییرات زمانی آبشستگی

در شکل ۵ تأثیر نفوذپذیری بر روی تغییرات زمانی آبشستگی حول آبشکن در هیدروگراف با نسبت زمان

پیک به زمان تداوم هیدروگراف ۰/۳۳، ۰/۵۰، و ۰/۶۶ برای آبشکن در زوایای ۶۰، ۹۰ و ۱۲۰ درجه نشان داده شده است. در نمودارهای ذیل  $\theta$ ، زاویه استقرار آبشکن نسبت به ساحل بالادست بر حسب درجه می‌باشد.



شکل ۵- نتایج عمق آبشستگی آبشکن در زوایای ۶۰، ۹۰ و ۱۲۰ درجه تحت هیدروگراف با نسبت زمان پیک به زمان تداوم

هیدروگراف a: ۰/۳۳، b: ۰/۵۰، c: ۰/۶۶

کوتاهتری از زمان هیدروگراف، حداکثر عمق آبشستگی حاصل می‌گردد. چنگ و همکاران (۲۰۰۴) با مطالعه آبشستگی پایه پل در شرایط جریان غیرماندگار نتیجه گرفتند افزایش سرعت جریان تا دبی پیک هیدروگراف باعث تغییرات شدید عمق آبشستگی می‌شود اما بعد از آن و در شاخه نزولی تغییرات عمق آبشستگی بسیار ناچیز می‌باشد. در تمامی حالات تأثیرگذارترین عامل هیدروگراف بر آبشستگی زمان پیک و یا همان شیب شاخه بالارونده هیدروگراف است و شاخه پایین رونده هیدروگراف تأثیر چندانی بر عمق آبشستگی نمی‌گذارد. اولیویتو و همکاران (۲۰۰۵) نیز به نتایج مشابهی در خصوص کم اثر بودن شاخه پایین رونده هیدروگراف بر آبشستگی رسیده اند.

جدول ۳ نشان دهنده درصد اختلاف میزان بیشینه عمق آبشستگی مربوط به نفوذپذیریهای مختلف در زوایای مختلف تحت هیدروگراف ۶۰ دقیقه نسبت به آبشکن نفوذناپذیر می‌باشد. این نتایج نیز کاملاً گویاست که با افزایش نفوذپذیری آبشستگی افزایش می‌یابد. همچنین مشخص است افزایش زاویه اثر بیشتری بر روی اختلاف ماکزیم عمق آبشستگی دارد.

نمودارهای شکل ۵ بیانگر این نکته هستند که پارامتر نفوذپذیری آبشکن نقش مهمی در بیشینه عمق آبشستگی در اطراف آبشکن دارد و با افزایش نفوذپذیری مقدار آن به نحو قابل ملاحظه ای کاهش می‌یابد. واضح است که گردابه های نعل اسبی و برخاستگی در دماغه آبشکن باعث آبشستگی در این بخش می‌گردد. عبور جریان آب از لابلای میله‌های آبشکن باز باعث می‌شود که اجازه ندهد گردابه‌های برخاستگی در پشت آبشکن و در نزدیکی دماغه تشکیل گردند و یا اینکه از شدت ایجاد آنها جلوگیری گردد.

در شکل ۵a یعنی هیدروگراف با نسبت زمان پیک به زمان تداوم آن معادل ۰/۳۳، تقریباً در ۵۰ درصد زمان هیدروگراف، حداکثر عمق آبشستگی رخ داده است. در شکل ۵b یعنی هیدروگراف با نسبت زمان پیک به زمان تداوم آن معادل ۰/۵۰ در فاصله بین ۱۰ درصد از زمان هیدروگراف تا ۶۰ درصد زمان آن حدود ۹۰ درصد حداکثر عمق آبشستگی رخ می‌دهد. در شکل ۵c یعنی در هیدروگراف با نسبت زمان پیک به زمان تداوم هیدروگراف ۰/۶۶، در فاصله بین ۲۵ درصد از زمان هیدروگراف تا ۷۵ درصد زمان آن حدود ۸۵ درصد حداکثر عمق آبشستگی رخ می‌دهد. در تمام هیدروگرافها هر چه نفوذپذیری آبشکن بیشتر شود در فاصله زمانی

