

Effect of the opening dimension on scour around permeable spur dike

Zahra Ebrahimi¹, Yousef Ramezani^{*2}, Mehdi Dasturani³

¹ Department of Water Engineering, Faculty of Agriculture, University of Birjand, Birjand, Iran: <https://orcid.org/0009-0004-4301-4047>

² Department of Water Engineering, Faculty of Agriculture, University of Birjand, Birjand, Iran: <https://orcid.org/0000-0002-8085-9290>

³ Department of Water Engineering, Faculty of Agriculture, University of Birjand, Birjand, Iran: <https://orcid.org/0000-0001-7718-9604>

Article Info

Article type:

Research Article

Article history:

Received 18 November 2024

Revised 08 December 2024

Accepted 30 December 2025

Published online 28 June 2025

Keywords:

Sediment recess
Permeable spur dike
Scour depth
Clear water

ABSTRACT

Objective Spur dikes are one of the important structures for organizing rivers. A spur dike is a structure that is designed to prevent the erosion of the river banks. The height, length and permeability of the spur dike are among the factors that affect scour around the spur dike. The purpose of this research is to investigate the effect of the dimension of the opening in the permeable spur dike on scour in the non-submerged state

Methods: The experiments of this research were carried out in a rectangular flume with a length of 10 meters, a width of 30 cm and a height of 50 cm. All the experiments were conducted in steady flow and clear water conditions ($U/U_c = 0.95$), with flow rate and flow depth adjusted to the sediment movement threshold. In the present research, spur dike with a length of 23% of the flume width (7 cm), perpendicular to the flume wall (90 degrees), with four permeability (P) of 10, 20, 30 and 40% and four S/L_s (ratio of spur dike opening dimension to spur dike length) equal to 0.014, 0.025, 0.033, and 0.05 have been used.

Results: In the range of numbers studied in the research, the results showed that the spur dike with P = 40% and S/L_s = 0.05 is the optimal state to reduce scour depth at the nose of the spur dike. Also, the ratio of the scour depth around spur dike to the length of the spur dike (D_s/L_s) was measured as 1.17 in the control state (impermeable spur dike) and 0.28 in the optimal state. The scour depth at the nose of the spur dike has decreased by 75.6% in the optimal state compared to the control state (impermeable spur dike).

Conclusions: The results indicated that increasing permeability (P) and increasing the ratio of spur dike opening dimension to spur dike length (S/L_s) had a significant effect on reducing scour at the nose of the spur dike compared to an impermeable spur dike.

*Corresponding author, E-mail: y.ramezani@birjand.ac.ir

Cite this article: Ebrahimi, Z., Ramezani, Y., & Dasturani, M. (2024). Effect of the opening dimension on scour around permeable spur dike. *Journal of New Approaches in Water Engineering and Environment*, <http://doi.org/10.22034/nawee.2024.489481.1118>



© The Author(s).

Publisher: Gonbad Kavous University.

DOI: <http://doi.org/10.22034/nawee.2024.489481.1118>



تأثیر ابعاد بازشدگی‌ها بر آبشستگی پیرامون آبشکن نفوذپذیر

زهرا ابراهیمی^۱، یوسف رضانی^{۲*}، مهدی دستورانی^۳

^۱ گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه بیرجند، بیرجند، ایران.

^۲ گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه بیرجند، بیرجند، ایران.

^۳ گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه بیرجند، بیرجند، ایران.

اطلاعات مقاله	چکیده
<p>نوع مقاله: مقاله پژوهشی</p> <p>تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۸/۲۸</p> <p>تاریخ بازنگری: ۱۴۰۳/۰۹/۱۸</p> <p>تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۱۰/۱۰</p> <p>تاریخ انتشار: ۱۴۰۴/۰۴/۰۷</p>	<p>هدف: یکی از سازه‌های مهم ساماندهی رودخانه‌ها آبشکن‌ها هستند. آبشکن، سازه‌ای است که به منظور جلوگیری از فرسایش کناره‌های رودخانه طراحی می‌شود. ارتفاع، طول و نفوذپذیری آبشکن از جمله عوامل تأثیرگذار بر آبشستگی پیرامون آبشکن می‌باشد. هدف از این پژوهش بررسی تأثیر ابعاد بازشدگی‌ها در آبشکن نفوذپذیر بر آبشستگی در حالت غیر مستغرق می‌باشد.</p> <p>مواد و روش‌ها: آزمایش‌های این تحقیق، در فلومی مستطیلی به طول ۱۰ متر، عرض ۳۰ سانتی‌متر و ارتفاع ۵۰ سانتی‌متر انجام شده است. تمامی آزمایش‌ها در حالت جریان ماندگار و شرایط آب زلال ($U/U_c = 0.95$)، با تنظیم دبی و عمق جریان در حد آستانه حرکت رسوبات انجام گرفته است. در پژوهش حاضر، آبشکن‌هایی به طولی معادل ۲۳ درصد عرض فلوم (۷ سانتی‌متر) عمود بر دیواره فلوم (۹۰ درجه)، با چهار نفوذپذیری (P) ۱۰، ۲۰، ۳۰ و ۴۰ درصد و چهار S/L_s (نسبت ابعاد بازشدگی آبشکن به طول آبشکن) برابر با ۰/۱۴، ۰/۲۵، ۰/۳۳، ۰/۵ مورد استفاده قرار گرفته است.</p> <p>نتایج: در بازه اعداد مورد مطالعه در تحقیق، نتایج نشان داد که آبشکن با $P = 40$ درصد و $S/L_s = 0.05$، حالت بهینه جهت کاهش عمق آبشستگی پیرامون دماغه آبشکن می‌باشد. همچنین نسبت عمق آبشستگی آبشکن به طول آبشکن (D_s/L_s)، در حالت شاهد (آبشکن نفوذناپذیر) ۱/۱۷ و در حالت بهینه ۰/۲۸ اندازه‌گیری شده است. عمق آبشستگی پیرامون دماغه آبشکن در حالت بهینه نسبت به حالت شاهد (آبشکن نفوذناپذیر) ۷۵/۶ درصد کاهش یافته است.</p> <p>نتیجه‌گیری: بر اساس نتایج می‌توان دریافت که افزایش نفوذپذیری (P) و افزایش نسبت ابعاد بازشدگی آبشکن به طول آبشکن (S/L_s)، تأثیر قابل توجهی در کاهش آبشستگی در دماغه آبشکن در مقایسه با آبشکن نفوذناپذیر دارد.</p>
<p>کلیدواژه‌ها: بستر رسوبی آبشکن نفوذپذیر عمق آبشستگی آب زلال</p>	

*نویسنده مسئول Email: y.ramezani@birjand.ac.ir

استناد: ابراهیمی، زهرا؛ رضانی، یوسف؛ و دستورانی، مهدی. (۱۴۰۴). تأثیر ابعاد بازشدگی‌ها بر آبشستگی پیرامون آبشکن نفوذپذیر. *رویکردهای نوین در مهندسی آب و محیط زیست*.

<http://doi.org/nawee.2024.489481.1118>



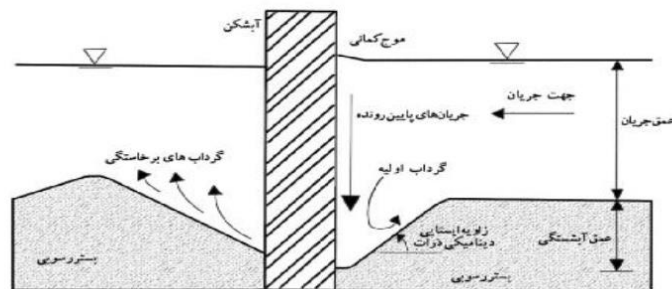
مقدمه

پدیده آبستتگی یکی از موارد مهم در علم هیدرولیک و هیدرولیک رسوب است (خزیمه‌نژاد و همکاران، ۲۰۱۶، رضانی و همکاران، ۱۳۹۱). مکانیسم این پدیده بدین صورت است که سازه قبل از منهدم شدن، در معرض خطرات ناشی از فرسایش پی خود قرار می‌گیرد. در نهایت به مرور زمان منجر به خالی شدن زیر پی و تخریب سازه می‌شود. بنابراین بررسی پدیده آبستتگی و کنترل پایداری سازه، یکی از مهم‌ترین مسائل در طراحی سازه‌های هیدرولیکی است (شریعتی، ۱۳۸۸).

از آنجاکه پدیده آبستتگی و فرسایش موجب تخریب سواحل رودخانه و سازه‌های رودخانه‌ای نظیر پل‌ها می‌شود، حفاظت از این سازه‌ها و سواحل رودخانه دارای اهمیت ویژه‌ای است (رضانی و همکاران، ۱۳۹۳، کریمی و همکاران، ۱۳۹۴). احداث سازه‌هایی در مسیر امواج و جریان‌های ساحلی، یکی از عوامل مهم در کنترل و کاهش آبستتگی کناره‌های رودخانه محسوب می‌شود. سازه آبشکن، یکی از روش‌هایی است که به‌طور معمول برای کاهش فرسایش، حفاظت از سواحل رودخانه، افزایش عمق جریان برای اهداف کشتیرانی و ایجاد یک جریان آرام برای رسوب‌گذاری طراحی می‌شود. این سازه قادر است علاوه بر حفاظت سواحل در مقابل فرسایش، سیلاب را کنترل کند و از پدیده مئاندر (مارپیچ) نیز جلوگیری نماید (نظری، ۱۴۰۰).

