

Investigation on the structure of turbulent flow and determining the distance between sequences spur dikes

M. Panjipour¹, M. Heidarpour^{2*} and S. Salehi³

Extended Abstract

Introduction:

Riverbank and canal erosion significantly disrupt the morphological and ecological equilibrium of river systems, posing serious threats to aquatic habitats, agricultural lands, infrastructure, and human settlements in riparian zones. This degradation not only contributes to the loss and reduction of adjacent land areas but also diminishes water quality by increasing sediment load and turbidity. Among various hydraulic countermeasures, breakwaters have proven to be one of the most effective and practical solutions for controlling and mitigating erosion along riverbanks and canal shores. These structures are primarily employed to deflect and redirect the flow of water away from vulnerable banks towards the center of the channel, thereby reducing the shear stress acting on the banks and preventing further erosion. The widespread use of breakwaters in river engineering is largely attributed to their cost-effectiveness, ease of installation, and adaptability to various environmental conditions. Breakwaters are classified according to several criteria. Based on construction material, they may be composed of wood, concrete, stone, or composite materials. In terms of permeability, breakwaters are categorized as permeable (which allow partial flow through the structure, promoting energy dissipation and sediment deposition) and impermeable (which fully obstruct the flow and divert it more sharply). With respect to submergence, they can be either submerged or non-submerged, influencing how they interact with surface flows. Functionally, breakwaters are designed to serve distinct roles: energy-absorbing (to reduce flow momentum), energy-dissipating (to break turbulence and eddies), or water-diverting (to change the direction of the main current). While impermeable breakwaters create strong deflection zones, permeable ones reduce the velocity of flow gradually, thus offering a more natural transition and enhanced sediment stabilization. Understanding these classifications and their hydraulic impacts is crucial for selecting appropriate breakwater configurations in river restoration and erosion control projects.

Methods:

To analyze the hydraulic behavior of flow and turbulence structures around spur dikes, a comprehensive series of controlled laboratory experiments was conducted. The accuracy and reliability of the results were ensured by an optimized experimental design, precise and calibrated measurement instruments, and well-defined geometric configurations of the experimental setup. All experiments were performed in a glass flume, located at the Hydraulic Laboratory of Isfahan University of Technology, which was a specialized experimental channel with a length of 15 meters, a width of 0.9 meters, and a height of 0.6 meters. The flume was equipped with a high-precision feeding pump, a digital flowmeter to accurately measure discharge, and an energy dissipator installed at the inlet to stabilize flow. Water was supplied continuously from two interconnected reservoirs to ensure steady flow conditions throughout the experiments. Water depth measurements were conducted using a rail depth gauge with an accuracy of ± 1 mm. A tailgate located at the downstream end of the flume allowed precise control of flow depth and submergence conditions. Flow visualization techniques were employed using a dye injection system with potassium permanganate, enabling clear identification of recirculation zones and stagnation points within the flow field. The flow entered the flume through a calming tank and a stilling basin, ensuring fully developed flow profiles over an approach length of 10 meters before reaching the spur dikes. Two types of spur dikes were examined: impermeable structures made of stone and

1- M.Sc. Student, Water Structure Engineering, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran.

2- Professor, Department of Water Engineering, Faculty of Agriculture, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran.

3- Dept. of Civil Engineering, Lakehead University, Thunder Bay, Canada

* Corresponding Author: heidar@iut.ac.ir

Received: 2025/05/29

Accepted: 2025/06/18

permeable structures constructed from gabions. The impermeable dikes had widths of 20, 30, and 50 cm, whereas the permeable dikes maintained a constant width of 30 cm with a porosity of approximately 41%. The first spur dike was positioned 7.5 meters from the inlet. Various submergence levels, including non-submerged, semi-submerged, and fully submerged conditions, were tested, defined by the submergence ratio $Sr = h/H$. In total, 39 tests were conducted under a wide range of flow rates and structural configurations. The detailed results and analyses are provided in the following sections.

Results:

This section presents the analysis of results obtained from 39 experimental tests, focusing on the characterization of recirculation zones downstream of permeable and impermeable spur dikes. The influence of hydraulic and structural parameters such as discharge rate, spur dikes width, submergence ratio, and porosity on the length of the recirculation zone was systematically evaluated. For impermeable spur dikes, tests were conducted with widths of 20, 30, and 50 cm under three flow discharges of 29, 49, and 65 L/s. Results showed that for narrower spur dikes, increasing submergence led to a shorter recirculation zone. At a width of 30 cm and a discharge of 29 L/s, increasing submergence ratio from 0.37 to 0.47 reduced the recirculation zone length from 105 cm to 90 cm. In contrast, wider spur dikes (50 cm) exhibited longer recirculation zones at higher discharges, reaching up to 205 cm at 65 L/s, likely due to greater flow deflection and enhanced vortex stability. In tests with permeable spur dikes (41% porosity, 30 cm width), the recirculation zones were consistently longer, reaching 208 cm at 65 L/s. This was attributed to smoother internal flow through the structure, leading to momentum diffusion and broader recirculation. To study the effect of spur dike spacing, a second dike was positioned at varying distances relative to the first. When placed precisely at the end of the first recirculation zone (160 cm), the second zone extended to 118 cm. However, placing the second spur dike at upstream (120 cm) or downstream (199 cm) reduced the length to 100 cm and 80 cm, respectively. These findings highlighted the importance of optimal spur dike spacing for maximizing flow control efficiency. In summary, spur dike width, porosity, and placement significantly affected flow structures. Wider and permeable spur dikes were more effective in forming extended recirculation zones, while optimal spacing between multiple spur dikes enhanced their combined performance.

Conclusion:

Based on the findings of this study, the hydraulic behavior of the stagnant zone formed downstream of scour protections was thoroughly investigated through a series of physical experiments under varying conditions, including flow discharge, spur dike width, porosity, and submergence levels. The results demonstrated that the spur dike width and flow discharge had a significant impact on the length of the stagnant zone. Increasing the spur dike width and discharge led to a noticeable extension of the stagnant zone, as these factors enhance the energy redistribution and recirculation of flow. In contrast, higher submergence ratios, especially in cases of deep submergence, reduced the stagnant zone length due to the diminished influence of the spur dike structure on the flow. Moreover, permeable spur dikes were more effective in forming a larger stagnant zone than impermeable ones, aligning with previous studies. Additionally, the positioning of a second spur dike had a notable effect, with its placement at the end of the stagnant zone providing the best performance in terms of reducing lateral erosion. Overall, the optimal design of spur dike configurations requires a careful balance of hydraulic and geometric factors to enhance hydraulic stability and mitigate erosion in waterway structures.

Keywords: Gabion, Hydraulic structure, Optimum distance, Permeability, Spur dike, Stagnant area

Citation: Panjipour, M., Heidarpour, M., and Salehi, S. 2025. Investigation on the structure of turbulent flow and determining the distance between sequences spur dikes. *Iranian Water Research Journal*. 58(3). pp.93-106. <https://dx.doi.org/10.22034/iwrj.2025.15236.2690>.



بررسی ساختار جریان آشفته و تعیین فاصله در بین آب‌شکن‌های متوالی

مهدی پنجی‌پور^۱، منوچهر حیدرپور^۲ و سعید صالحی^۳

چکیده

این پژوهش با هدف بررسی جامع فاصله بهینه میان آب‌شکن‌های متوالی، با تمرکز بر ویژگی‌های جریان آشفته و ناحیه سکون تشکیل شده در پایین‌دست، به صورت آزمایشگاهی انجام شده است. آزمایش‌ها در یک فلوم مستطیلی آزمایشگاهی با استفاده از دو نوع آب‌شکن نفوذپذیر (از نوع گابیونی با تخلخل ۴۱ درصد) و نفوذناپذیر، در سه عرض مختلف (۲۰، ۳۰ و ۵۰ سانتی‌متر) و تحت شرایط مختلف هیدرولیکی شامل سه دبی جریان (۲۹، ۴۹ و ۶۵ لیتر بر ثانیه) و نسبت‌های متفاوتی از استغراق، اجرا شدند. به منظور تعیین دقیق طول ناحیه سکون، از روش تزریق رنگ برای ردیابی الگوهای جریان استفاده شد. نتایج نشان داد که افزایش عرض آب‌شکن و دبی جریان موجب افزایش قابل توجه در طول ناحیه سکون می‌شود و با افزایش نسبت استغراق، طول ناحیه سکون کاهش قابل ملاحظه‌ای می‌یابد. دلیل این کاهش آن است که در حالت استغراق بالا، تأثیر سازه بر جریان پایین‌دست کاهش می‌یابد، در نتیجه ساختار گردابه‌ها تضعیف شده و ناحیه سکون کوچک‌تری ایجاد می‌شود. همچنین آب‌شکن‌های نفوذپذیر، به دلیل ویژگی کاهش تمرکز جریان، ناحیه سکون بزرگ‌تری نسبت به آب‌شکن‌های نفوذناپذیر ایجاد کردند. در این آزمایش نسبت فاصله به عرض آب‌شکن در بازه‌ی ۲ تا ۷ قرار گرفت و تحلیل‌ها نشان دادند که فاصله بهینه میان آب‌شکن‌ها زمانی حاصل می‌شود که ابتدای آب‌شکن بعدی در انتهای ناحیه سکون آب‌شکن قبلی قرار گیرد. این وضعیت منجر به حداکثرسازی اثربخشی سازه در کاهش سرعت جریان و بهبود عملکرد آن در کنترل فرسایش سواحل می‌گردد. در ادامه، یک رابطه تجربی بر پایه داده‌های آزمایشگاهی برای برآورد فاصله بهینه آب‌شکن‌ها استخراج شد. یافته‌های این تحقیق می‌تواند راهنمای مناسبی برای بهینه‌سازی طراحی سیستم‌های آب‌شکن در پروژه‌های مهندسی رودخانه باشد و درک بهتری از فرآیندهای هیدرولیکی مؤثر در پایداری سازه‌های ساحلی فراهم آورد.