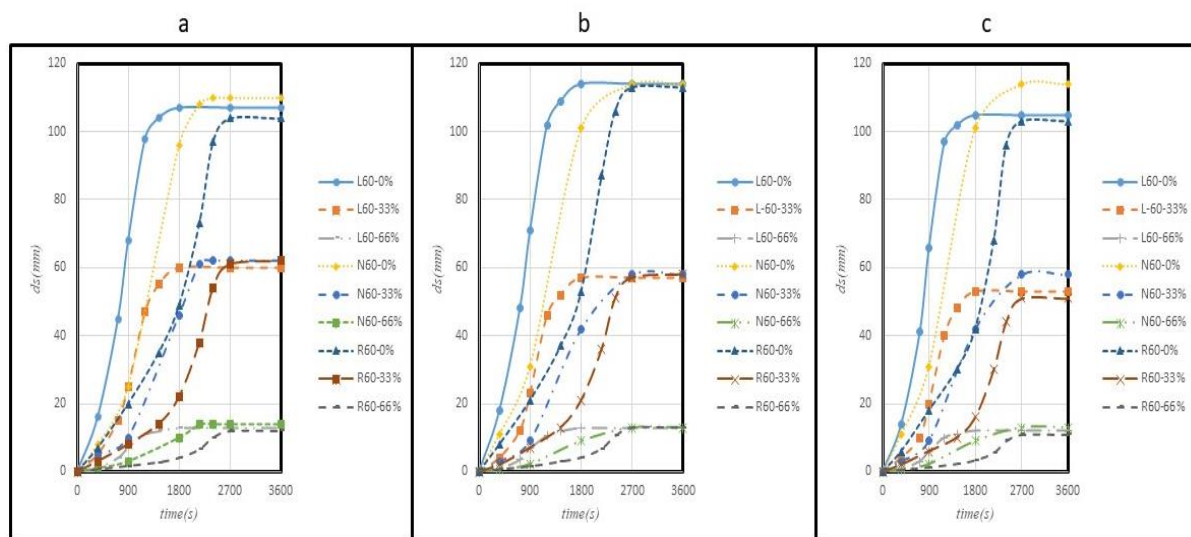
جدول ۳- درصد اختلاف میزان بیشینه عمق آبشستگی در زوایا و نفوذپذیریهای مختلف نسبت به آبشکن نفوذناپذیر تحت هیدروگراف با نسبت زمان پیک به زمان تداوم هیدروگراف ۰/۳۳، ۰/۵ و ۰/۶۶

زاویه آبشکن(درجه)			نفوذپذیری(درصد)	
۱۲۰	۹۰	۶۰	نسبت زمان پیک به زمان تداوم هیدروگراف	
۵۰%	۵۰%	۴۴%	۳۳%	۰/۳۳
۸۹%	۸۹%	۸۸%	۶۶%	
۵۱%	۴۹%	۴۴%	۳۳%	۰/۵
۸۹%	۸۹%	۸۷%	۶۶%	
۴۹%	۴۲%	۳۸%	۳۳%	۰/۶۶
۸۹%	۸۸%	۸۸%	۶۶%	

### اثر چولگی هیدروگراف بر توسعه زمانی آبشستگی

در شکل ۶ نتایج عمق آبشستگی در دماغه آبشکن های نصب شده با زاویای ۶۰، ۹۰ و ۱۲۰ درجه با چولگی های

مختلف هیدروگراف و نفوذپذیریهای متفاوت نشان داده شده است. در این نمودارها، کنار علامت چولگی یعنی  $L$ ،  $N$ ، و  $R$ ، زمان تداوم هیدروگراف و درصد نفوذپذیری آبشکن نیز ذکر شده است.



شکل ۶- نتایج عمق آبشستگی در آبشکن با نفوذپذیریهای مختلف و تحت هیدروگرافهای با نسبت زمان پیک به زمان تداوم هیدروگراف ۰/۳۳، ۰/۵۰ و ۰/۶۶ برای آبشکن با زاویه a: ۶۰ درجه b: ۹۰ درجه c: ۱۲۰ درجه

آبشستگی آبشکن‌های رودخانه ای در شرایط جریان غیرماندگار به نتایج مشابهی دست یافتند. همچنین چنگ و همکاران (۲۰۰۴) با مطالعه آبشستگی پایه پل در شرایط جریان غیرماندگار نتیجه گرفتند افزایش سرعت جریان تا دبی پیک هیدروگراف باعث تغییرات شدید عمق آبشستگی می شود اما بعد از آن و در شاخه نزولی تغییرات عمق آبشستگی بسیار ناچیز هست. همانطوری که در شکل ۶ ملاحظه می‌گردد چولگی هیدروگراف اثر چندانی روی آبشستگی نهایی ندارد که این نتیجه با مطالعات کریمایی طبرستانی و زراتی (۲۰۱۴) مطابقت دارد.