آبشکن‌ها از سازه‌های مهم ساماندهی رودخانه هستند. آبشکن سازه‌ای است که به‌منظور کنترل میزان انتقال رسوب ساحلی، جلوگیری از فرسایش ساحل یا جلوگیری از ورود امواج و رسوب به مسیر رودخانه و کانال منتهی به دریا ساخته می‌شود (صانعی، ۱۳۸۹). این سازه‌ها معمولاً عمود بر خط ساحل طراحی می‌شوند. بررسی میزان پایین‌رفتن بستر در اطراف آبشکن‌ها دارای اهمیت خاصی است. آبستتگی در محل این سازه را می‌توان به دو دسته آبستتگی عمومی^۱ و آبستتگی موضعی^۲ تقسیم نمود. عامل اصلی آبستتگی موضعی در اطراف آبشکن نتیجه آشفتگی جریان، در نتیجه افزایش سرعت و افزایش دبی در واحد عرض، بر اثر انقباض مقطع است. افزایش آشفتگی سبب ایجاد جریان چرخشی نعل اسبی بزرگ، در اطراف آبشکن در نتیجه برگشت آب می‌شود. فوران‌های انتهایی گرداب از دماغه آبشکن با چرخش آب به سمت جریان اصلی حرکت می‌کنند. تغییر جهت جریان و ایجاد نیروی مرکزی، ممکن است تغییراتی ایجاد کند و سبب حرکت فوران‌های انتهایی به طرف دماغه آبشکن شود. این جریان مخالف جریان چرخشی اولیه است و سبب کاهش فرسایش می‌شود (اکبری، ۱۳۹۳).

شکل (۱) الگوی جریان پیرامون آبشکن را نشان می‌دهد.



¹ General scour

² Local scour

شکل ۱- الگوی جریان پیرامون آبشکن (نظری، ۱۴۰۰)

در آبشکن‌های نفوذپذیر، جریان تا حدی به ساختار نفوذ می‌کند و سبب کاهش انتقال رسوبات بستر و سرعت جریان، ته‌نشینی رسوبات معلق درشت‌دانه و جذب مواد شناور می‌گردد. با گذشت زمان، به تدریج میدان رسوب‌گذاری در فاصله بین ردیف‌های آبشکن گسترش می‌یابد و امکان تثبیت زیستی فراهم می‌شود (شهابی، ۱۳۹۴).

از اوایل سال ۱۹۳۰ پژوهش‌های بسیاری توسط Garde (1981)، Gill (1972)، Melville (1992)، Barbhuiya و Dey (2004) برای تعیین حداکثر عمق آبشستگی انجام شده است (صانعی، ۱۳۸۹).

نصراللهی و همکاران (۲۰۰۸) طی پژوهشی تأثیر درصد بازشدگی بر آبشستگی پیرامون آبشکن نفوذپذیر را بررسی کردند. آن‌ها معادله‌ای برای تخمین حداکثر عمق آبشستگی ارائه نمودند. بررسی نتایج نشان داد زمان رسیدن به حالت تعادل حداکثر عمق آبشستگی با افزایش درصد بازشدگی کاهش می‌یابد.

اهدایی و کاشفی‌پور (۱۳۹۴) در یک مطالعه آزمایشگاهی به بررسی اثر نفوذپذیری و زاویه تک آبشکن غیر مستغرق بر روی ابعاد حفره آبشستگی پرداخته‌اند. نتایج نشان داد که با افزایش نفوذپذیری آبشکن به میزان ۵۰ درصد، آبشستگی به میزان زیادی کاهش می‌یابد. برای عدد فرود جریان $0/24$ در حالت عمود (۹۰ درجه) با ۵۰ درصد نفوذپذیری عمق، طول و عرض آبشستگی نسبی در مقایسه با حالت نفوذناپذیر به ترتیب $67/3$ ، $45/5$ ، $75/3$ درصد کاهش یافته است. همچنین در حالت نفوذپذیری ۵۰ درصد، بیشترین آبشستگی مربوط به آبشکن با زاویه ۶۰ درجه بوده است که متوسط عمق، طول و عرض آبشستگی برای این حالت به ترتیب $0/19$ ، $0/7$ و $1/2$ تعیین شده است.

Nath و Misra (2017) آبشستگی موضعی را پیرامون یک آبشکن منفرد با سه نسبت منافذ $0/82$ ، $0/85$ و $0/88$ در سه زاویه ۶۰، ۸۰ و ۹۰ درجه در جریان‌های مختلف تحت شرایط بستر زنده بررسی کردند. نتایج نشان داد که با افزایش عدد فرود تمام پارامترهای نسبی آبشستگی افزایش و با کاهش زاویه شیب آبشکن نیز کاهش می‌یابد. همچنین با کاهش نسبت منافذ، عمق آبشستگی افزایش می‌یابد.

چام‌پور و کاشفی‌پور (۱۳۹۷) در یک تحقیق آزمایشگاهی اثر سه نفوذپذیری ۰، ۳۳ و ۶۴ درصد و سه طول مؤثر آبشکن، معادل $0/15$ ، $0/2$ و $0/25$ عرض فلوم را بر ابعاد چاله آبشستگی در شرایط غیر مستغرق در قوس ملایم ۹۰ درجه، بررسی کردند. نتایج نشان داد که در آبشکن به طول مؤثر ۱۴ سانتی‌متر، با افزایش نفوذپذیری از ۰ درصد به ۳۳ درصد، عمق، طول و عرض حفره آبشستگی به میزان $59/8$ ، $47/9$ ، $38/6$ درصد کاهش می‌یابد.

Ezzeldin (2019) با استفاده از مدل عددی Nays-2DH تأثیر استفاده از آبشکن‌های نفوذپذیر بر حداکثر عمق آبشستگی ایجاد شده نسبت به آبشکن‌های صلب را مطالعه کرد. داده‌های تجربی جمع‌آوری‌شده در این مطالعه با انجام آزمایش‌هایی بر روی پنج مدل مختلف آبشکن با نسبت‌های نفوذپذیری متفاوت بررسی شدند. نتایج تحقیق با استفاده از شاخص‌های عملکرد آماری نشان داد که توافق قابل قبولی بین مقادیر حاصل از مدل عددی برای حداکثر عمق نسبی آبشستگی (که نسبت به عمق جریان بی بعد شده است) و مقادیر اندازه‌گیری شده وجود دارد.

قانعی و منصور (۱۳۹۸) در یک مطالعه عددی بر روی سری آبشکن مستقیم نفوذپذیر با درجه نفوذپذیری ۰، ۳۵، ۵۰

درصد، در شرایط آب زلال و تغییر در میزان دبی جریان، به این نتیجه رسیدند که در یک فاصله ثابت بین آبشکن‌ها، با افزایش دبی جریان میزان عمق آبستنگی افزایش می‌یابد و بیشترین میزان آبستنگی در طول آبشکن اول رخ می‌دهد. چراغچی و شفاعی بجستان (۱۳۹۹) در یک مطالعه، سازه‌ای نوین که ترکیبی از آبشکن نفوذپذیر با صفحه مثلثی در یک بستر ماسه‌ای با درجات مختلف نفوذپذیری (۳۰، ۵۰، ۷۰ درصد) در ۴ شرایط هیدرولیکی مختلف (فروود ۰/۱۸، ۰/۲۰، ۰/۲۲، ۰/۲۴) را آزمایش کردند. نتایج نشان داد که در مقایسه با آبشکن نفوذپذیر، نرخ رسوب‌گذاری در پشت این سازه افزایش یافته و در جلوی سازه نیز با درصد نفوذپذیری ۷۰ و عدد فروود ۰/۱۸ بیشترین میزان و در عدد فروود ۰/۲۴ کمترین عمق آبستنگی را داشته است.

Pandey و همکاران (2021) به بررسی تغییرات عمق آبستنگی در یک آزمایش تجربی پیرامون آبشکن تیغه‌ای و پارامترهای تأثیرگذار روی کارایی آبشکن پرداختند. نتایج تحقیقات نشان داد که عمق آبستنگی با افزایش عدد فروود و سرعت آستانه و کم شدن عمق جریان، افزایش می‌یابد و با افزایش اندازه ذرات کم می‌شود. هم‌چنین عمق آبستنگی اطراف دیواره آبشکن و محل اتصال آبشکن به ساحل، کمتر از دماغه آبشکن است.

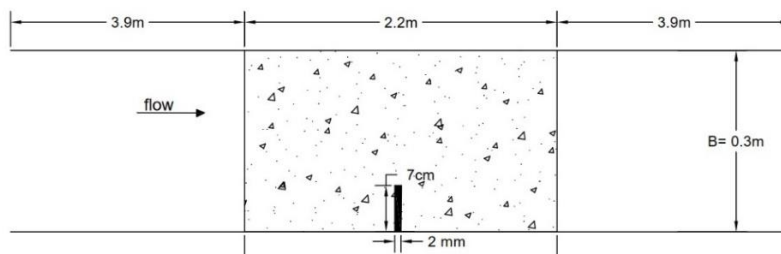
فرشاد و همکاران (۲۰۲۲) حداکثر عمق آبستنگی در آبشکن‌های نفوذپذیر و زاویه‌دار تحت هیدروگراف‌هایی از مدت زمان‌های مختلف را بررسی کرده‌اند. آزمایش‌ها در یک کانال مستطیلی به طول ۱۰ متر، عرض ۰/۷۶ متر و عمق ۰/۶ متر انجام شد. نتایج نشان داد که نفوذپذیری آبشکن تأثیر قابل توجهی در تضعیف پدیده آبستنگی در مقایسه با آبشکن‌های نفوذناپذیر دارد و تأثیر مطلوب‌تر آن زمانی است که جهت زاویه نیز مطلوب باشد.

به دلیل اهمیت پدیده آبستنگی و تأثیر آن بر پدیده آبستنگی پیرامون آبشکن‌ها، همواره پیدا کردن روش‌هایی برای جلوگیری و کاهش این پدیده مورد توجه بوده است. جریان آب می‌تواند خاک کف، دیواره‌ها و سواحل رودخانه را بشوید و با خود حمل کند؛ بنابراین احداث سازه‌هایی در مسیر جریان از مهمترین عوامل کنترل فرسایش و کاهش آبستنگی کناره رودخانه به‌شمار می‌رود. سازه آبشکن یکی از روش‌هایی است که منجر به کنترل آبستنگی و کند کردن آهنگ فرسایش، افزایش رسوب‌گذاری و کاهش انتقال رسوبات به پایین دست جریان می‌شود. بررسی پژوهش‌های پیشین نشان می‌دهد که نفوذپذیری آبشکن بر میزان کاهش آبستنگی در دماغه آبشکن تأثیرگذار است. هدف از این پژوهش بررسی تأثیر ابعاد بازشدگی‌ها بر آبستنگی پیرامون آبشکن نفوذپذیر در حالت غیر مستغرق است.