واژه‌های کلیدی: آب‌شکن، فاصله بهینه، فرسایش سواحل، گابیون، ناحیه سکون، نفوذپذیری.

ارجاع: پنجی‌پور، م.، حیدرپور، م. و صالحی، س. ۱۴۰۴. بررسی ساختار جریان آشفته و تعیین فاصله در بین آب‌شکن‌های متوالی. مجله پژوهش آب ایران، ۵۸(۳)، صص. ۹۳-۱۰۶. <https://dx.doi.org/10.22034/iwrj.2025.15236.2690>

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی سازه‌های آبی، دانشگاه صنعتی اصفهان

۲- استاد گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه صنعتی اصفهان

۳- گروه مهندسی عمران، دانشگاه لیک هد، تاندر بی، اونتاریو، کانادا

* نویسنده مسئول: heidar@iut.ac.ir

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۳/۲۸

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۳/۰۸

مقدمه

فرسایش سواحل رودخانه‌ها یکی از مسائل مهم در مدیریت منابع آبی و حفاظت از زیستگاه‌ها، اراضی کشاورزی و زیرساخت‌های اطراف رودخانه‌ها به شمار می‌آید. این پدیده به‌ویژه در مناطقی با جریان‌های پرانرژی یا نوسانات شدید فصلی، نمود بیشتری پیدا می‌کند (Arora et al., 2023; Chardon et al., 2022). در میان روش‌های مختلف برای کنترل فرسایش سواحل، استفاده از سازه‌هایی مانند آب‌شکن‌ها، که به طور معمول از کناره رودخانه‌ها به سمت بستر آن امتداد می‌یابند، از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. آب‌شکن‌ها به دلیل توانایی در هدایت جریان و کاهش سرعت آن در مناطق نزدیک به ساحل، به طور گسترده‌ای به‌عنوان یکی از راهکارهای مؤثر در کاهش فرسایش استفاده می‌شوند (Wu et al., 2005; Yang et al., 2022). این سازه‌ها با ایجاد ناحیه‌ای کم‌سرعت به نام ناحیه سکون در پایین‌دست خود، شرایطی را برای رسوب‌گذاری و حفاظت از سواحل فراهم می‌کنند (Zhang et al., 2012). ابعاد ناحیه سکون به عواملی همچون عرض آب‌شکن، دبی جریان، نسبت استغراق و ویژگی‌های نفوذپذیری سازه بستگی دارد (Hu et al., 2020; Shampa et al., 2020). در میان انواع مختلف آب‌شکن‌ها، آن‌هایی که نفوذپذیر هستند، به‌ویژه انواع گابیونی، به دلیل هزینه کم، سازگاری بالاتر با محیط‌زیست و سهولت در اجرای آنها، به‌ویژه در کشورهای در حال توسعه، گزینه مناسبی برای کاهش فرسایش سواحل شناخته می‌شوند (Iqbal et al., 2021). با این حال، در حالی که آب‌شکن‌های منفرد به طور گسترده‌ای مورد استفاده قرار گرفته‌اند، مطالعات کمی به بهینه‌سازی فاصله بین آب‌شکن‌های متوالی، به ویژه آب‌شکن‌های نفوذپذیر، پرداخته‌اند (Pandey et al., 2018; Ezzeldin, 2019). پژوهش‌ها نشان می‌دهند که فاصله‌گذاری نامناسب میان آب‌شکن‌ها، چه در فواصل بسیار نزدیک و چه در فواصل زیاد، می‌تواند کارایی این سازه‌ها را تحت تأثیر قرار دهد. در فواصل کم، برهم‌کنش‌های جریان بین آب‌شکن‌ها باعث تشدید نوسانات می‌شود؛ در حالی که در فواصل زیاد، پیوستگی جریان از بین می‌رود. با این حال، هنوز رابطه دقیقی میان فاصله‌گذاری و الگوهای جریان آشسته در اطراف این سازه‌ها شناسایی نشده است. در همین راستا، مطالعات اخیر بر اهمیت عواملی چون وضعیت استغراق، عدد فرود و تخلخل در شکل‌گیری الگوهای جریان و فرسایش تأکید دارند. روش‌های عددی و آزمایشگاهی، از جمله تصویربرداری‌های دقیق جریان و شبیه‌سازی‌های

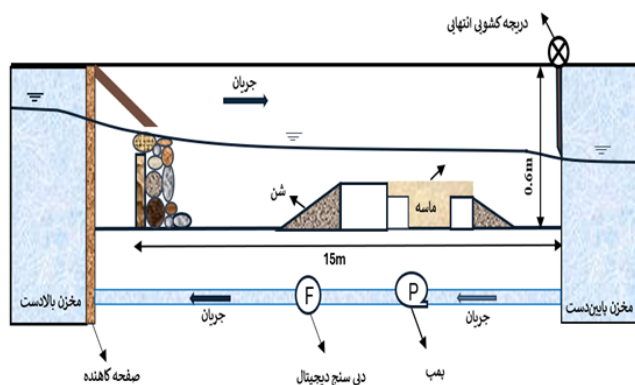
نرم‌افزاری مانند Flow-3D، ابزارهای مؤثری برای تحلیل این فرآیندها فراهم کرده‌اند (Zhang et al., 2013). در این زمینه، Duan (2009) با بررسی میدان جریان آشسته سه‌بعدی اطراف یک آب‌شکن در یک کانال روباز آزمایشگاهی، نشان داد که تنش‌های برشی بستر در پایین‌دست آب‌شکن به طور قابل توجهی افزایش می‌یابند. این یافته‌ها اهمیت طراحی دقیق سازه‌های هیدرولیکی در کاربردهای حفاظتی سواحل را برجسته می‌سازد. همچنین Gill (1972) با انجام آزمایش‌هایی روی کانال‌های آبی با بستر ماسه‌ای، دریافت که عمق آبشستگی در شرایط تعادل به اندازه و نوع مواد بستر بستگی دارد. Koken (2011) در مطالعه‌ای آزمایشگاهی روی آب‌شکن‌های منفرد، تأثیر زاویه جریان ورودی را بر ساختارهای جریان آشسته بررسی کرد. نتایج این مطالعه نشان داد که زاویه جریان ورودی تأثیر زیادی بر اندازه و جهت‌گیری گردابه‌های جریان پیرامون آب‌شکن دارد. در زاویه‌های مختلف جریان ورودی، سیستم گردابه نعلی‌شکل به شکلی متفاوت عمل می‌کند و در زاویه ۹۰ درجه، بزرگ‌ترین اندازه و انسجام را از خود نشان می‌دهد. Karami et al. (2011) با استفاده از مدل‌های عددی و تجربی، تأثیر نوع آب‌شکن‌ها را بر آبشستگی موضعی بررسی کردند و نشان دادند که آب‌شکن‌های غیرنفوذپذیر بیشترین تأثیر را بر عمق آبشستگی دارند. Zhang et al. (2013) نیز با شبیه‌سازی‌های عددی ترکیبی از آب‌شکن‌های نفوذپذیر و نفوذناپذیر را بررسی کرده و مدل‌های رگرسیونی برای پیش‌بینی عمق آبشستگی پیشنهاد دادند. Ezzeldin (2019) در بررسی‌های خود نشان داد که آب‌شکن‌های نفوذپذیر در کاهش عمق آبشستگی نسبت به آب‌شکن‌های غیرنفوذپذیر مؤثرتر هستند. علاوه بر این، عدد فرود نیز تأثیر چشمگیری بر شکل‌گیری الگوهای فرسایش داشت. Jarrahzadeh et al. (2017) اثر زاویه قرارگیری آب‌شکن‌های نفوذپذیر، نفوذناپذیر و باندال لایک که ترکیبی از نفوذپذیر و نفوذناپذیر است را مورد مطالعه قرار دادند. آن‌ها به این نتیجه رسیدند که حداکثر عمق آبشستگی در آب‌شکن نفوذناپذیر در زاویه ۹۰ درجه و در آب‌شکن نفوذپذیر و باندال لایک در زاویه ۱۲۰ درجه اتفاق می‌افتد. مطالعات اخیر، از جمله تحقیق Aung et al. (2023) به بررسی تأثیر چیدمان آب‌شکن‌های متوالی بر عمق و الگوی آبشستگی پرداخته‌اند. نتایج این تحقیق نشان داد که در صورت چیدمان مناسب آب‌شکن‌ها، می‌توان از فرسایش بیشتر جلوگیری کرد. همچنین، تحقیقات Kang et al. (2023) به بررسی پارامتر بیداری و تأثیر آن بر جریان‌های پیرامون

جزئیات مربوط به ابعاد، جنس و نحوه استقرار آب‌شکن‌ها در بستر کانال ارائه می‌شود. همچنین فرآیند برداشت داده‌ها، مؤلفه‌های هیدرولیکی ثبت‌شده و شیوه اجرای آزمایش‌ها توضیح داده شده و در نهایت، مروری کلی بر روند آزمایش‌ها و اهداف آن‌ها ارائه خواهد شد.