درصد میزان بیشینه عمق آبشستگی مربوط به هیدروگراف های با نسبت زمان پیک به زمان تداوم هیدروگراف ۰/۳۳، ۰/۵۰ و ۰/۶۶ در زوایا و نفوذپذیری های مختلف نسبت به هیدروگراف نرمال در جدول ۴ نشان داده شده است. در جدول زیر اعداد ستون Run

با توجه به شکل ۶ هر چقدر که طول شاخه بالارونده هیدروگراف کوتاه تر باشد و یا به عبارتی نسبت زمان پیک به زمان تداوم هیدروگراف کمتر باشد، شیب منحنی آبشستگی بیشتر است که علت آن رسیدن سریع تر هیدروگراف به دبی پیک و یا به عبارتی شیب افزایش تنش برشی کف زیاد است. در تمام هیدروگرافها بعد از رسیدن هیدروگراف به زمان پیک و تا مدت کوتاهی پس از آن و تا زمانی که شرایط لازم برای خروج رسوبات جدا شده از حفره آبشستگی وجود دارد، عمق آبشستگی افزایش می‌یابد اما پس از این زمان تغییری در عمق گودال آبشستگی رخ نمی‌دهد. علت آن واضح است با کاهش دبی و سرعت جریان، تنش برشی بستر کاهش یافته و پتانسیل فرسایشی برای افزایش ابعاد چاله آبشستگی از بین می‌رود. اولیویتو و همکاران (۲۰۰۵) و کریمایی طبرستانی و زراتی (۲۰۱۴) در خصوص آبشستگی پایه و کوله های پل و باباخانی و قدسیان (۲۰۱۸) در خصوص

نشان دهنده انجام آزمایش با درصد نفوذپذیری و زاویه مربوط به هر آزمایش می باشد.

جدول ۴- درصد میزان بیشینه عمق آبشستگی مربوط به هیدروگراف های با چولگی های چپ و راست در زوایا و نفوذپذیری های مختلف نسبت به هیدروگراف نرمال.

نسبت زمان پیک به زمان تداوم		
هیدروگراف		Run
۰/۶۶	۰/۳۳	
۹۵٪	۹۷٪	٪۰-۶۰
۹۹٪	۱۰۰٪	٪۰-۹۰
۹۶٪	۹۸٪	٪۰-۱۲۰
۱۰۰٪	۹۷٪	٪۳۳-۶۰
۱۰۰٪	۹۸٪	٪۳۳-۹۰
۹۶٪	۱۰۰٪	٪۳۳-۱۲۰
۸۶٪	۹۳٪	٪۶۶-۶۰
۱۰۰٪	۱۰۰٪	٪۶۶-۹۰
۹۲٪	۱۰۰٪	٪۶۶-۱۲۰

محل بیشینه عمق آبشستگی پائین تر از حد آستانه حرکت ذرات می شود لذا پس از مدتی از زمان پیک، آبشستگی در این نقطه اطراف آبشکن متوقف می شود در حالی که آبشستگی در برخی نقاط همچنان ادامه می یابد.

#### نتیجه گیری کلی

در این پژوهش آزمایش های متعددی برای بررسی اثر تغییرات زاویه و نفوذپذیری بر تغییرات زمانی حداکثر عمق آبشستگی اطراف تک آبشکن انجام شده است که نتایج آن به شرح زیر است.

با مقایسه تغییرات عمق آبشستگی بین زوایای مختلف آبشکن نفوذناپذیر صورت پذیرفته نشان می دهد که اختلاف بین تغییرات عمق آبشستگی در زوایای آزمایش اندک بوده و تغییرات عمق آبشستگی در زاویه ۹۰ درجه بیشترین و در زاویه ۱۲۰ درجه کمترین می باشد. در

با توجه به مقادیر جدول ۴ مشاهده می گردد که میزان حداکثر عمق آبشستگی ناشی از عبور هیدروگراف دارای چولگی، تقریباً برابر هیدروگراف نرمال می باشد. و همانگونه که در شکل ۶ مشاهده می گردد هر چه شیب شاخه بالارونده هیدروگراف تندتر باشد، عمق آبشستگی سریع تر به میزان نهایی خود نزدیک می شود.