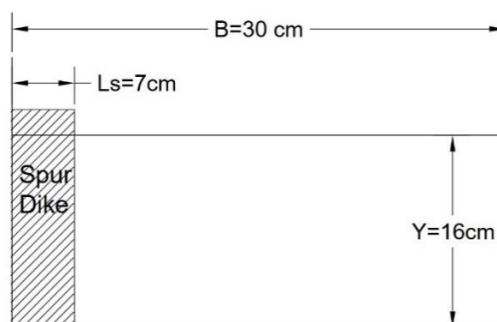
مواد و روش‌ها

آزمایش‌های این تحقیق در فلومی به طول ۱۰ متر، عرض ۳۰ سانتی‌متر و ارتفاع ۵۰ سانتی‌متر در آزمایشگاه هیدرولیک گروه علوم و مهندسی آب دانشگاه بیرجند انجام شد. دیواره فلوم از جنس پلکسی‌گلاس به ضخامت ۱۰ میلی‌متر تشکیل شده است و سبب می‌شود جریان در داخل فلوم کاملاً قابل رؤیت باشد. جریان آب در داخل فلوم دارای سیستم بازچرخانی است؛ به طوری که آب پس از خروج از فلوم وارد یک مخزن شده، سپس توسط پمپ از مخزن به ابتدای فلوم پمپاژ می‌شود. در قسمت بالادست فلوم یک آرام‌کننده با ابعاد ۵۰ سانتی‌متر به منظور آرام کردن جریان در داخل فلوم قرار دارد. در فاصله ۳/۹

متری از ابتدای فلوم یک باکس از جنس پلکسی گلاس قرار گرفته است که طول، عرض و ارتفاع آن به ترتیب ۲/۲ متر، ۰/۳ متر و ۱۵ سانتی متر است. این باکس از یک نمونه رسوب یکنواخت دارای انحراف معیار هندسی ۱/۲۷ و قطر متوسط ۱ میلی متر پر شده است، تا در تراز بستر کانال قرار گیرد. برای مصالح یکنواخت مقدار انحراف معیار کمتر از ۱/۴ است (باربویا و دی، ۲۰۰۵). در شکل (۲) پلان کانال آزمایشگاهی نشان داده شده است. آب از طریق پمپ از مخزن پمپاژ می شود و به قسمت ابتدای فلوم که بخش آرام کننده است، هدایت می گردد. در قسمت انتهایی فلوم یک دریچه برای تنظیم عمق آب در رقوم مورد نظر قرار دارد. در شکل (۳) شماتیک مقطع عرضی کانال نشان داده شده است.

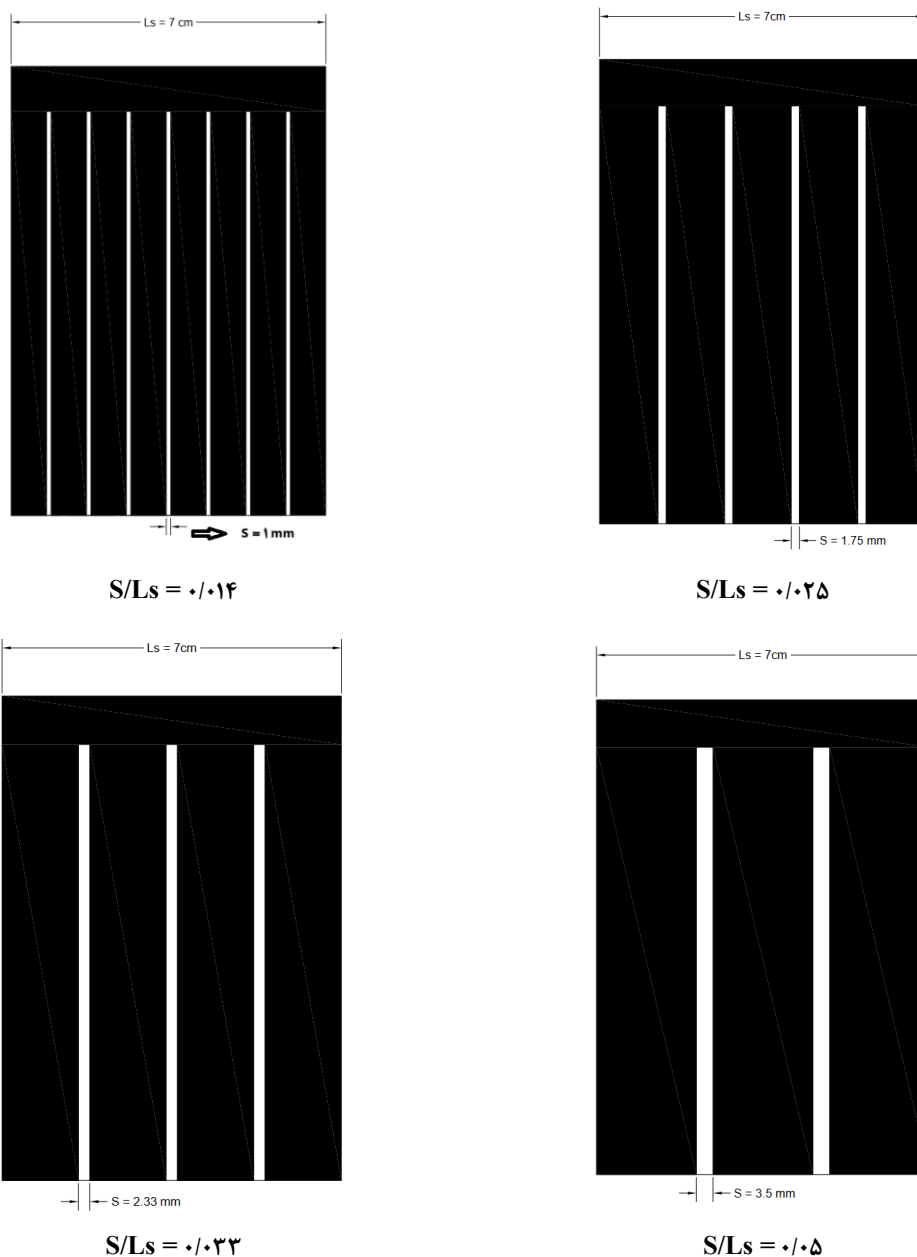


شکل ۲- پلان کانال آزمایشگاهی با طول $L = 10 \text{ m}$ ، عرض $B = 0.3 \text{ m}$ ، و آبشکن به ضخامت 2 mm و طول $L_s = 7 \text{ cm}$



شکل ۳- مقطع عرضی کانال آزمایشگاهی با عرض $B = 30 \text{ cm}$ ، طول آبشکن $L_s = 7 \text{ cm}$ و عمق جریان $Y = 16 \text{ cm}$

در این تحقیق آبشکن‌هایی از جنس پلکسی گلاس به ضخامت ۲ میلی متر، ارتفاع ۳۲ سانتی متر (به منظور ایجاد شرایط غیرمستغرق)، و طول ۷ سانتی متر (برابر با ۲۳ درصد عرض فلوم) استفاده شد. محل قرارگیری آبشکن در وسط بستر رسوبی است؛ به طوری که فاصله آبشکن از دو طرف بستر رسوبی به یک اندازه بوده است. در شکل (۴) شماتیکی از آبشکن مورد استفاده در این تحقیق، نشان داده شده است.



شکل ۴- شماتیکی از آبشکن نفوذپذیر، مشخصات آبشکن Ls طول آبشکن، S فاصله بین منافذ آبشکن و

نسبت‌های مختلف S/Ls

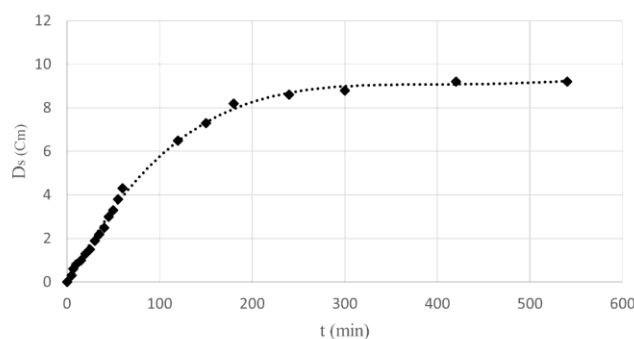
آزمایش‌ها در این تحقیق در شرایط آب زلال انجام شد. آبشستگی آب زلال در شرایطی انجام می‌شود که رسوبات بستر در بالادست در جای خود ثابت بوده، به آستانه حرکت نرسیده باشند (صادقی و همکاران، ۲۰۱۸، رضانی و همکاران، ۱۳۹۳). در این تحقیق به منظور تعیین عمقی که در آن آبشستگی رخ می‌دهد، نیاز به تعیین عمق آستانه حرکت رسوبات است؛ زیرا

فرسایش از آستانه حرکت شروع می‌شود و ادامه می‌یابد. به‌منظور انجام آزمایش آستانه حرکت رسوبات، ابتدا بستر رسوبی بدون حضور آبشکن، کاملاً مسطح گردید و دریچه انتهایی کانال کاملاً بالا کشیده شد. سپس فلوم به‌آرامی با جریان آب پر شد و دبی مورد نظر تنظیم گردید. پس از تنظیم دبی، دریچه به‌آرامی باز شد تا جایی که حرکت عمومی رسوبات مشاهده شد. در دبی ۱۲/۵۴ لیتر بر ثانیه، عمق جریان آستانه حرکت رسوبات ۱۵/۲ سانتی‌متر مشاهده شد. با توجه به $U/U_C = 0.95$ ، عمق مورد نظر برای انجام آزمایش‌ها ۱۶ سانتی‌متر محاسبه گردید.