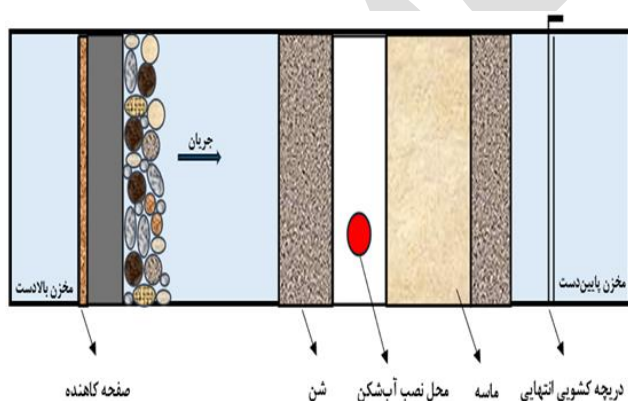
تجهیزات آزمایشگاهی

مشخصات کانال آزمایشگاهی

کلیه آزمایش‌ها در دانشگاه صنعتی اصفهان در یک کانال آزمایشگاهی با طول ۱۵ متر، عرض ۰/۹ متر و ارتفاع ۰/۶ متر انجام شد. این کانال از جنس شیشه و دارای پمپ تغذیه، دی‌سنج دیجیتال و صفحه کاهنده انرژی در ورودی است. آب از طریق دو مخزن متصل به یکدیگر وارد سیستم می‌شود. کانال مذکور شرایط مناسبی را برای بررسی جریان توسعه‌یافته فراهم می‌سازد. در شکل ۲، نمای شماتیک افقی کانال و شکل ۳ نمای شماتیک قائم کانال ارائه شده‌است.



شکل ۲- نمای شماتیک افقی کانال آزمایشگاه

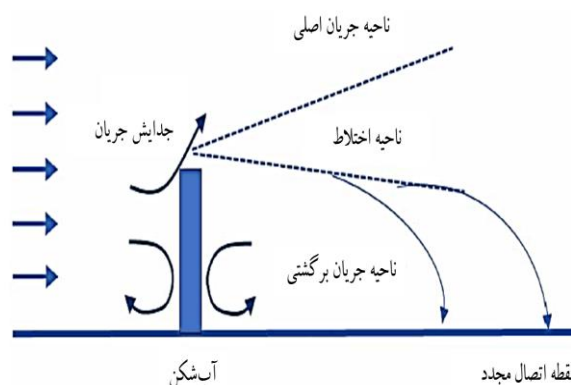


شکل ۳- نمای شماتیک قائم کانال آزمایشگاه

آب‌شکن‌ها پرداختند. نتایج نشان داد که در نسبت‌های مختلف طول به عمق، تغییرات قابل توجهی در الگوهای جریان و توزیع تنش‌های برشی ایجاد می‌شود. در نهایت، تحقیقات Akbar et al. (2024) و Li et al. (2024) به بررسی تأثیر خم‌های مختلف کانال بر عمق و الگوی فرسایش پرداختند. نتایج این پژوهش‌ها نشان می‌دهد که ویژگی‌های مختلف آب‌شکن‌ها، از جمله تخلخل و زاویه قرارگیری، تأثیرات قابل توجهی بر فرآیندهای آبستکی در کانال‌ها دارند.

الگوی جریان اطراف آب‌شکن

جریان عبوری از اطراف آب‌شکن را می‌توان به چند ناحیه مجزا شامل: ناحیه جریان اصلی، لایه برشی، ناحیه بازگشت جریان و ناحیه اتصال مجدد تقسیم‌بندی کرد. در شکل ۱ انواع جریان در اطراف آب‌شکن قابل مشاهده است.



شکل ۱- انواع جریان در اطراف آب‌شکن

با توجه به خلأهای موجود در پژوهش‌های موجود، این مطالعه با هدف تعیین فاصله بهینه بین آب‌شکن‌های متوالی، به بررسی ساختار جریان آشفته و رفتار ناحیه سکون در شرایط مختلف هیدرولیکی می‌پردازد. یافته‌های این پژوهش می‌تواند در بهبود طراحی‌های مهندسی رودخانه و افزایش اثربخشی راهکارهای کنترل فرسایش مؤثر واقع شود.

مواد و روش‌ها

به‌منظور تحلیل دقیق رفتار جریان و بررسی ساختارهای آشفته‌گی پیرامون آب‌شکن‌ها، بهره‌گیری از داده‌های تجربی در محیط‌های کنترل‌شده آزمایشگاهی الزامی است.

در این راستا، طراحی بهینه آزمایش‌ها، انتخاب تجهیزات اندازه‌گیری دقیق و تعریف ویژگی‌های هندسی مناسب برای مدل‌ها، تأثیر مستقیم بر صحت و قابلیت اتکای نتایج دارند. در این بخش، ابتدا مشخصات هندسی کانال آزمایشگاهی و تجهیزات به‌کاررفته برای برداشت داده‌ها تشریح می‌گردد. سپس

تجهیزات اندازه‌گیری

الف) عمق‌سنج ریلی

برای اندازه‌گیری دقیق عمق جریان، از عمق‌سنج ریلی با دقت یک میلی‌متر استفاده شد که امکان نصب روی کانال و جابه‌جایی در طول آن را دارد.

ب) دریچه انتهایی

به‌منظور تنظیم سطح آب و امکان ایجاد شرایط استغراق، دریچه‌ای در انتهای کانال نصب شد. این دریچه شرایط هیدرولیکی متنوعی را در طول آزمایش‌ها فراهم می‌سازد.

ج) دستگاه تزریق رنگ

برای شناسایی مسیر جریان، الگوی گردابه‌ها و ناحیه سکون، از دستگاه تزریق رنگ استفاده شد. این سیستم شامل مخزن، پمپ، نازل و لوله‌های انتقال رنگ بوده و امکان تزریق مداوم یا پالسی رنگ را با دبی کنترل‌شده در نقاط مشخص کانال فراهم می‌آورد. در این آزمایش‌ها، محلول پرمنگنات به‌عنوان ماده ردیاب به‌کار برده شد. این سیستم همچنین قابلیت هم‌زمان‌سازی با سیستم‌های تصویربرداری را داراست.

سیستم آرام‌سازی جریان

به‌منظور دستیابی به جریان ورودی توسعه‌یافته، جریان خروجی از پمپ ابتدا وارد مخزن آرامش شده و سپس به‌صورت سرریز وارد حوضچه آرامش می‌گردد. طراحی این سامانه به‌گونه‌ای است که در فاصله‌ی ۷/۵ متر از ابتدای کانال، جریان به وضعیت پایدار هیدرولیکی می‌رسد. حذف آشفتگی‌های اولیه نقش مؤثری در افزایش دقت نتایج دارد.

تعیین شرایط آزمایش و مشخصات مدل

ویژگی‌های هندسی آب‌شکن‌ها

در این تحقیق از دو نوع آب‌شکن با ویژگی‌های نفوذپذیر و نفوذناپذیر استفاده شد. نمونه‌های نفوذناپذیر از جنس سنگ و نمونه‌های نفوذپذیر از گابیون ساخته شدند. ابعاد آب‌شکن‌های نفوذناپذیر به‌صورت عرض‌های ۲۰، ۳۰ و ۵۰ سانتی‌متر، با ضخامت ۲/۵ سانتی‌متر و ارتفاع ۳۵ سانتی‌متر در نظر گرفته شد. آب‌شکن نفوذپذیر نیز با عرض ۳۰ سانتی‌متر، ضخامت ۳ سانتی‌متر و تخلخل ۴۱ درصد طراحی شد. فاصله استقرار آب‌شکن اول از ابتدای کانال برابر با ۷/۵ متر تعیین شد.

ناحیه سکون جریان

در پایین‌دست آب‌شکن‌ها، ناحیه‌ای با سرعت جریان بسیار کم شکل می‌گیرد که با عنوان ناحیه سکون شناخته می‌شود. این ناحیه نقش مهمی در پدیده‌هایی نظیر رسوب‌گذاری، تغییرات مورفولوژیکی بستر و پایداری سازه‌ها ایفا می‌کند. شناخت

صحیح ابعاد و موقعیت این ناحیه، از اهداف اصلی پژوهش حاضر است.

بررسی وضعیت استغراق

وضعیت استغراق آب‌شکن‌ها با نسبت استغراق $S_r = h/H$ بیان می‌شود که در آن، h عمق جریان و H ارتفاع سازه است. بر این اساس، سه وضعیت غیرمستغرق، نیمه‌مستغرق و مستغرق مورد بررسی قرار گرفت.

روند انجام آزمایش‌ها

برای تعیین دقیق ناحیه سکون، رنگ به‌صورت کنترل‌شده در جریان تزریق و تصاویر و مشاهدات بصری از شکل‌گیری گردابه‌ها و خطوط جریان ثبت شد. در ادامه، آب‌شکن دوم در فواصل مختلف نسبت به آب‌شکن اول نصب گردید تا اثر موقعیت نسبی آن بر گسترش ناحیه سکون بررسی شود. در مجموع، ۳۰ آزمایش در شرایط مختلف انجام شد.

نتایج و بحث

در این فصل، تحلیل نتایج حاصل از ۳۰ آزمایش انجام‌گرفته ارائه و با بررسی دقیق روابط میان پارامترهای تأثیرگذار، به تعیین طول بهینه فاصله بین آب‌شکن‌ها پرداخته می‌شود. تمرکز اصلی این بخش، بررسی نحوه تشکیل ناحیه سکون در پایین‌دست آب‌شکن‌ها و تحلیل تأثیر عرض، دبی جریان، میزان استغراق و تخلخل سازه‌های مستغرق بر طول این ناحیه است.

تحلیل نتایج آزمایشگاهی

آب‌شکن‌های نفوذناپذیر

در مرحله نخست، آزمایش‌هایی روی آب‌شکن‌های نفوذناپذیر با عرض‌های ۲۰، ۳۰ و ۵۰ سانتی‌متر در سه دبی جریان ۲۹، ۴۹ و ۶۵ لیتر بر ثانیه انجام شد. هدف اصلی، بررسی تأثیر عوامل هندسی و هیدرولیکی بر طول ناحیه سکون در پایین‌دست بود. تغییرات طول ناحیه سکون جریان در آب‌شکن‌های نفوذناپذیر در شکل‌های ۴ تا ۱۰ قابل مشاهده است.