از آنجائیکه در جریان غیردائمی دبی پیک لحظه ای اتفاق می افتد و به حد کافی استمرار ندارد که عمق آبشستگی به ثبات برسد بنابراین حتی با کاهش دبی پس از عبور از پیک، هنوز شدت جریان حول آبشکن بالاتر از حد آستانه است، پس آبشستگی ادامه می یابد ولی در ادامه افزایش عمق آبشستگی در نقطه بیشینه و کاهش بیش از حد دبی در شاخه نزولی بطور همزمان تنش موضعی وارد شده به بستر را تا اندازه ای کاهش می دهد که شدت جریان در

روند تغییرات عمق آبشستگی ناشی از کلیه هیدروگرافهای دارای چولگی و نرمال، دارای اختلافات بسیاری می‌باشد. از آنجائی که در هیدروگراف های دارای چولگی به چپ ( $t_p/t_b=0/33$ ) زمان شاخه صعودی کوتاه تر می‌باشد و دبی به سرعت به حداکثر مقدار خود می‌رسد لذا شیب نمودار تغییرات زمانی عمق آبشستگی، در ابتدا بسیار شدید و سپس ناچیز می‌گردد. در هیدروگراف های دارای چولگی به راست ( $t_p/t_b=0/66$ ) تغییرات عمق آبشستگی در زمان بیشتری رخ می‌دهد ولی تقریباً میزان حداکثر عمق آبشستگی ناشی از عبور هیدروگراف دارای چولگی، برابر هیدروگراف با توزیع نرمال می‌باشد.

#### تشکر و قدردانی

بدین وسیله، نویسندگان از سازمان آب و برق خوزستان به دلیل حمایت مالی با قرارداد شماره ۰۰۸-۲۲-۲۲-۹۹-۰۰۸ فیما بین آن سازمان و دانشگاه شهید چمران اهواز تشکر و قدردانی می‌نمایند. ضمناً از حمایت مالی و معنوی امور پژوهشی دانشگاه شهید چمران اهواز و قطب علمی بهسازی و نگهداری شبکه ها تقدیر و تشکر می‌گردد.

حالیکه در آبشکنها با نفوذپذیری ۳۳ و ۶۶ درصد بیشترین تغییرات عمق آبشستگی در زاویه ۶۰ درجه رخ می‌دهد.

تقریباً در ۵۰ درصد زمان هیدروگراف حدود ۸۰ تا ۱۰۰ درصد حداکثر عمق آبشستگی رخ می‌دهد و حداکثر عمق آبشستگی ناشی از هیدروگراف با چولگی چپ پس از حدود ۵۰ درصد، هیدروگراف با توزیع نرمال پس از حدود ۶۳ درصد و هیدروگراف با چولگی راست پس از حدود ۷۵ درصد از زمان تداوم هیدروگراف ثابت می‌شود زیرا در شاخه نزولی دبی جریان به تدریج کاهش می‌یابد تا آنجا که دیگر تنش برشی وارد شده قادر به جابه جایی ذرات از داخل حفره به خارج نخواهند بود.

روند تغییرات زمانی عمق آبشستگی بگونه‌ای است که با افزایش میزان نفوذپذیری آبشکن، عمق آبشستگی به میزان قابل ملاحظه‌ای کاهش می‌یابد. بطوریکه بصورت میانگین در نفوذپذیری ۳۳ و ۶۶ درصد به ترتیب نسبت به آبشکن نفوذناپذیر، ۴۸ و ۸۸ درصد کاهش عمق آبشستگی مشاهده می‌گردد.