در شروع هر آزمایش پس از نصب هر آبشکن، ابتدا فلوم با نرخ کم جریان پر شد. این امر به این دلیل است که جلوی فرسایش ناشی از جریان ورقه‌ای در ابتدای آزمایش گرفته شود. سپس دبی به‌آرامی زیاد شد تا به دبی مورد نظر برسد. پس از تنظیم دبی، دریچه انتهایی به‌آرامی باز می‌شود تا عمق جریان در عمق مورد نظر (۰/۱۶ متر) قرار گیرد. سپس آزمایش به مدت زمان تعیین‌شده (۳ ساعت) ادامه پیدا می‌کند و پس از اتمام آزمایش، آب به‌آرامی از فلوم خارج می‌گردد. در انتها حداکثر عمق آبشستگی و توپوگرافی ایجادشده در اطراف آبشکن توسط متر لیزری برداشت می‌شود.

زمان تعادل

از آنجاکه فرآیند آبشستگی تابع زمان و شدت تغییرات جریان است، آزمایشی برای تعیین زمان تعادل طراحی گردید. Vittal و همکاران (1994) زمان تعادل را به‌گونه‌ای انتخاب کردند که پس از ۶ ساعت عمق آبشستگی کمتر از ۱ میلی‌متر تغییر کند. Kumar و همکاران (1999) نیز زمان تعادل را به‌گونه‌ای در نظر گرفتند که پس از بازه زمانی ۳ ساعت، عمق آبشستگی کمتر از ۱ میلی‌متر تغییر کند. Melville و Chew (1999) زمانی را که پس از گذشت ۸ ساعت، عمق آبشستگی کمتر از ۲ میلی‌متر تغییر کند، زمان تعادل در نظر گرفتند. یباره‌پور و کاشفی‌پور (۱۳۹۳) آزمایشی برای بررسی توپوگرافی بستر با دبی ۲۴ لیتر بر ثانیه طی زمان ۱۴ ساعت بررسی کردند و در طی این تحقیق مشاهده شد که حداکثر عمق آبشستگی در زمان ۲/۵ ساعت رخ می‌دهد و پس از آن تغییرات عمق آبشستگی ناچیز است. در پژوهش حاضر نیز آزمایشی برای بررسی تغییرات عمق آبشستگی با دبی ۱۲/۵۴ لیتر بر ثانیه طی زمان ۱۲ ساعت انجام شد. شکل (۵) نمودار تغییرات عمق آبشستگی بر حسب زمان را نشان می‌دهد. مطابق شکل (۵) ۸۹ درصد عمق آبشستگی تا زمان ۳ ساعت رخ داده است. بنابراین مدت زمان ۳ ساعت به‌عنوان زمان انجام آزمایش‌ها انتخاب گردید.



شکل ۵- نمودار تغییرات عمق آبشستگی (cm) بر حسب زمان (min)

تحلیل ابعادی

پارامترهای مؤثر در عملکرد آبشکن‌ها و آبشستگی پیرامون دماغه آبشکن به شرح زیر است:

$$F(\mu, \rho, \theta, P, B, S_0, L_S, U, Y, D_S, g, U_C, G_S, D_{50}, S) = 0 \quad \text{رابطه ۱}$$

که در آن

B عرض کانال، S_0 شیب کانال، L_S طول آبشکن، S فاصله بین منافذ، θ زاویه اتصال آبشکن، P نفوذپذیری آبشکن، U سرعت متوسط جریان، Y عمق جریان، D_S حداکثر عمق آبشستگی، g شتاب ثقل، U_C سرعت آستانه حرکت رسوبات، D_{50} قطر متوسط رسوبات، ρ_s جرم مخصوص رسوبات بستر، ρ جرم مخصوص سیال، μ لزجت دینامیکی سیال است. با استفاده از تئوری پی-باکینگهام رابطه ۱ به رابطه ۲ تبدیل می‌شود:

$$\frac{D_S}{L_S} = f\left(\theta, \frac{B}{L_S}, \frac{Y}{L_S}, \frac{U}{U_C}, \frac{S}{L_S}, Re, Fr, S_0, P, \frac{\rho_s}{\rho}, \frac{D_{50}}{L_S}\right) \quad \text{رابطه ۲}$$

در رابطه (۲) پارامتر Fr، عدد فرود است که با توجه به ثابت بودن دبی و عمق جریان، از تاثیر آن صرف نظر گردید. $\frac{D_S}{L_S}$ نسبت عمق آبشستگی به طول آبشکن، $\frac{B}{L_S}$ نسبت عرض کانال به طول آبشکن، $\frac{Y}{L_S}$ نسبت عمق جریان به طول آبشکن، $\frac{U}{U_C}$ نسبت سرعت جریان به سرعت بحرانی آستانه حرکت رسوبات، $\frac{S}{L_S}$ نسبت فاصله بین منافذ آبشکن به طول آبشکن و P درصد نفوذپذیری است که به صورت رابطه (۳) نشان داده شده است.

$$P = \frac{\text{سطح روزنه}}{\text{سطح کل}} \times 100 \quad \text{رابطه ۳}$$

عدد رینولدز (Re) در تمامی آزمایش‌های پژوهش حاضر ۲۰۲۲۵ است که بالاتر از محدوده رینولدز جریان متلاطم (۴۰۰۰ $Re >$) است و از تاثیر آن صرف نظر گردیده است. همچنین در تمامی آزمایش‌های پژوهش حاضر پارامتر S_0, B, Y, L_S ثابت در نظر گرفته شده است. با توجه به یکنواخت بودن مصالح بستر، پارامتر D_{50} و $\frac{\rho_s}{\rho}$ نیز از تابع فوق حذف می‌شود. بر این اساس رابطه زیر به دست آمد:

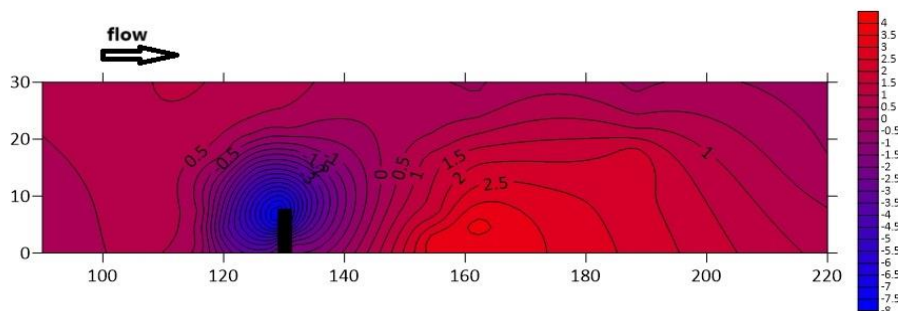
$$\frac{D_S}{L_S} = f\left(P, \frac{S}{L_S}\right) \quad \text{رابطه ۴}$$

جدول ۱- پارامترهای مورد استفاده در تحقیق

پارامتر	واحد	محدوده تغییرات
دبی جریان (Q)	Lit/s	۱۲/۵۴
عمق جریان (d)	cm	۱۶
طول آبشکن (L _S)	cm	۷
نسبت ابعاد بازشدگی آبشکن به طول آبشکن (S/L _S)	-	۰/۰۱۴ - ۰/۰۲۵ - ۰/۰۳۳ - ۰/۰۵
درصد نفوذپذیری (P)	%	۱۰ - ۲۰ - ۳۰ - ۴۰
اندازه ذرات رسوبی (D ₅₀)	mm	۱

نتایج و بحث

در این بخش، نتایج حاصل از تحقیق بررسی شده است. در ابتدا آزمایش شاهد انجام گردید و پس از اتمام آزمایش، توپوگرافی بستر برداشت شد. شکل (۶) الگوی فرسایش و رسوب گذاری در آزمایش شاهد را نشان می دهد. در شکل (۶) محور عمودی در راستای عرض کانال و محور افقی در راستای طول کانال است. آبشکن به صورت مانعی در مقابل جریان عمل می کند و سبب ایجاد جریان گردابه ای و به تبع آن آبشستگی بستر، پیرامون آبشکن می شود. همچنین بیشترین توسعه یافتگی حفره آبشستگی در قسمت جلوی آبشکن و بالادست جریان رخ داده است. رسوبات پس از شسته شدن، در قسمت پایین دست جریان تجمع یافته است. خطوط جریان در برخورد با آبشکن آرایش خود را تغییر می دهد و الگوهای متفاوتی از جریان در دماغه آبشکن ایجاد می شود (دهقانی و همکاران ۱۳۸۸). حداکثر عمق آبشستگی در محل دماغه آبشکن رخ داده است و مقدار آن ۸/۲ سانتی متر اندازه گیری گردید. میزان توسعه یافتگی حفره آبشستگی نسبت به میزان رسوب گذاری در پایین دست جریان کمتر بوده است.

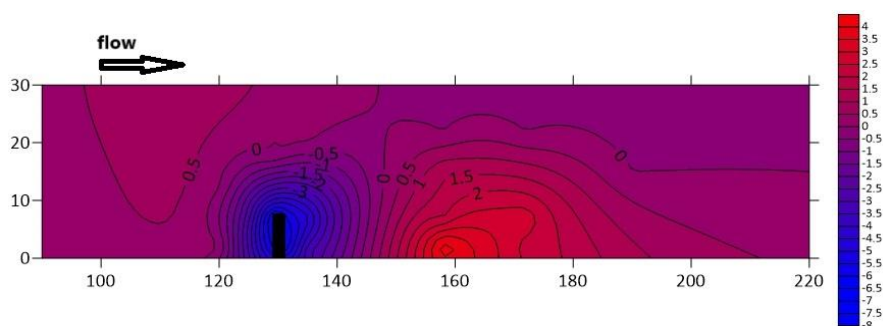


شکل ۶- آبشستگی بستر پیرامون آبشکن در آزمایش شاهد (آبشکن نفوذناپذیر)

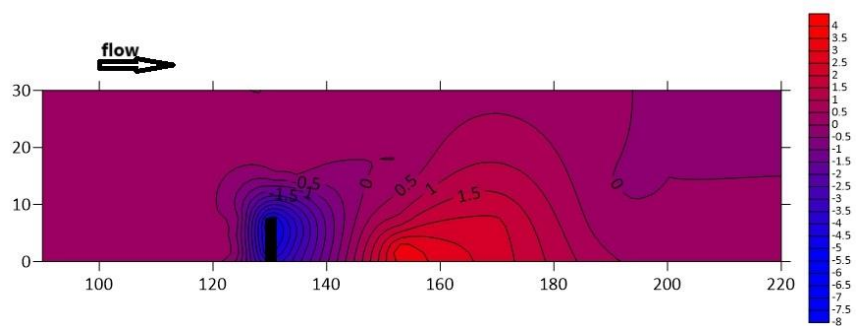
شکل های (۷) تا (۱۰) آبشستگی بستر پیرامون آبشکن در $S/L_S = 0/05$ و در نفوذپذیری ۱۰، ۲۰، ۳۰ و ۴۰ درصد را

نشان می‌دهد. با توجه به شکل‌های (۷) تا (۱۰) مشاهده می‌شود که میزان آبشستگی پیرامون آبشکن کاهش یافته است. استفاده از آبشکن نفوذپذیر سبب می‌شود که بخشی از جریان از منافذ آبشکن عبور کند؛ در نتیجه حفره آبشستگی نسبت به حالت شاهد کوچکتر می‌شود. همچنین عبور جریان از آبشکن باعث می‌شود تا جریان گردابه‌ای به خوبی شکل نگیرد؛ در نتیجه هم فرسایش و هم رسوبگذاری کاهش می‌یابد.