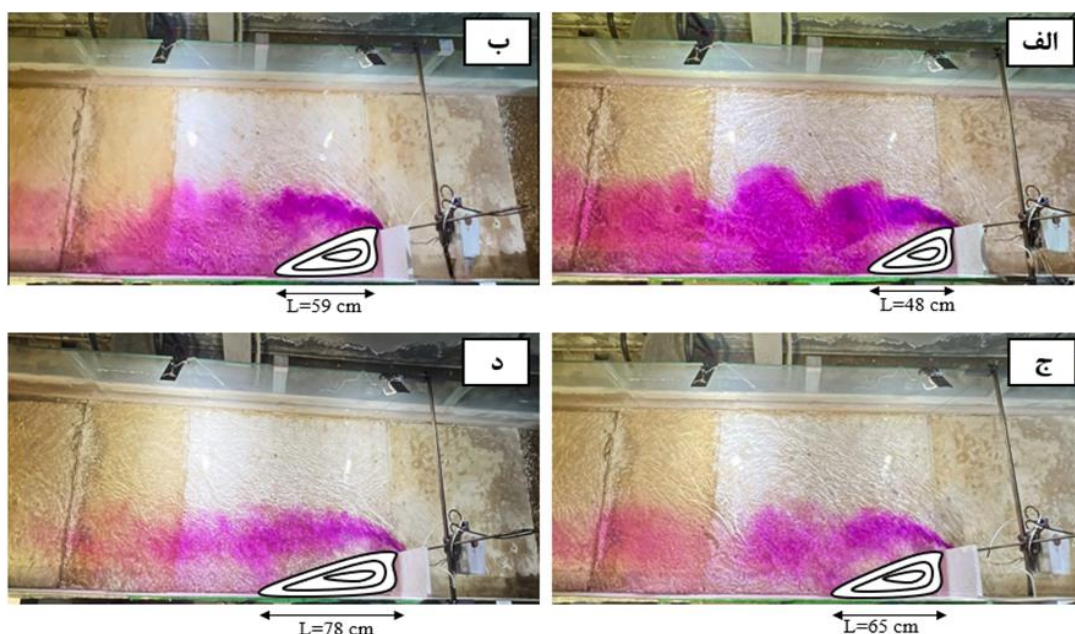
برای آب‌شکن با عرض ۲۰ سانتی‌متر، در دبی ۲۹ لیتر بر ثانیه و چهار میزان استغراق ۰/۳۱۴، ۰/۳۵۷، ۰/۳۸۶ و ۰/۴۴۳، طول ناحیه سکون به ترتیب برابر با ۷۸، ۶۵، ۵۹ و ۴۸ سانتی‌متر اندازه‌گیری شد (شکل ۴). با افزایش دبی به ۴۹ لیتر بر ثانیه و مقادیر استغراق (۰/۳۷۱، ۰/۴۱۴ و ۰/۵۰۰)، طول ناحیه به ۸۶، ۷۷، ۶۴ و ۵۱ سانتی‌متر افزایش یافت (شکل ۵). در دبی ۶۵ لیتر بر ثانیه، طول ناحیه سکون برای استغراق‌های ۰/۳۷۱، ۰/۴۰۰، ۰/۴۵۷ و ۰/۵۱۴، به ترتیب برابر با ۱۰۰، ۸۳، ۶۹ و ۵۵ سانتی‌متر بود (شکل ۶). این نتایج نشان می‌دهد که

استغراق منجر به کاهش اثربخشی آبشکن در ایجاد ناحیه سکون می‌شود.

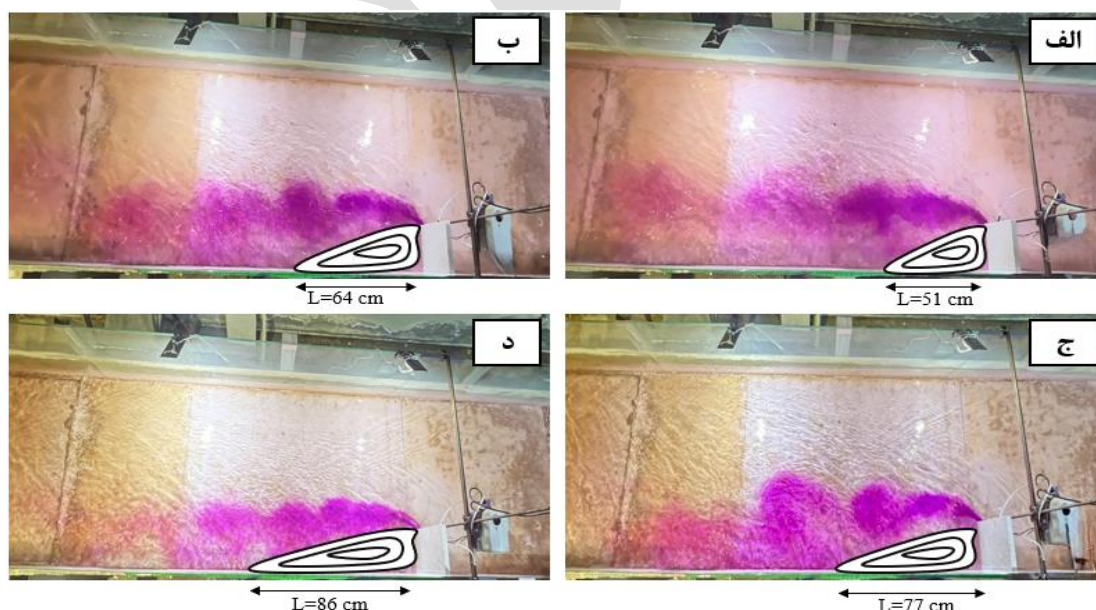
برای آبشکن‌های با عرض ۵۰ سانتی‌متر، افزایش دبی منجر به افزایش طول ناحیه سکون شد. در دبی‌های ۲۹، ۴۹ و ۶۵ لیتر بر ثانیه، این طول به ترتیب برابر با ۱۶۰، ۱۷۰ و ۱۸۵ سانتی‌متر بود (شکل ۱۰). این امر می‌تواند به دلیل توان بیشتر این آبشکن‌ها در انحراف جریان و تشکیل گردابه‌های پایدارتر در پایین دست باشد.

با افزایش دبی، به رغم افزایش انرژی جریان، طول ناحیه سکون افزایش یافته است.

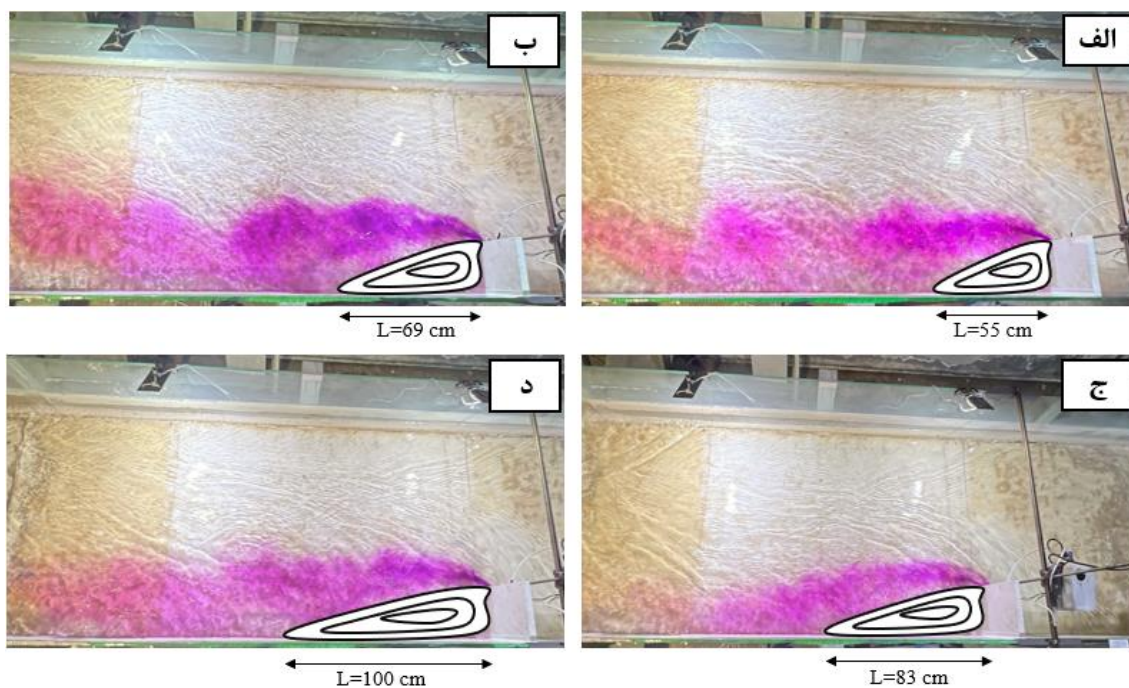
برای آبشکن با عرض ۳۰ سانتی‌متر نیز الگوی مشابهی مشاهده شد. در دبی ۲۹ لیتر بر ثانیه، با افزایش استغراق از ۰/۳۸۶ به ۰/۴۲۹، طول ناحیه سکون از ۱۰۵ به ۹۰ سانتی‌متر کاهش یافت (شکل ۷). این روند در دبی‌های ۴۹ و ۶۵ لیتر بر ثانیه نیز حفظ شد؛ به طوری که طول ناحیه سکون به ترتیب از ۱۲۶ به ۹۴ و از ۱۴۰ به ۱۰۴ سانتی‌متر کاهش یافت (شکل‌های ۸ و ۹). این نتایج حاکی از آن است که افزایش میزان