#### منابع مورد استفاده

- Abolfathi Sh, Kashefipour SM, Fuhrman DR and Shafaei Bajestan M, 2021. Temporal scouring and backfilling processes around a pile group subject to unsteady hydrographs. *Ain Shams Engineering Journal* 13(2):101-115
- Babakhani A, Ghodsian M and Schleiss A, 2018. Experimental investigation of normal hydrograph characteristics effect on scour around spur dike. *Modares Civil Engineering Journal* 18(4): 25-36. (In Persian with English abstract)
- Chang W, Lai J and Yen C, 2004. Evolution of scour depth at circular bridge piers. *Journal of Hydraulic Engineering* 130(9):24-35.
- Copeland RR, 1983. Bank protection techniques using spur dikes. *Hydraulics Laboratory, US. Army Waterways Experiment Station, Vicksburg, Mississippi, US.*
- Ehdaei P and Kashefipour SM, 2016. Experimental study of the effect of spur dike permeability and angle on scour hole dimensions in non-submerged conditions. *Journal of Irrigation Sciences and Engineering* 38(4):15-24.
- Fukuoka S, Watanabe A, Kawaguchi H and Yasutake Y, 2000. A study of permeable groins in series installed in a straight channel. *Proceedings of Hydraulic Engineering* 44:1047-1052.
- Gu Z, Cao X, Gu Q and Lu W, 2020. Exploring proper spacing threshold of non-submerged spur dikes with ipsilateral layout. *Water* 12(1): 172-181.
- Li ZS, Michioku K, Maeno S, Ushita T and Fuji A, 2005. Hydraulic characteristics of a group of permeable groins constructed in an open channel flow. *Journal of Applied Mechanics* 8:773-782.



- Link O, Castillo C, Pizarro A, Rojas A, Ettmer B, Escauriaza C and et al., 2017. A model of bridge pier scour during flood waves. *Journal of Hydraulics Research* 55 (3): 310-323.
- Lu JY, Shi ZH, Hong JH, Lee JJ and Raikar RV, 2011. Temporal variation of scour depth at non uniform cylindrical piers. *Journal of Hydraulic Engineering* 137(1):45-56.
- Melville BW and Chiew YM, 1999. Time scale for local scour at bridge piers. *Journal of Hydraulic Engineering* 125 (1):59-65.
- Oliveto G and Hager WH, 2002. Temporal evolution of clear-water pier and abutment scour. *Journal of Hydraulic Engineering* 128(9):97-105.
- Oliveto G and Hager WH, 2005. Further results to time-dependent local scour at bridge elements. *Journal of Hydraulic Engineering* 132(97):811-820.
- Ozyaman C, Yerdelen C, Eris E and Daneshdaraz R, 2022. Experimental investigation of scouring around a single spur under clear water conditions. *Water Supply* 22(3):3484-3497.
- Pandey M, Ahmad Z and Sharma PK, 2015. Estimation of maximum scour depth near a spur dike. *Canadian Journal of Civil Engineering* 43(3): 270–278.
- Pandey M, Valyrakis M, Qi M, Sharma A and Lodhi A, 2021. Experimental assessment and prediction of temporal scour depth around a spur dike. *International Journal of Sediment Research* 36(1):17-28
- Pinter N, Jemberie A, Remo J, Heine R and Ickes B, 2010. Cumulative impacts of river engineering, Mississippi and lower Missouri Rivers. *River Research* 26: 546–571.
- Raudkivi AJ, 1986. Functional trends of scour at bridge piers. *Journal of Hydraulic Engineering* 112: 1-13.
- Raikar RV and Dey S, 2005. Clear-water scour at bridge piers in fine and medium gravel beds. *Canadian Journal of Civil Engineering* 32 (4): 775-781.
- Shafaei Bajestan M, 2014. Basic theory and practice of hydraulics of sediment transport. Shahid Chamran of Ahvaz University Press. (In Persian).
- Shampa, Hasegawa Y and Nakagawa H, 2020. Three-dimensional flow characteristics in slit-type permeable spur dike fields: efficacy in riverbank protection. *Water* 12(4):1-31
- Sui J, Afzalimehr H, Samani AK and Maherani M, 2010. Clear-water scour around semi-elliptical abutments with armored beds. *International Journal of Sediment Research* 25(3): 233–244.
- Tabarestani MK and Zarrati AR, 2014. Influence of pick time of hydrograph on bridge pier scour. *Hydraulic Journal of Iranian Hydraulic Association* 9(3): 15–32.
- Yangtao C, Peiqing L and Enhui J, 2013. The design and application of permeable. *Applied Mechanics and Materials*. 353: 2502-2508.
- Yazdani AR, Hosseini K and Karami H, 2021. Investigation of scouring at rectangular abutments in a compound Channel under unsteady flow (experimental study). *Amirkabir Journal of Civil Engineering*. 53(4): 1559-1570. (In Persian with English abstract)