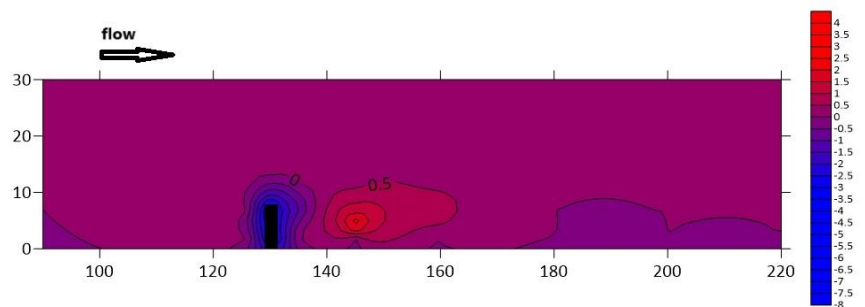
با توجه به شکل‌های (۷) تا (۱۰) حجم حفره آبشستگی برای آبشکن شاهد (نفوذناپذیر)، بیشترین مقدار و در آبشکن با نفوذپذیری ۳۰ و ۴۰ درصد، کمترین مقدار را دارد. این نتایج با پژوهش بیاره پور و کاشفی پور (۱۳۹۳) نیز تطابق دارد.



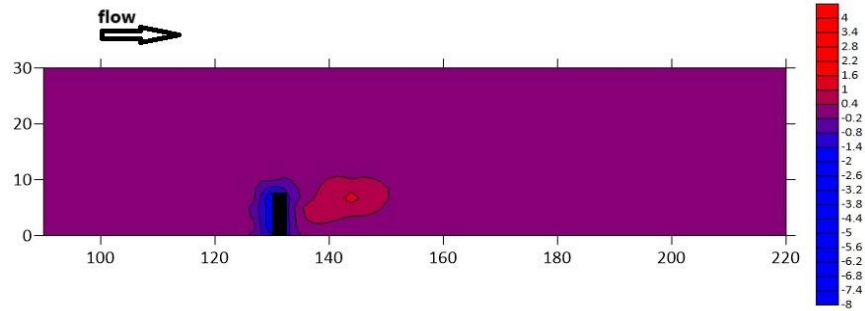
شکل ۷- آبشستگی بستر پیرامون آبشکن با $P = 10\%$ و $S/Ls = 0.05$



شکل ۸- آبشستگی بستر پیرامون آبشکن با $P = 20\%$ و $S/Ls = 0.05$



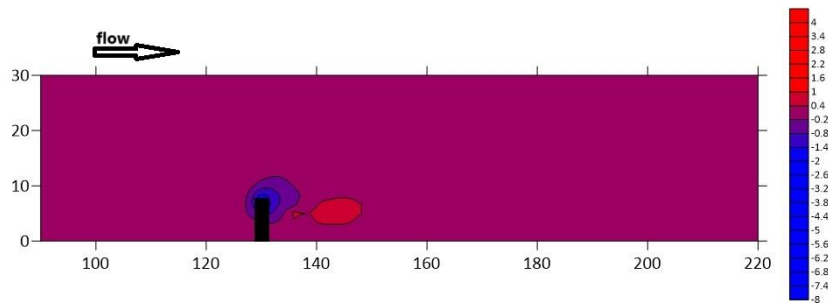
شکل ۹- آبشستگی بستر پیرامون آبشکن با $P = 30\%$ و $S/Ls = 0.05$



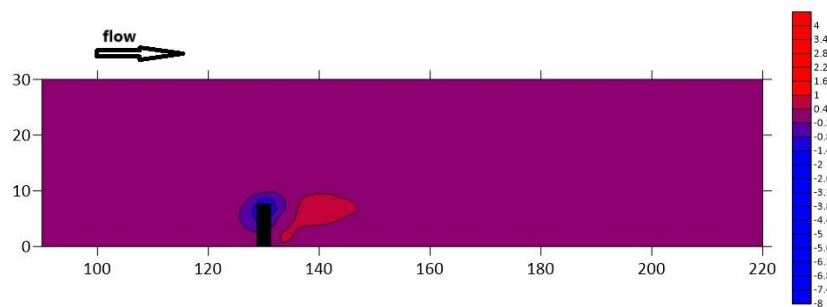
شکل ۱۰- آبشستگی بستر پیرامون آبشکن با $P = 40\%$ و $S/Ls = 0.05$

شکل‌های (۱۱) تا (۱۴) توپوگرافی بستر در $P = 40\%$ در نسبت‌های مختلف S/Ls از 0.014 تا 0.05 را نشان می‌دهد. با توجه به توپوگرافی بستر مشاهده می‌شود که با افزایش نسبت S/Ls ، عمق آبشستگی کاهش می‌یابد. همان‌طور که در شکل (۱۱) و (۱۲) مشاهده می‌شود، به دلیل کوچکتر بودن نسبت منافذ، ابعاد حفره آبشستگی کمتر شده است. این در حالی است که عمق آبشستگی در محل دماغه آبشکن در شکل‌های (۱۱) و (۱۲) بیشتر از عمق آبشستگی در شکل‌های (۱۳) و (۱۴) است.

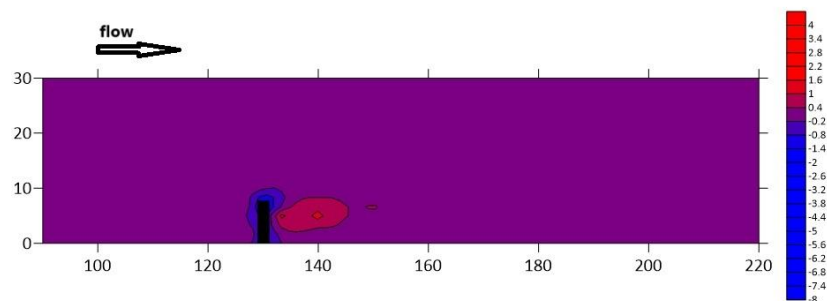
با توجه به شکل‌های (۱۱) تا (۱۴)، حجم حفره آبشستگی برای آبشکن شاهد (نفوذناپذیر) بیشترین مقدار و در آبشکن با $S/Ls = 0.05$ کمترین مقدار را دارد. همچنین عمق آبشستگی در اطراف دیواره آبشکن کمتر از دماغه آبشکن است. این نتیجه با پژوهش پندی و همکاران (۲۰۲۱) همخوانی دارد.



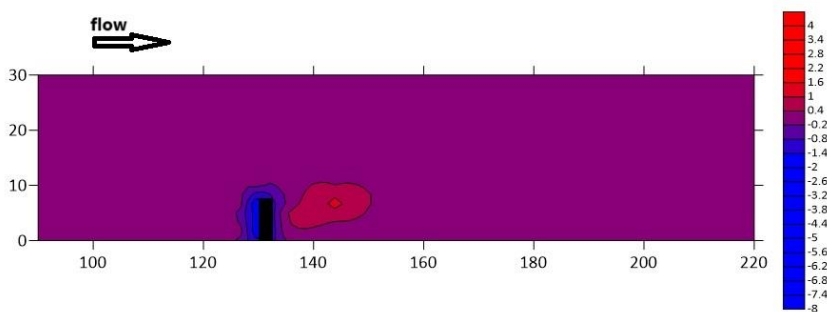
شکل ۱۱- آبشستگی بستر پیرامون آبشکن با $P = 40\%$ و $S/Ls = 0.014$



شکل ۱۲- آبشستگی بستر پیرامون آبشکن $S/Ls = ۰/۰۲۵$ و $P = ۴۰\%$



شکل ۱۳- آبشستگی بستر پیرامون آبشکن $S/Ls = ۰/۰۳۳$ و $P = ۴۰\%$



شکل ۱۴- آبشستگی بستر پیرامون آبشکن $S/Ls = ۰/۰۵$ و $P = ۴۰\%$

بررسی پروفیل طولی آبشستگی پیرامون آبشکن

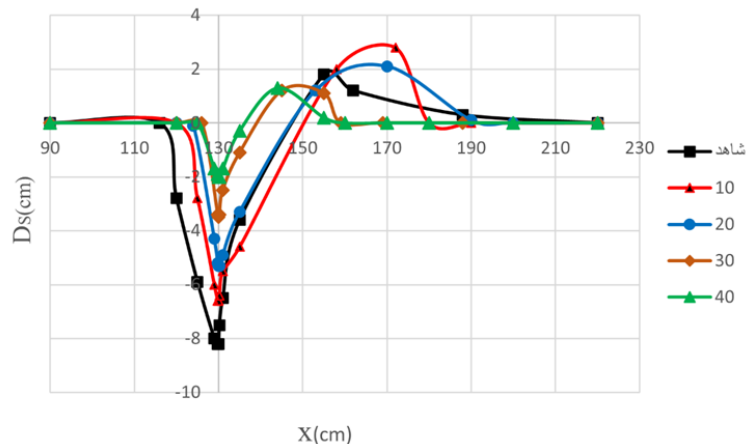
شکل (۱۵) به بررسی پروفیل طولی آبشستگی بستر پیرامون آبشکن، در نسبت $S/Ls = ۰/۰۵$ و نفوذپذیری ۱۰، ۲۰، ۳۰ و ۴۰ درصد در راستای دماغه آبشکن و مقایسه آن با حالت شاهد می پردازد. در این نمودار محور X در راستای طول کانال است. با توجه به شکل (۱۵) $x = ۱۳۰$ cm، موقعیت نصب آبشکن است.