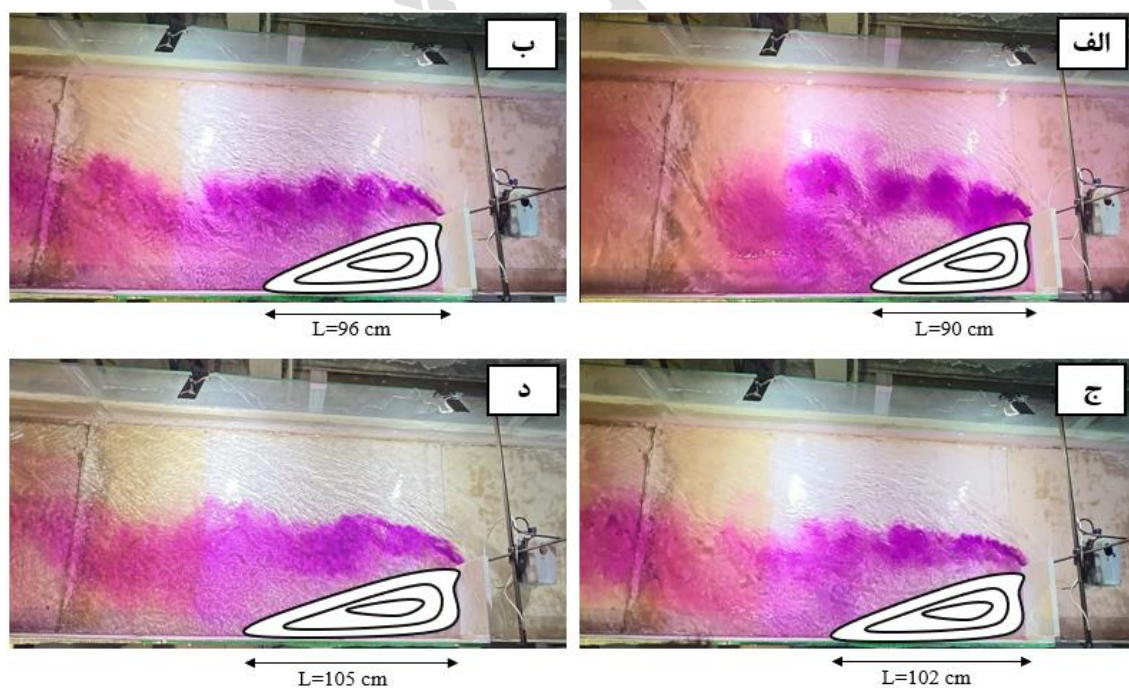
شکل ۴ - در دبی ۲۹ لیتر بر ثانیه الف) ناحیه سکون ۴۸ سانتی‌متر و استغراق ۰/۴۴۳ ب) ناحیه سکون ۵۹ سانتی‌متر و استغراق ۰/۳۸۶ ج) ناحیه سکون ۶۵ سانتی‌متر و استغراق ۰/۳۵۷ د) ناحیه سکون ۷۸ سانتی‌متر و استغراق ۰/۳۱۴



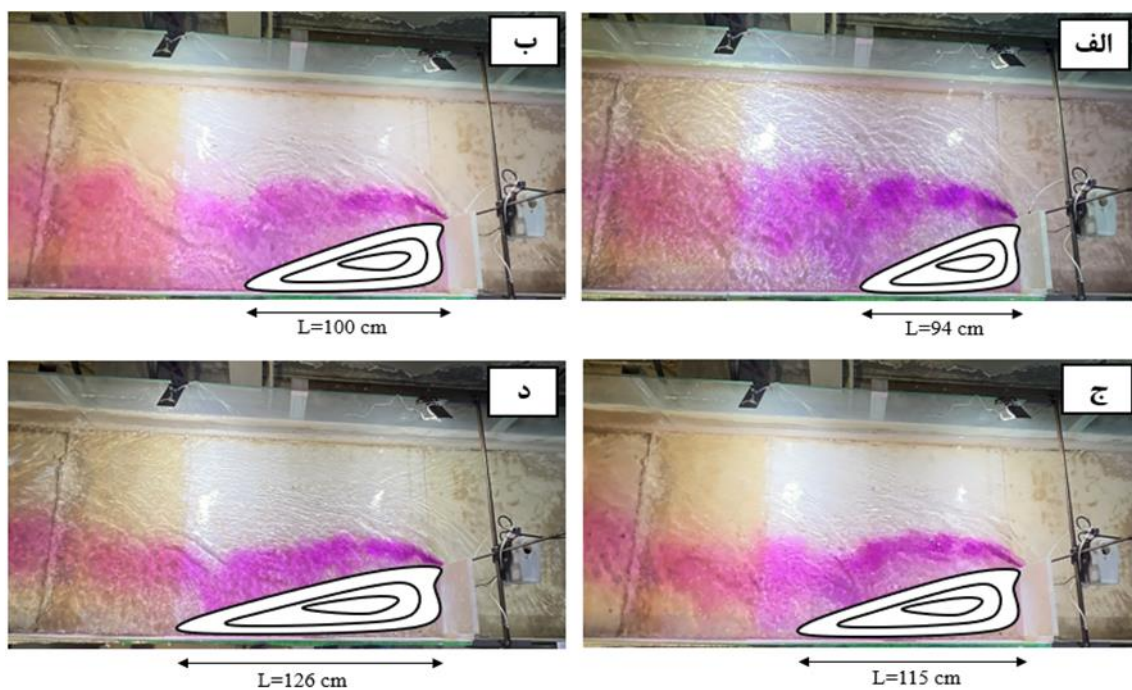
شکل ۵ - در دبی ۴۹ لیتر بر ثانیه الف) ناحیه سکون ۵۱ سانتی‌متر و استغراق ۰/۵۰۰ ب) ناحیه سکون ۶۴ سانتی‌متر و استغراق ۰/۴۱۴ ج) ناحیه سکون ۷۷ سانتی‌متر و استغراق ۰/۳۷۱ د) ناحیه سکون ۸۶ سانتی‌متر و استغراق ۰/۳۵۷



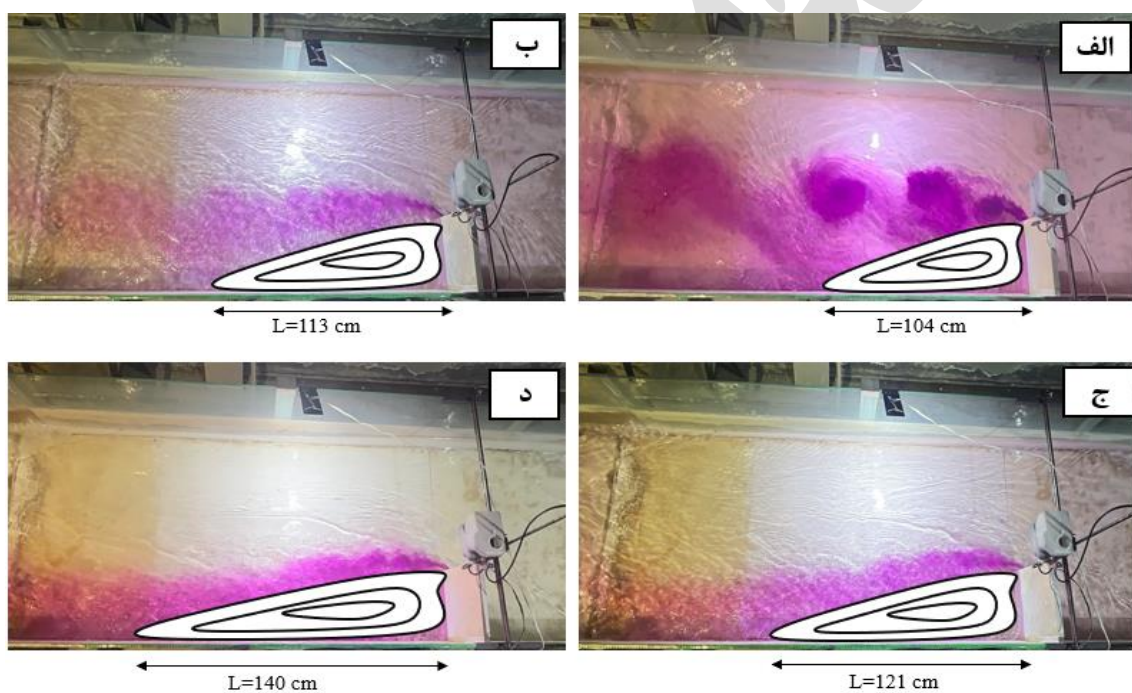
شکل ۶ - در دبی ۶۵ لیتر بر ثانیه الف) ناحیه سکون ۵۵ سانتی‌متر و استغراق ۰/۵۱۴ ب) ناحیه سکون ۶۹ سانتی‌متر و استغراق ۰/۴۵۷ ج) ناحیه سکون ۸۳ سانتی‌متر و استغراق ۰/۴۰۰ د) ناحیه سکون ۱۰۰ سانتی‌متر و استغراق ۰/۳۷۱



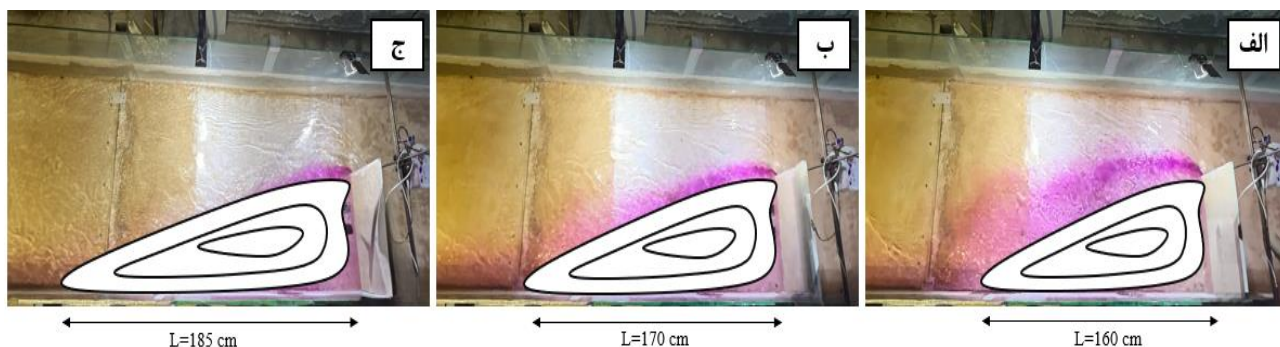
شکل ۷ - در دبی ۲۹ لیتر بر ثانیه الف) ناحیه سکون ۹۰ سانتی‌متر و استغراق ۰/۴۲۹ ب) ناحیه سکون ۹۶ سانتی‌متر و استغراق ۰/۴۱۴ ج) ناحیه سکون ۱۰۲ سانتی‌متر و استغراق ۰/۴۰۰ د) ناحیه سکون ۱۰۵ سانتی‌متر و استغراق ۰/۳۸۶



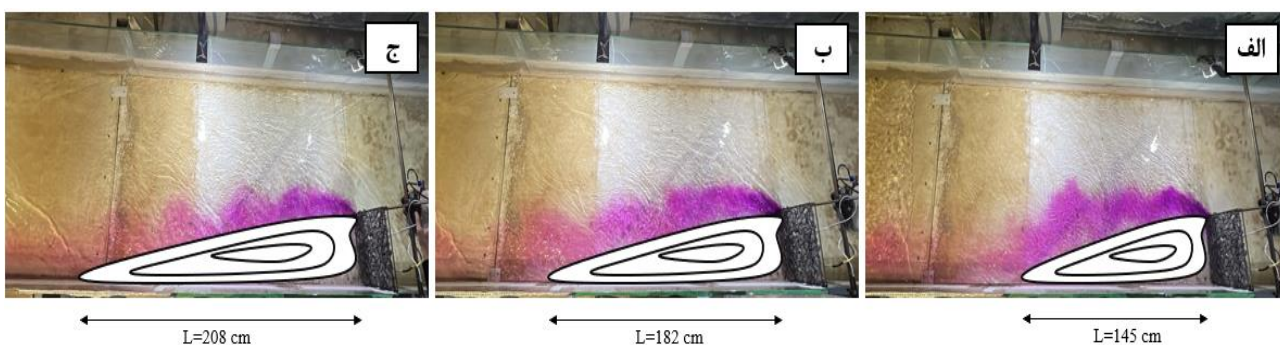
شکل ۸ - در دبی ۴۹ لیتر بر ثانیه الف) ناحیه سکون ۹۴ سانتی‌متر و استغراق ۰/۴۷۱ ب) ناحیه سکون ۱۰۰ سانتی‌متر و استغراق ۰/۴۵۷ ج) ناحیه سکون ۱۱۵ سانتی‌متر و استغراق ۰/۴۱۴ د) ناحیه سکون ۱۲۶ سانتی‌متر و استغراق ۰/۴۰۰



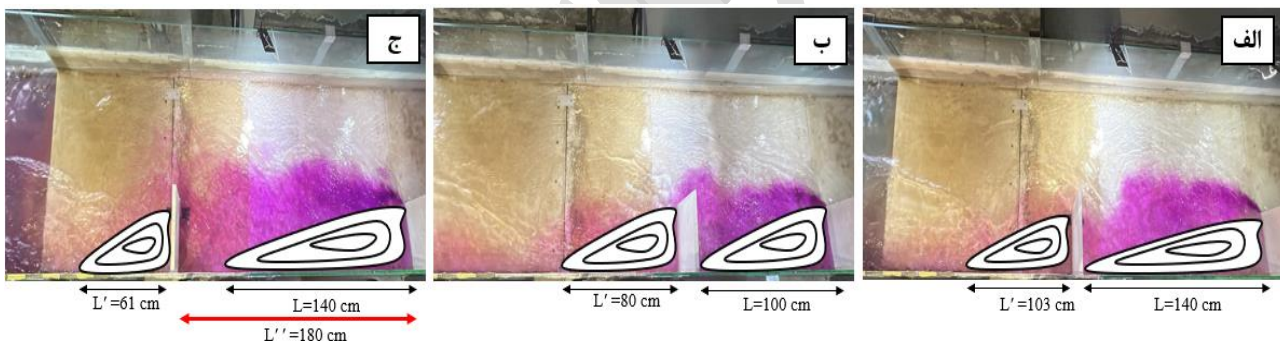
شکل ۹ - در دبی ۶۵ لیتر بر ثانیه الف) ناحیه سکون ۱۰۴ سانتی‌متر و استغراق ۰/۴۷۱ ب) ناحیه سکون ۱۱۳ سانتی‌متر و استغراق ۰/۴۵۷ ج) ناحیه سکون ۱۲۱ سانتی‌متر و استغراق ۰/۴۴۳ د) ناحیه سکون ۱۴۰ سانتی‌متر و استغراق ۰/۴۱۴



شکل ۱۰- الف) ناحیه سکون ۱۶۰ سانتی‌متر و دبی ۲۹ لیتر بر ثانیه و استغراق ۰/۱۸۶ (ب) ناحیه سکون ۱۷۰ سانتی‌متر و دبی ۴۹ لیتر بر ثانیه و استغراق ۰/۱۹۵ (ج) ناحیه سکون ۱۸۵ سانتی‌متر و دبی ۶۵ لیتر بر ثانیه و استغراق ۰/۲



شکل ۱۱- الف) ناحیه سکون ۱۴۵ سانتی‌متر و دبی ۲۹ لیتر بر ثانیه و استغراق ۰/۳۸۶ (ب) ناحیه سکون ۱۸۲ سانتی‌متر و دبی ۴۹ لیتر بر ثانیه و استغراق ۰/۳۸۹ (ج) ناحیه سکون ۲۰۸ سانتی‌متر و دبی ۶۵ لیتر بر ثانیه و استغراق ۰/۳۹۷



شکل ۱۲- در دبی ۶۵ لیتر بر ثانیه الف) نصب آب‌شکن دوم در انتهای ناحیه سکون اول (ب) نصب آب‌شکن دوم درون ناحیه سکون اول (ج) نصب آب‌شکن دوم خارج از ناحیه سکون اول

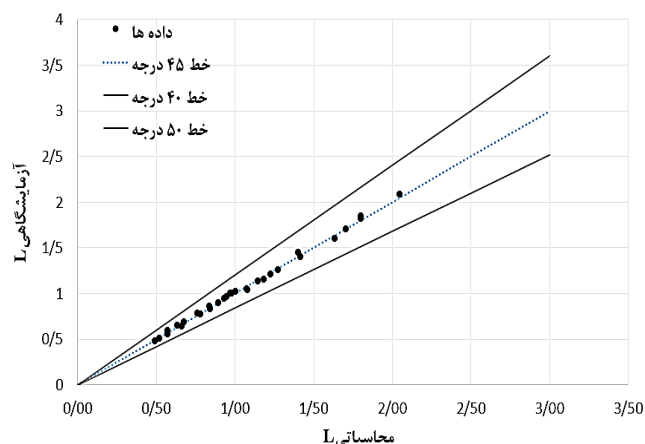
بررسی اثر موقعیت نصب آب‌شکن دوم

برای بررسی تأثیر مکان نصب آب‌شکن دوم بر تشکیل ناحیه سکون دوم، سه موقعیت مختلف مورد آزمایش قرار گرفت: در انتهای ناحیه سکون اول، در فاصله‌ای کمتر از آن و در فاصله‌ای بیشتر از آن. در دبی ۶۵ لیتر بر ثانیه، طول ناحیه سکون اولیه برابر با ۱۴۰ سانتی‌متر اندازه‌گیری شد.

زمانی که آب‌شکن دوم دقیقاً در فاصله ۱۴۰ سانتی‌متری قرار گرفت (منطبق بر انتهای ناحیه سکون اول)، طول ناحیه سکون دوم ۱۰۳ سانتی‌متر بود (شکل ۱۲- الف). با قرارگیری آب‌شکن دوم در فاصله ۱۰۰ سانتی‌متری (درون ناحیه سکون اول)، طول

آب‌شکن‌های نفوذپذیر

در این بخش، از آب‌شکن‌هایی با تخلخل ۴۱ درصد و عرض ثابت ۳۰ سانتی‌متر استفاده شد. آزمایش‌ها برای سه دبی مختلف (۲۹، ۴۹ و ۶۵ لیتر بر ثانیه) انجام گرفت. نتایج نشان داد که طول ناحیه سکون برای این دبی‌ها به‌ترتیب برابر با ۱۴۵، ۱۸۲ و ۲۰۸ سانتی‌متر است (شکل ۱۱). این افزایش قابل توجه نسبت به آب‌شکن‌های نفوذناپذیر با عرض مشابه، می‌تواند ناشی از کاهش سرعت جریان درون سازه به‌دلیل تخلخل آن و افزایش انتقال مومنوم به اطراف باشد، که در نهایت به گسترش بیشتر ناحیه سکون منجر شده است.