با توجه به شکل (۱۵) پیشرفت پروفیل طولی بستر در حالت آزمایش شاهد بیشتر و نیز دارای بیشترین عمق آبشستگی است. این در حالی است که در نفوذپذیری ۴۰ درصد، پیشرفت پروفیل طولی آبشستگی کوچکتر و عمق آبشستگی نیز کمتر شده است. بر اساس شکل (۱۵)، با افزایش فاصله از آبشکن، عمق آبشستگی کاهش یافته است. عمق آبشستگی در $۰/۰۵ = S/Ls$ ، در حالت شاهد $۸/۲$ سانتی متر و در نفوذپذیری ۱۰، ۲۰، ۳۰ و ۴۰ درصد به ترتیب برابر $۶/۶$ ، $۵/۳$ ، $۳/۵$ و ۲ سانتی متر

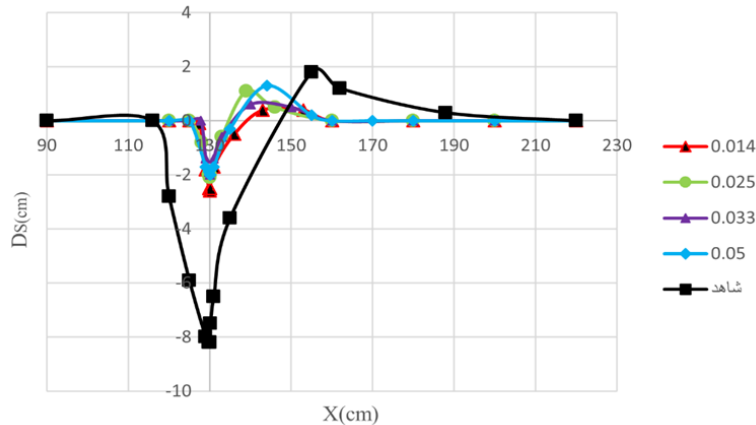
بوده است. با توجه به شکل (۱۵) مقدار رسوب‌گذاری در $X = 155 \text{ cm}$ و نفوذپذیری ۱۰ درصد، $2/8$ سانتی‌متر اندازه‌گیری شده است. با مقایسه نتایج می‌توان دریافت که آبشکن نفوذپذیر در مقایسه با آبشکن نفوذناپذیر دارای عملکرد بهتری است و میزان آبستستگی و رسوب‌گذاری کاهش یافته است. این نتیجه با تحقیقات Teraguchi و همکاران (2008) نیز تطابق دارد. شکل (۱۶) به بررسی پیشرفت پروفیل طولی بستر در $P = 40$ درصد و نسبت‌های مختلف S/Ls از $0/05$ تا $0/14$ در راستای دماغه آبشکن و مقایسه آن با حالت شاهد می‌پردازد. با توجه به شکل (۱۶) در نفوذپذیری ۴۰ درصد با افزایش نسبت S/Ls از $0/05$ تا $0/14$ ، پیشرفت پروفیل طولی کاهش داشته است. مقدار عمق آبستستگی در محل دماغه آبشکن ($X = 130 \text{ cm}$) در نسبت‌های مختلف S/Ls ، $0/05$ ، $0/033$ ، $0/025$ ، $0/014$ و $0/05$ به ترتیب $2/6$ ، $2/1$ ، 2 و 2 سانتی‌متر اندازه‌گیری شد. بنابراین، بیشترین میزان عمق آبستستگی مربوط به پروفیل طولی آزمایش شاهد و کمترین میزان عمق آبستستگی مربوط به پروفیل طولی با نسبت $S/Ls = 0/05$ است.

در شکل (۱۶) میزان آبستستگی و رسوب‌گذاری در نفوذپذیری ۴۰ درصد و نسبت‌های مختلف S/Ls از $0/05$ تا $0/14$ ، تغییرات اندکی مشاهده شد. درحالی‌که این تغییرات در حالت شاهد بسیار بیشتر است. با افزایش فاصله از آبشکن در تمامی نسبت‌های S/Ls ، عمق آبستستگی روند کاهشی داشته است. با توجه به شکل (۱۶) بیشترین رسوب‌گذاری در حالت شاهد و کمترین رسوب‌گذاری بستر مربوط به $S/Ls = 0/014$ ($X = 143 \text{ cm}$) بوده است.

با توجه به شکل‌های (۱۵) و (۱۶) پیشرفت پروفیل طولی بستر، با افزایش نفوذپذیری و افزایش S/Ls ، در راستای دماغه آبشکن کاهش یافته است.



شکل ۱۵- پروفیل طولی بستر در $S/Ls = 0/05$ و نفوذپذیری ۱۰ تا ۴۰ درصد



شکل ۱۶- پروفیل طولی بستر در $P = 40$ درصد و نسبت‌های S/L_s از 0.014 تا 0.05 .

نمودارهای بی‌بعد عمق آبستنگی در دماغه آبشکن

هدف این تحقیق بررسی ابعاد روزنه‌ها پیرامون آبشکن نفوذپذیر است. بدین منظور آزمایش‌های مختلفی بر روی آبشکن نفوذناپذیر به عنوان آزمایش شاهد و آبشکن با نفوذپذیری‌های مختلف 0.10 ، 0.20 ، 0.30 و 0.40 درصد انجام گرفت. سپس حداکثر عمق آبستنگی پیرامون دماغه آبشکن اندازه‌گیری شد. نتایج حاصل در دو شکل (۱۷) و (۱۸) نشان داده است. شکل (۱۷) تغییرات نسبت عمق آبستنگی به طول آبشکن (D_s/L_s) در نفوذپذیری 0.10 تا 0.40 درصد را نشان می‌دهد.

با توجه به شکل (۱۷) مشاهده شد که نسبت D_s/L_s در نفوذپذیری‌های مختلف، روند کاهشی داشته است. این تغییرات در مقایسه با حالت شاهد بسیار چشمگیر است. این نتایج با پژوهش چام‌پور و کاشفی‌پور (۱۳۹۷) نیز تطابق دارد. بر اساس شکل (۱۷)، نسبت D_s/L_s در $S/L_s = 0.05$ و نفوذپذیری 0.10 ، 0.20 ، 0.30 و 0.40 درصد به ترتیب مقادیر 0.75 ، 0.50 و 0.28 اندازه‌گیری شد. این نسبت در حالت شاهد $1/17$ بوده است؛ بنابراین می‌توان گفت که با افزایش نفوذپذیری، نسبت عمق آبستنگی به طول آبشکن کاهش یافته است. این نتایج با پژوهش چام‌پور و کاشفی‌پور (۱۳۹۷)، Nath و Misra (2017) و اهدایی و کاشفی‌پور (۱۳۹۴) تطابق دارد.

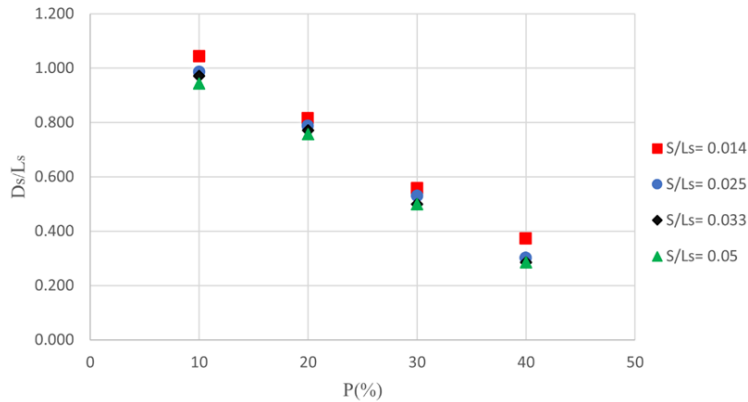
با توجه به شکل (۱۷) می‌توان دریافت که افزایش نفوذپذیری تأثیر قابل توجهی در کاهش آبستنگی در مقایسه با آبشکن نفوذناپذیر دارد که این نتیجه با پژوهش فرشاد و همکاران (۲۰۲۲) تطابق دارد.

شکل (۱۸) تغییرات نسبت عمق آبستنگی به طول آبشکن (D_s/L_s) در نسبت‌های مختلف S/L_s از 0.014 تا 0.05 را نشان می‌دهد. بر اساس شکل (۱۸) می‌توان دریافت که افزایش نسبت S/L_s بر روند آبستنگی پیرامون دماغه آبشکن تأثیرگذار است و سبب کاهش عمق آبستنگی می‌شود.

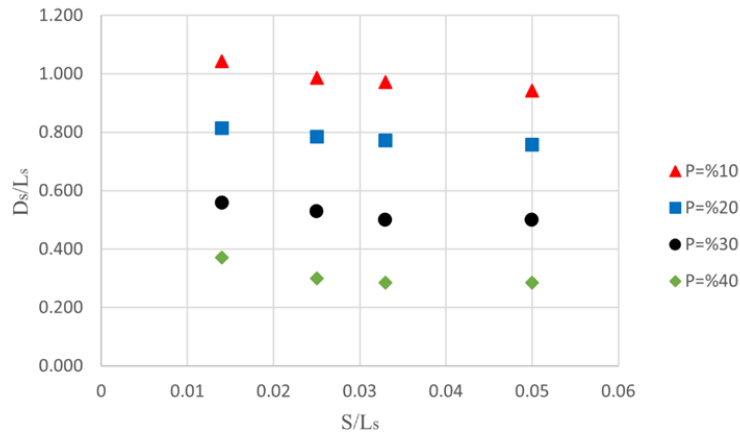
باتوجه به شکل (۱۸) نسبت D_s/L_s در نفوذپذیری 0.10 درصد و نسبت $S/L_s = 0.014$ در محل دماغه آبشکن $1/0.4$ اندازه‌گیری شد. اما در $S/L_s = 0.05$ این مقدار 0.94 است. به بیان دیگر در $P = 10$ درصد با افزایش نسبت S/L_s ، نسبت D_s/L_s در محل دماغه آبشکن 0.1 کاهش یافته و در مقایسه با آبشکن شاهد 0.23 کاهش یافته است. شکل (۱۸) نشان

می‌دهد که با کاهش نسبت S/L_s ، عمق آبشستگی افزایش می‌یابد؛ به طوری که در تمام نفوذپذیری‌ها، بیشترین مقدار آبشستگی در آبشکن با $S/L_s = 0/014$ رخ داده است.