شکل ۱۳- نمودار نتایج آزمایشگاهی و محاسباتی

جمع‌بندی نتایج

نتایج آزمایش‌ها نشان داد که پارامترهای هندسی آب‌شکن شامل عرض، تخلخل و میزان استغراق و همچنین دبی جریان، تأثیر مستقیم و معنی‌داری بر طول ناحیه سکون در پایین‌دست دارند. به‌طور کلی می‌توان نتایج زیر را استنتاج نمود:

۱. افزایش دبی جریان منجر به افزایش طول ناحیه سکون می‌گردد، به‌ویژه در آب‌شکن‌های عریض‌تر که توان بیشتری در مهار جریان دارند. نتایج مشابهی در مطالعات قبلی گزارش شده است؛ به‌طور مثال Rajaratnam and Nwachukwu (1983) نشان دادند که افزایش جریان منجر به توسعه بزرگ‌تر نواحی بازچرخشی پشت سازه‌های هیدرولیکی می‌شود. همچنین، تحقیقات Xu et al. (2023) بیان کردند که عرض بیشتر آب‌شکن موجب افزایش منطقه بازچرخش و کاهش سرعت جریان در پشت آن می‌گردد که این موضوع در مهار فرسایش و تجمع رسوب نقش به‌سزایی دارد.

۲. کاهش میزان استغراق باعث توسعه بیشتر ناحیه سکون شده و عملکرد هیدرولیکی آب‌شکن را در انحراف و تضعیف جریان اصلی بهبود می‌بخشد. نتایج مشابهی در مطالعات پیشین مشاهده شده است؛ Melville and Chiew (1999; El-Rashedy et al., 2018)

۳. افزایش عرض آب‌شکن به‌ویژه در مقادیر بالای دبی، موجب پایداری بیشتر گردابه‌ها و افزایش طول ناحیه سکون می‌گردد. برای مثال، پژوهش‌های Bahrami-Yarahmadi et al. (2020) و Qi et al. (2024) نشان

ناحیه سکون دوم به ۸۰ سانتی‌متر کاهش یافت (شکل ۱۲-ب). همچنین، زمانی که فاصله دو آب‌شکن به ۱۸۰ سانتی‌متر افزایش یافت (پس از ناحیه سکون اول)، طول ناحیه سکون دوم به ۶۱ سانتی‌متر کاهش یافت (شکل ۱۲-ج). این نتایج نشان‌دهنده حساسیت زیاد شکل‌گیری ناحیه سکون دوم به محل نسبی نصب آب‌شکن دوم است و نشان می‌دهد که قرارگیری مناسب آن در مرز ناحیه سکون اول می‌تواند عملکرد ترکیبی سازه‌ها را بهبود بخشد.

تحلیل ابعادی

با بهره‌گیری از روش تحلیل ابعادی، می‌توان به رابطه ۱ دست یافت که در آن متغیرهای مختلف هیدرولیکی و هندسی از جمله عرض آب‌شکن، عدد رینولدز، تخلخل، عدد فرود، نسبت استغراق و ارتفاع قبل از آب‌شکن تأثیرگذار در پدیده مورد بررسی لحاظ شده‌اند.

$$f\left(Fr, \frac{W}{h}, p, S_r, Re\right) = \frac{L}{h} \quad (1)$$

در این رابطه، W نمایانگر عرض آب‌شکن، L طول ناحیه سکون جریان، Fr عدد فرود، Re عدد رینولدز، p تخلخل سازه آب‌شکن، h ارتفاع جریان پیش از برخورد به آب‌شکن و S_r نسبت استغراق آب‌شکن است. با بهره‌گیری از نرم‌افزار متلب و به‌کارگیری مدل رگرسیون توانی، رابطه‌ی تجربی شماره ۲ استخراج شد. لازم به ذکر است که با توجه به شرایط آشفته جریان در ناحیه مورد مطالعه، تأثیر عدد رینولدز در تحلیل نهایی نادیده گرفته شده است.

$$L = h \times \exp((Fr \times 1.8665) - (S_r \times 1.0762) + (P \times 0.6522) + \left(\frac{W}{h} \times 0.8457\right) + 0.2465) \quad (2)$$

به‌منظور استخراج رابطه‌ی پیشنهادی، از ۷۵ درصد داده‌ها استفاده شد و برای ارزیابی دقت مدل حاصل، ۲۵ درصد باقیمانده به کار گرفته شد. در شکل ۱۳، داده‌های محاسباتی و آزمایشگاهی به‌صورت هم‌زمان ترسیم شده‌اند. همچنین، خطی با انحراف ۵ درجه نسبت به خط مرجع ۴۵ درجه نیز رسم گردیده است. مطابق با نتایج حاصل از نمودار، رابطه ارائه‌شده از دقت مناسبی برخوردار بوده و توانسته است تطابق قابل قبولی با داده‌های آزمایشگاهی نشان دهد.

ج) تخلخل (نفوذپذیری)

آب‌شکن‌های نفوذپذیر نسبت به نوع نفوذناپذیر، عملکرد بهتری در توسعه ناحیه‌ی سکون از خود نشان دادند. افزایش تخلخل موجب عبور بخشی از جریان از میان سازه، کاهش تمرکز جریان و توزیع متوازن‌تر انرژی در پایین‌دست شد که این موضوع به شکل‌گیری ناحیه‌ی سکون وسیع‌تر کمک می‌کند.

د) میزان استغراق

نتایج نشان داد که با افزایش میزان استغراق، به‌ویژه در نسبت‌های بالای استغراق، طول ناحیه‌ی سکون کاهش می‌یابد. علت این امر، عبور بخش عمده‌ای از جریان از بالای آب‌شکن و کاهش تأثیر سازه بر ساختار جریان در پایین‌دست است که منجر به تضعیف گردابه‌ها و محدود شدن ناحیه‌ی سکون می‌شود.

از دیگر نتایج قابل‌توجه، اثر محل استقرار آب‌شکن دوم در رابطه با ناحیه‌ی سکون حاصل از آب‌شکن اول بود. قرارگیری آب‌شکن دوم در انتهای ناحیه‌ی سکون نسبت به نصب آن قبل یا بعد از این ناحیه، کارایی بهتری در شکل‌دهی ناحیه‌ی سکون دوم و کاهش فرسایش جانبی داشت. همچنین در آرایش‌های متوالی، افزایش تعداد آب‌شکن‌ها به کاهش نسبی طول ناحیه‌ی سکون منجر شد.

افزایش دبی جریان و افزایش عرض آب‌شکن موجب توسعه ناحیه سکون و پایداری بیشتر گردابه‌ها می‌شود، که این امر به بهبود عملکرد هیدرولیکی آب‌شکن در کنترل و تضعیف جریان اصلی کمک می‌کند.

همچنین، نفوذپذیری آب‌شکن‌ها با ایجاد جریان عبوری ملایم و کاهش استغراق، منجر به گسترش قابل توجه ناحیه سکون نسبت به نمونه‌های نفوذناپذیر می‌گردد. بنابراین، پارامترهای هندسی و هیدرولیکی همزمان باید در طراحی آب‌شکن‌ها به‌منظور بهینه‌سازی اثرات کنترل فرسایش و جریان مدنظر قرار گیرند.

با توجه به نتایج این پژوهش، تحقیقات آینده می‌توانند به بررسی دقیق‌تر اثرات ترکیب سایر پارامترهای فیزیکی و هندسی مانند شکل هندسی آب‌شکن‌ها، خصوصیات روانی مختلف سیالات و تأثیر شرایط محیطی (مانند تغییرات دما و ترکیب مواد موجود در آب) بر عملکرد ناحیه‌ی سکون پرداخته شود.

علاوه بر این، مطالعه‌ی رفتار هیدرولیکی در شرایط شبیه‌سازی شده از جمله مدل‌های عددی می‌تواند به‌عنوان ابزار تکمیلی برای ارزیابی بهتر و پیش‌بینی دقیق‌تر نتایج تجربی در طراحی آب‌شکن‌ها استفاده شود. استفاده از داده‌های آزمایشگاهی در مقیاس‌های مختلف و نیز آزمایش در شرایط طبیعی‌تر می‌تواند

دادند که افزایش عرض آب‌شکن موجب گسترش ناحیه بازچرخش و تثبیت گردابه‌ها می‌شود.

۴. آب‌شکن‌های نفوذپذیر به‌دلیل ایجاد جریان عبوری ملایم و نفوذ سیال به درون ساختار، در تمامی شرایط دبی، ناحیه سکون وسیع‌تری نسبت به نمونه‌های نفوذناپذیر ایجاد کردند. نتایج تحقیقات پیشین نیز این موضوع را تایید کرده‌است؛ به عنوان مثال، مطالعه Hu et al. (2022) نشان داد که آب‌شکن‌های نفوذپذیر با ایجاد جریان ملایم‌تر، ناحیه بازچرخش و سکون بزرگ‌تری نسبت به آب‌شکن‌های غیرنفوذپذیر ایجاد می‌کنند. همچنین این نتایج با یافته‌های Ezzeldin (2019) مطابقت دارد که در آن استفاده از آب‌شکن‌های چوبی متخلخل موجب بهبود شرایط هیدرولیکی و کاهش فرسایش گزارش شده است.

۵. در بررسی موقعیت نصب آب‌شکن دوم، مشخص شد که قرارگیری آن در انتهای ناحیه سکون حاصل از آب‌شکن اول، مؤثرترین موقعیت برای ایجاد ناحیه سکون دوم است. این یافته با نتایج پژوهش Aung et al. (2023) در مورد تأثیر تعداد آب‌شکن‌ها بر ساختار جریان، مطابقت دارد.

نتیجه‌گیری

در این پژوهش، به‌منظور بررسی رفتار هیدرولیکی ناحیه‌ی سکون شکل‌گرفته در پایین‌دست آب‌شکن‌ها، مجموعه‌ای از آزمایش‌های فیزیکی در شرایط مختلف شامل تغییرات دبی جریان، عرض آب‌شکن، درصد تخلخل و میزان استغراق انجام شد. تحلیل داده‌های حاصل، منجر به استنتاج نتایج مهمی در خصوص تأثیر این پارامترها بر طول ناحیه‌ی سکون گردید که به شرح زیر خلاصه می‌شود:

الف) عرض آب‌شکن

افزایش عرض آب‌شکن از ۲۰ به ۵۰ سانتی‌متر سبب افزایش قابل توجه طول ناحیه‌ی سکون گردید. این امر به دلیل توسعه سطح تماس بین سازه و جریان و در نتیجه افزایش میزان بازچرخش جریان در پایین‌دست آب‌شکن می‌باشد که پایداری هیدرولیکی جریان را در این ناحیه تقویت می‌کند.

ب) دبی جریان

با افزایش دبی از ۲۹ به ۶۵ لیتر بر ثانیه، طول ناحیه‌ی سکون به‌طور محسوس افزایش یافت. افزایش انرژی جریان در دبی‌های بالا، منجر به تشکیل جریان‌های گردابی قوی‌تر در پشت آب‌شکن شده و گسترش ناحیه‌ی سکون را به همراه دارد.

- [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)HY.19437900.0000077](https://doi.org/10.1061/(ASCE)HY.19437900.0000077)
- 7- Ezzeldin, R.M., 2019. Numerical and experimental investigation for the effect of permeability of spur dikes on local scour. *Journal of Hydroinformatics*, 21(2), pp.335-342.
<https://doi.org/10.2166/hydro.2019.114>
 - 8- El-Rashedy, S.F., Ezzeldin, M.M. and Sarhan, T.A., 2018. Influence of spur dikes shapes on scour characteristics. *International Journal of Scientific and Engineering Research*, 9(6), pp.1285–1301.
 - 9- Gill, M.A., 1972. Erosion of sand beds around spur dikes. *Journal of the Hydraulics Division*, 98(9), pp.1587-1602.
<https://doi.org/10.1061/JYCEAJ.0003406>
 - 10- Hu, J. Wang, P. Zhang, J. Wang, M. Chen, Y. and Zhao, C., 2020. Measurement and Characteristic Analysis of Turbulent Flow near Permeable Spur Dike. *Instrumentation, Measures, Métrologies*, 19(5).
<https://doi.org/10.18280/i2m.190503>
 - 11- Hu, J. Wang, G. Wang, P. Yu, T. and Chen, H., 2022. Experimental study on the influence of new permeable spur dikes on local scour of navigation channel. *Sustainability*, 15(1), pp.570.
<https://doi.org/10.3390/su15010570>
 - 12- Iqbal, S., Pasha, G.A. Ghani, U. Ullah, M.K. and Ahmed, A., 2021. Flow dynamics around permeable spur dike in a rectangular channel. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 46(5), pp.4999-5011.
<https://doi.org/10.1007/s13369-020-05205-y>
 - 13- Jarrahzadeh, F., Kashfipour, M. and Shafaei-Bajestan, M., 2017. The effect of the angle of placement in three types of permeable, impermeable and bandal-like floodgates in submerged conditions on the geometric dimensions of scour. *Irrigation Science and Engineering*, 40(2), pp.1-14.[In Persian]
<https://doi.org/10.22055/jise.2017.13153>
 - 14- Karami, H. Ardeshtir, A. Behzadian, K. and Ghodsian, M., 2011. Protective spur dike for scour mitigation of existing spur dikes. *Journal of Hydraulic Research*, 49(6), pp.809-813.
<https://doi.org/10.1080/00221686.2011.625166>
 - 15- Kang, S. Lee, J. Kim, Y. and Khosronejad, A., 2023. Experimental and numerical study on the flow characteristics around spur dikes at different length-to-depth ratios. *Advances in Water Resources*, 175, pp.104428.
<https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2023.104428>
 - 16- Koken, M., 2011. Coherent structures around isolated spur dikes at various approach flow angles. *Journal of Hydraulic Research*, 49(6), pp.736-743.
<https://doi.org/10.1080/00221686.2011.616316>
 - 17- Li, G. Sui, J. and Sediqi, S., 2024. Turbulent flow structure around a single submerged angled spur dike under ice cover. *Journal of Hydrology and Hydromechanics*, 72(4), pp.522-537.
<https://doi.org/10.2478/johh-2024-0029>

به بهبود درک ما از تعامل بین جریان و سازه‌های آبشکن کمک کند.

تضاد منافع نویسندگان

در این مقاله هیچ‌گونه تضاد منافی وجود ندارد و این مسئله مورد تأیید همه نویسندگان است.

دسترسی به داده‌ها

همه اطلاعات و نتایج در متن مقاله ارائه شده است.

مشارکت نویسندگان

نحوه و میزان مشارکت نویسندگان در انجام این پژوهش به صورت زیر است:

نویسنده اول: جمع‌آوری و تحلیل داده‌ها و انجام مراحل آزمایشگاهی

نویسنده دوم: راهنمایی، ویرایش و بازبینی مقاله، کنترل نتایج نویسنده سوم: بازبینی متن مقاله

اصول اخلاقی

نویسندگان اصول اخلاقی را در انجام و انتشار این اثر عملی رعایت نموده‌اند و این موضوع مورد تأیید همه آنها می‌باشد.

منابع

- 1- Akbar, Z. Pasha, G.A. Tanaka, N. Ghani, U. and Hamidifar, H., 2024. Reducing bed scour in meandering channel bends using spur dikes. *International Journal of Sediment Research*, 39(2), pp.243-256.
<https://doi.org/10.1016/j.ijsrc.2024.01.001>
- 2- Arora, S. Patel, H.K. Lade, A.D. and Kumar, B., 2023. Turbulence structure and bank erosion process in a dredged channel. *River Research and Applications*, 39(4), pp.613-628.
<https://doi.org/10.1002/rra.4100>
- 3- Aung, H. Onorati, B. Oliveto, G. and Yu, G., 2023. Riverbed morphologies induced by local scour processes at single spur dike and spur dikes in cascade. *Water*, 15(9), pp.1746.
<https://doi.org/10.3390/w15091746>
- 4- Bahrami-Yarahmadi, M. Pagliara, S. Yabarehpour, E. and Najafi, N., 2020. Study of scour and flow patterns around triangular-shaped spur dikes. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 24(11), pp.3279-3288.
<https://doi.org/10.1007/s12205-020-2261-x>
- 5- Chardon, V. Schmitt, L. and Clutier, A., 2022. Bank re-erosion action to promote sediment supply and channel diversification: Feedback from a restoration test on the Rhine. *River Research and Applications*, 38(5), pp.975-987.
<https://doi.org/10.1002/rra.3968>
- 6- Duan, J.G., 2009. Mean flow and turbulence around a laboratory spur dike. *Journal of Hydraulic Engineering*, 135(10), pp.803-811.

- Journal of Hydraulic Engineering*, 131(2), pp.85-96.
[https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9429\(2005\)131:2\(85\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(2005)131:2(85))
- 25- Xu, H., Li, Y., Zhao, Z., Wang, X. and Zhang, F., 2023. Experimental Study on the Local Scour of Submerged Spur Dike Heads under the Protection of Soft Mattress in Plain Sand-Bed Rivers. *Water*, 15, 413
<https://doi.org/10.3390/w15030413>
- 26- Yang, X. Zhang, S. Li, W. Tang, C. Zhang, J. Schwindt, S. Wiprecht, S. and Wang, T., 2022. Impact of the construction of a dam and spur dikes on the hydraulic habitat of *Megalobrama terminalis* spawning sites: a case study in the Beijiang River (China). *Ecological Indicators*, 143, pp.109361.
<https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2022.109361>
- 27- Zhang, H. Nakagawa, H. and Mizutani, H., 2012. Bed morphology and grain size characteristics around a spur dyke. *International Journal of Sediment Research*, 27(2), pp.141-157
[https://doi.org/10.1016/S1001-6279\(12\)60023-7](https://doi.org/10.1016/S1001-6279(12)60023-7)
- 28- Zhang, H. Nakagawa, H. Ogura, M. and Mizutani, H., 2013. Experiment study on channel bed characteristics around spur dykes of different shapes. *Journal of Japan Society of Civil Engineers, Ser. A2 (Applied Mechanics (AM))*, 69(2), pp.489-499.
https://doi.org/10.2208/jscejam.69.I_489
- 18- Melville, B.W. and Chiew, Y.M., 1999. Time scale for local scour at bridge piers. *Journal of Hydraulic Engineering*, 125(1), pp.59-65.
[https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9429\(1999\)125:1\(59\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(1999)125:1(59))
- 19- Melville, B.W. and Coleman, S.E., 2000. Bridge Scour. Water Resources Publications. 572p.
- 20- Pandey, M. Ahmad, Z. and Sharma, P.K., 2018. Scour around impermeable spur dikes: a review. *ISH Journal of Hydraulic Engineering*, 24(1), pp.25-44.
<https://doi.org/10.1080/09715010.2017.1342571>
- 21- Qi, H. Wang, J. Zou, W. Luo, W. Tian, W. and Li, J., 2024. Characteristics and mechanism of local scour reduction around spur dike using the collar in clear water. *Scientific Reports*, 14(1), pp.12299. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-63131-7>
- 22- Rajaratnam, N. and Nwachukwu, B.A., 1983. Flow near groin-like structures. *Journal of Hydraulic Engineering*, 109(3), pp.463-480.
[https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)07339429\(1983\)109:3\(463\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)07339429(1983)109:3(463))
- 23- Shampa, Hasegawa, Y. Nakagawa, H. Takebayashi, H. and Kawaike, K., 2020. Three-dimensional flow characteristics in slit-type permeable spur dike fields: efficacy in riverbank protection. *Water*, 12(4), pp.964.
<https://doi.org/10.3390/w12040964>
- 24- Wu, B. Wang, G. Ma, J. and Zhang, R., 2005. Case study: River training and its effects on fluvial processes in the Lower Yellow River, China.