با توجه به شکل‌های (۱۷) و (۱۸) مقدار D_s/L_s مربوط به آبشکن با نفوذپذیری ۴۰ درصد و نسبت $S/L_s = 0/05$ برابر با ۰/۲۸ اندازه‌گیری شد که این مقدار در مقایسه با حالت شاهد ۰/۸۹ کاهش یافته است. می‌توان دریافت که با افزایش درصد نفوذپذیری آبشکن (P) و افزایش نسبت ابعاد بازشدگی آبشکن به طول آبشکن (S/L_s)، مقدار عمق آبشستگی نسبت به حالت شاهد کاهش یافته است.



شکل ۱۷- تغییرات D_s/L_s در نفوذپذیری ۱۰ تا ۴۰ درصد



شکل ۱۸- تغییرات D_s/L_s در نسبت‌های مختلف S/L_s از ۰/۰۱۴ تا ۰/۰۵

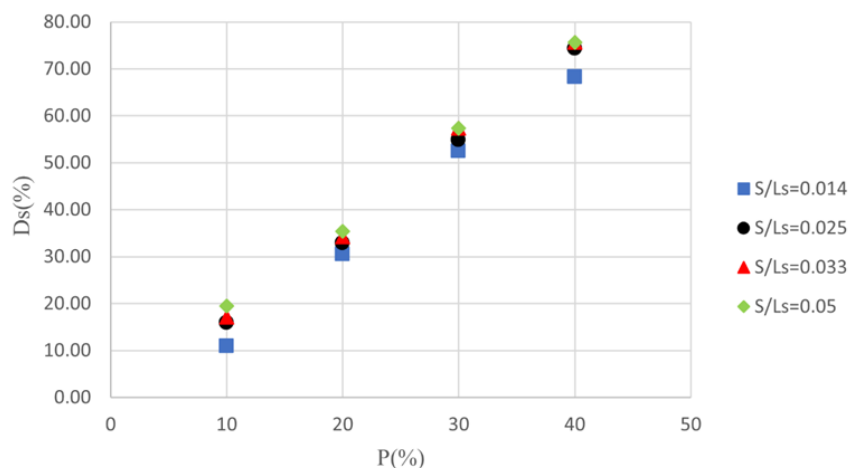
برای محاسبه درصد کاهش عمق آبشستگی دماغه آبشکن نسبت به حالت شاهد، از رابطه زیر استفاده شده است.

$$D_s (\%) = \frac{D_s(base) - D_s}{D_s(base)} \times 100 \quad \text{رابطه ۵}$$

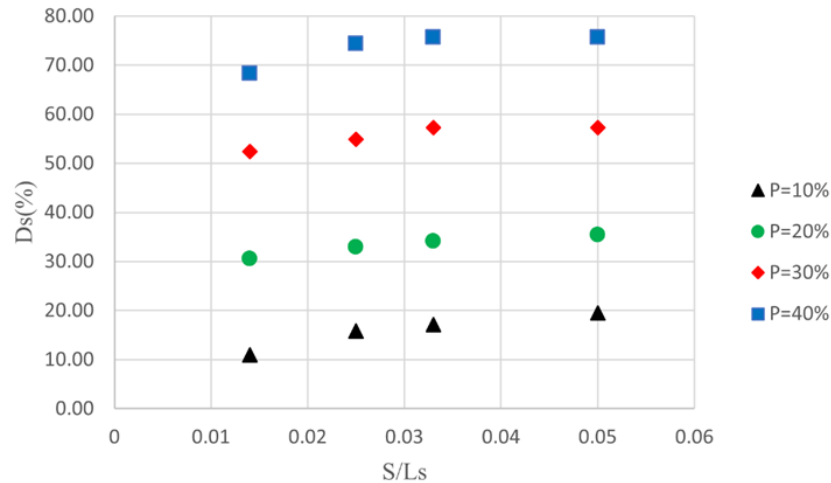
در این رابطه D_s (%) درصد کاهش عمق آبستگی، D_s (base) بیشینه عمق آبستگی در آزمایش شاهد و D_s بیشینه عمق آبستگی در آزمایش مورد نظر است.

شکل (۱۹) درصد کاهش عمق آبستگی دماغه آبشکن نسبت به حالت شاهد در نفوذپذیری ۱۰، ۲۰، ۳۰ و ۴۰ درصد و در نسبت‌های مختلف S/Ls از ۰/۰۱۴ تا ۰/۰۵ را نشان می‌دهد. بر اساس این نمودار درصد کاهش عمق آبستگی دماغه آبشکن نسبت به حالت شاهد با افزایش نفوذپذیری از ۱۰ به ۴۰ درصد، افزایش یافته است. با توجه به شکل (۱۹)، درصد کاهش عمق آبستگی دماغه آبشکن نسبت به حالت شاهد در نفوذپذیری ۱۰، ۲۰، ۳۰ و ۴۰ درصد و در $S/Ls = 0/05$ به ترتیب مقادیر ۱۹/۵، ۳۵/۳، ۵۷/۳ و ۷۵/۶ درصد بوده است. در نتیجه درصد کاهش عمق آبستگی دماغه آبشکن نسبت به حالت شاهد به میزان ۵۶/۱ درصد افزایش یافته است.

در شکل (۲۰) درصد کاهش عمق آبستگی در نسبت‌های مختلف S/Ls از ۰/۰۱۴ تا ۰/۰۵ و در نفوذپذیری‌های مختلف نشان داده شده است. همان‌طور که در شکل (۲۰) نشان داده شده است با افزایش S/Ls ، درصد کاهش عمق آبستگی دماغه آبشکن نسبت به حالت شاهد، افزایش یافته است. با توجه به شکل (۲۰) مشاهده می‌شود که درصد کاهش عمق آبستگی دماغه آبشکن نسبت به حالت شاهد در $P = 40$ ، در نسبت‌های مختلف S/Ls ، ۰/۰۱۴، ۰/۰۲۵، ۰/۰۳۳ و ۰/۰۵ به ترتیب مقادیر ۶۸/۲، ۷۴/۳، ۷۵/۶ و ۷۵/۶ درصد بوده است. با توجه به شکل (۲۰) مشاهده شد که این روند افزایشی، در سایر نفوذپذیری‌ها نیز تکرار شده است.



شکل ۱۹- تغییرات D_s (%) در نفوذپذیری ۱۰ تا ۴۰ درصد در نسبت‌های مختلف S/Ls



شکل ۲۰- تغییرات D_s (%) در S/L_s از $0/014$ تا $0/05$ در نفوذپذیری‌های مختلف

نتیجه‌گیری

در این پژوهش تأثیر ابعاد باز شدگی‌ها بر آبشستگی پیرامون آبشکن نفوذپذیر بررسی شده است. آزمایش‌ها در پژوهش حاضر، با ۴ نفوذپذیری ۱۰، ۲۰، ۳۰ و ۴۰ درصد، و چهار نسبت S/L_s برابر با $0/014$ ، $0/025$ ، $0/033$ و $0/05$ انجام پذیرفت. تمامی آزمایش‌ها در شرایط آب زلال، با تنظیم دبی و عمق در حد آستانه حرکت رسوبات ($U/U_c = 0/95$) انجام شد. نتایج نشان داد که حداکثر عمق آبشستگی در محل دماغه آبشکن در حالت شاهد (آبشکن نفوذناپذیر)، $8/2$ سانتی‌متر بوده است. همچنین به دلیل تشکیل گرداب نعل اسبی، رسوبات از بالای آبشکن شسته شد و در پایین دست آبشکن، تپه‌های ماسه‌ای تشکیل دادند. با افزایش نفوذپذیری و عبور جریان از منافذ آبشکن، جریان گردابه‌ای به خوبی تشکیل نمی‌شود و در نتیجه عمق آبشستگی کاهش می‌یابد. همچنین رسوب‌گذاری در پایین دست آبشکن نیز کاهش می‌یابد. به طور کلی نتایج نشان داد که افزایش نفوذپذیری (P) و افزایش نسبت ابعاد باز شدگی آبشکن به طول آبشکن (S/L_s)، سبب کاهش آبشستگی دماغه آبشکن می‌شود. در بازه اعداد مورد مطالعه تحقیق، آبشکن با نفوذپذیری ۴۰ درصد و نسبت ابعاد باز شدگی $0/05$ ، حالت بهینه آبشکن برای کاهش آبشستگی پیرامون آبشکن بوده است.

منابع

- اکبری، س. ۱۳۹۳. بررسی آزمایشگاهی کنترل آبشستگی در شرایط وجود پایه پل و آبشکن با سنگچین، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه تبریز، ایران.
- اهدایی، پ. و کاشفی پور، س. م. ۱۳۹۴. بررسی آزمایشگاهی اثر زاویه و نفوذپذیری تک آبشکن بر روی ابعاد چاله آبشستگی در شرایط غیر مستغرق. علوم و مهندسی آبیاری، ۳۸(۴)، ۱۵-۲۴.

- چام پور، م. کاشفی پور، س. م. ۱۳۹۷. بررسی آزمایشگاهی اثر نفوذپذیری و طول سری آبشکن‌ها بر ابعاد چاله آبستنگی در شرایط غیر مستغرق در قوس ۹۰ درجه ملایم. *علوم و مهندسی آبیاری*، ۴۰(۳)، ۳۵-۴۸.
- چراغچی، س. شفاعی بجستان، م. ۱۳۹۹. بررسی آزمایشگاهی تاثیر نفوذپذیری سازه ترکیبی آبشکن و صفحه مثلثی بر تغییرات توپوگرافی بستر در قوس ۱۸۰ درجه ملایم. *علوم و مهندسی آبیاری*، ۴۵(۴)، ۱۵-۳۰.
- دهقانی، ا.ا.، برزعلی، م.، فضل اولی، ر.، ضیاء تباراحمدی، م. خ. ۱۳۸۸. مطالعه آزمایشگاهی آبستنگی موضعی اطراف سری آبشکن‌های L شکل. *پژوهش‌های حفاظت آب و خاک*، ۱۶(۳)، ۱۴۱-۱۶۲.
- رضانی، ی.، قمشی، م.، موسوی جهرمی، س. ح. ۱۳۹۱. اثر طول تکیه‌گاه بر آبستنگی تکیه‌گاه پل در کانال‌های با مقطع مرکب. *دانش آب و خاک*، ۲۲(۳)، ۱۱۴-۱۰۳.
- رضانی، ی.، قمشی، م.، موسوی جهرمی، س. ح.، خزیمه نژاد، ح. ۱۳۹۳. تأثیر پوشش گیاهی دشت سیلابی بر آبستنگی تکیه‌گاه پل در مقطع مرکب. *آب و خاک*، ۲۸(۳)، ۵۱۲-۵۰۳.
- رضانی، ی.، قمشی، م.، موسوی جهرمی، س. ح. ۱۳۹۳. پیش‌بینی عمق آبستنگی تکیه‌گاه پل در کانال‌ها با مقطع مرکب. *پژوهش آب/یران*، ۸(۱)، ۱۱۷-۱۰۹.
- شریعتی، ح. ۱۳۸۸. بررسی عملکرد طوق و شکاف در کاهش آبستنگی پایه پل، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، *دانشگاه فردوسی مشهد*، ایران.
- شهبابی، م. ۱۳۹۴. بررسی آزمایشگاهی اثر نفوذپذیری و فاصله بر روی ابعاد آبستنگی اطراف آبشکن نفوذپذیر در قوس ملایم ۹۰ درجه، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، *دانشگاه شهید چمران اهواز*، ایران.
- صانعی، س. م. ۱۳۸۹. بررسی کاربرد آبشکن فرعی در کاهش آبستنگی در جلوی آبشکن‌ها. *پژوهش‌های آبخیزداری (پژوهش و سازندگی)*، ۲۳(۸۸)، ۱۱-۱۶.
- قانعی گزل آباد، ن.، منصور، م. ۱۳۹۸. بررسی عمق، طول و عرض آبستنگی آبشکن نفوذپذیر در رودخانه. *فصلنامه علمی و تخصصی مهندسی آب*، ۱۷(۱)، ۴۵-۳۰.
- کریمی، م.، قمشی، م.، رضانی، ی. ۱۳۹۴. اثر احداث دیوار موازی بر کاهش آبستنگی پیرامون تکیه‌گاه پل در مقطع مرکب. *پژوهش‌های حفاظت آب و خاک*، ۲۲(۳)، ۱۶۴-۱۵۱.
- نظری، ح. ۱۴۰۰. بررسی عددی و آزمایشگاهی تاثیر نفوذپذیری آبشکن چوگانی بر میزان آبستنگی و مقایسه آن با آبشکن L شکل، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، *دانشگاه بوعلی سینا همدان*، ایران.
- یباره پور، ا.، کاشفی پور، س. م. ۱۳۹۳. مقایسه توپوگرافی بستر برای سری آبشکن‌های نفوذپذیر و نفوذناپذیر. *علوم و مهندسی آبیاری*، ۳۷(۴)، ۸۶-۷۷.

Akbari, S. 2014. Laboratory study of scour control in the presence of bridge pier and spur dike with riprap. M.Sc. thesis, *University of Tabriz*, Iran (in Persian).

Barbhuiya, A. K., Dey, S. 2004. Local scour at abutments: A review. *Sadhana*, 29, 449-476.

Champour, M., Kashefipour, S. M. 2018. Laboratory study of the effect of permeability and length of spur dike series on scour hole dimensions in non-submerged conditions in a mild 90-degree bend. *Irrigation Sciences and Engineering*, 40(3), 35-48 (in Persian).

Cheraghchi, S., Shafai Bejestan, M. 2020. Laboratory study of the impact of the permeability of a combined spur dike and triangular plate structure on the topographic changes of the bed in a mild 180-degree bend. *Irrigation Sciences and Engineering*, 45(4), 15-30 (in Persian).

- Dehghani, A. A., Barzali, M., Fazlola, R., Zia Tabar Ahmadi, M. K. 2009. Laboratory study of local scour around L-shaped spur dike series. *Water and Soil Conservation*, 16(3), 141-162 (in Persian).
- Dey, S., Barbhuiya, A. K. 2005. Time variation of scour at abutments. *Journal of Hydraulic Engineering*, 131(1), 11-23.
- Ehdaei, P., Kashefipour, S. M. 2015. Laboratory study of the effect of angle and permeability of single spur dike on the dimensions of scour hole in non-submerged conditions. *Irrigation Sciences and Engineering*, 38(4), 15-24 (in Persian).
- Esmaeli, P., Boudaghpour, S., Rostami, M., Mirzaee, M. 2022. Experimental investigation of permeability and length of a series of spur dikes effects on the control of bank erosion in the meandering channel. *Ain Shams Engineering Journal*, 13(4), 101701.
- Ezzeldin, R. M. 2019. Numerical and experimental investigation for the effect of permeability of spur dikes on local scour. *Journal of Hydroinformatics*, 21(2), 335-342.
- Farshad, R., Kashefipour, S. M., Ghomeshi, M., Oliveto, G. 2022. Temporal scour variations at permeable and angled spur dikes under steady and unsteady flows. *Water*, 14(20), 3310.
- Garde, R. J., Subramanya, K., Nambudripad, K. D. 1961. Study of scour around spur-dikes. *Journal of the Hydraulics Division*, 87(6), 23-37.
- Gill, M. A. 1972. Erosion of sand beds around spur dikes. *Journal of the Hydraulics Division*, 98(9), 1587-1602.
- Karimi, M., Ghomeshi, M., Ramezani, Y. 2015. The effect of constructing parallel wall on reducing scour around bridge abutment in compound channels. *Water and Soil Conservation*, 22(3), 151-164 (in Persian).
- Khozaymehnezhad, H., Ghomeshi, M., Ramezani, Y. 2016. Laboratory Investigation of Performance of L-shaped Collar on Reduction of Local Scour Around Bridge abutment. *Ferdowsi Civil Engineering*, 27(2), 43-56.
- Kumar, V., Raju, K. G. R., Vittal, N. 1999. Reduction of local scour around bridge piers using slots and collars. *Journal of Hydraulic Engineering*, 125(12), 1302-1305.
- Melville, B. W., Chiew, Y. M. 1999. Time scale for local scour at bridge piers. *Journal of Hydraulic Engineering*, 125(1), 59-65.
- Melville, B. W. 1992. Local scour at bridge abutments. *Journal of Hydraulic Engineering*, 118(4), 615-631.
- Nasrollahi, A., Ghodsian, M., Neyshabouri, S. S. 2008. Local scour at permeable spur dikes. *Journal of Applied Sciences*, 8(19), 3398-3406.
- Nath, D., Misra, U. K. 2017. Experimental study of local scour around single spur dike in an open channel. *International Research Journal of Engineering and Technology*, 4(6), 2728-2734.
- Nazari, H. 2021. Numerical and laboratory study of the impact of permeable hockey stick spur dike on scour depth in comparison with L-shaped spur dike. M.Sc. thesis, *Bu-Ali Sina University*, Iran (in Persian).
- Pandey, M., Valyrakis, M., Qi, M., Sharma, A., Lodhi, A. S. 2021. Experimental assessment and prediction of temporal scour depth around a spur dike. *International Journal of Sediment Research*, 36(1), 17-28.
- Qanei Gozal Abad, N., Mansouri, M. 2019. Study of depth, length, and width of scour around permeable spur dike in river. *Quarterly Journal of Water Engineering*, 7(1), 30-45 (in Persian).
- Ramezani, Y., Ghomeshi, M., Mousavi Jahromi, S. H. 2012. The effect of abutment length on bridge abutment scour in compound channels. *Water and Soil Science*, 22(3), 103-114 (in Persian).

- Ramezani, Y., Ghomeshi, M., Mousavi Jahromi, S. H. 2014. Prediction of bridge abutment scour depth in compound channels. *Iranian Water Research*, 8(1), 109-117 (in Persian).
- Ramezani, Y., Ghomeshi, M., Mousavi Jahromi, S. H., Khozaymehnezhad, H. 2014. The impact of vegetation cover in floodplains on bridge abutment scour in compound channels. *Water and Soil*, 28(3), 503-512 (in Persian).
- Sadeghi, F., Ramezani, Y., Khozaymehnezhad, H. 2018. Effect of submergence ratio of parallel wall on bridge abutment scour. *Alexandria engineering journal*, 57(4), 2659-2665.
- Sanei, S. M. 2010. Investigation of the application of secondary spur dike in reducing scour in front of spur dikes. *Watershed Management Research (Research and Construction)*, 23(88), 11-16 (in Persian).
- Shahabi, M. 2015. Laboratory study on the effect of permeability and spacing on the dimensions of scour around permeable spur dike in a mild 90-degree bend. M.Sc. thesis, *Shahid Chamran University of Ahvaz*, Iran (in Persian).
- Shariati, H. 2009. Investigation of the performance of collar and slot in reducing bridge pier scour. M.Sc. thesis, *Ferdowsi University of Mashhad*, Iran (in Persian).
- Teraguchi, H., Nakagawa, H., Muto, Y., Baba, Y., Zhang, H. 2008. Flow and sediment transport around impermeable or permeable groins. *Proceedings of hydraulic Engineering*, 52, 175-180.
- Vittal, N., Kothiyari, U. C., Haghghat, M. 1994. Clear-water scour around bridge pier group. *Journal of Hydraulic Engineering*, 120(11), 1309-1318.
- Yebareh Pour, A. Kashefipour, S. M. 2014. Comparison of bed topography for permeable and impermeable spur dike series. *Irrigation Sciences and Engineering*, 37(4), 77-86 (in Persian).