



Research Article

Numerical simulation of the effect of the geometric shape of 25% permeable series spur dikes on the flow pattern in the outer bend of a meandering channel with two different radii

Mohammadreza Yasasri Mazandarani^{1*}, Mohammad Rostami², Iman Shayeste Tehrani³, Seyed Alireza Salim Bayat⁴

1*- M.Sc. in Civil Engineering – Water and Hydraulic Structures, Science and Culture University, Tehran, Iran

2- Assistant Professor, Soil Conservation and Watershed Management Research Institute, Agricultural Research, Education and Extension Organization, Tehran, Iran

3- M.Sc. in Civil Engineering – Water and Hydraulic Structures, Science and Culture University, Tehran, Iran

4- M.Sc. in Civil Engineering – Water and Hydraulic Structures, Science and Culture University, Tehran, Iran

Received: 08 April 2026; Revised: 30 April 2026; Accepted: 13 May 2026; Published: 23 July 2026

Abstract

This study numerically investigates the effect of channel bend radius on the performance of 25% permeable spur dikes series in controlling the flow pattern. Two outer bends of a meandering channel with radii of 3.5 m and 4.5 m are simulated and compared under a constant discharge of 40 L/s. The two-dimensional flow field is modeled using HEC-RAS 2D, and spur dikes with four geometric configurations (T-shaped, L-shaped, inverted-L, and straight-I) are installed in series along each bend.

The comparison indicators include velocity distribution along the outer bend, streamline patterns, and the reduction of mean velocity relative to the no-spur dikes (reference) condition. The results show that reducing the bend radius from 4.5 m to 3.5 m, while keeping the discharge constant at 40 L/s, intensifies the curvature effect and concentrates more flow towards the outer bank. Consequently, the role of spur dikes in reducing velocity near the outer bend becomes more pronounced. Specifically, for the 3.5 m radius, the reduction in mean velocity within the outer-bank region is greater than that of the 4.5 m radius for all spur dikes geometries. The T-shaped spur dikes exhibits the best performance in both radii, but its effect is more significant in the 3.5 m bend.

Overall, the findings indicate that in bends with smaller radii, properly designed permeable spur dikes can more effectively mitigate outer-bank erosion and should be carefully considered in the design of bank protection systems.

Keywords: Bank protection and erosion, Channel bend radius, HEC-RAS 2D, Meandering channel, Numerical simulation

Cite this article as Yasari Mazandarani, M., Rostami, M., Shayeste Tehrani, I. and Salim Bayat, S. A. (2026). Numerical simulation of the effect of the geometric shape of 25% permeable series spur dikes on the flow pattern in the outer bend of a meandering channel with two different radii. (e243514). Civil and Project, 8(5), e243514 doi: <https://doi.org/10.22034/cpj.2026.580754.1440>

ISSN: 2676-511X / Copyright: © 2026 by the authors.

Open Access: This article is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License, which permits use, sharing, adaptation, distribution and reproduction in any medium or format, as long as you give appropriate credit to the original author(s) and the source, provide a link to the Creative Commons licence, and indicate if changes were made. The images or other third party material in this article are included in the article's Creative Commons licence, unless indicated otherwise in a credit line to the material. If material is not included in the article's Creative Commons licence and your intended use is not permitted by statutory regulation or exceeds the permitted use, you will need to obtain permission directly from the copyright holder. To view a copy of this licence, visit <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

Journal's Note: CPJ remains neutral with regard to jurisdictional claims in published maps and institutional affiliations.



نشریه عمران و پروژه

<http://www.cpjournals.com/>

شبیه‌سازی عددی تأثیر شکل هندسی آبشکن‌های سری نفوذپذیر ۲۵ درصد بر الگوی جریان در قوس بیرونی کانال پیچانرودی با دو شعاع مختلف

محمدرضا یساری مازندرانی^{۱*}، محمد رستمی^۲، ایمان شایسته تهرانی^۳، سید علیرضا سلیم بیات^۴

*۱- کارشناسی ارشد عمران-آب و سازه‌های هیدرولیکی دانشگاه علم و فرهنگ، تهران، ایران

۲- استادیار، پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، تهران، ایران

۳- کارشناسی ارشد عمران-آب و سازه‌های هیدرولیکی دانشگاه علم و فرهنگ، تهران، ایران

۴- کارشناسی ارشد عمران-آب و سازه‌های هیدرولیکی دانشگاه علم و فرهنگ، تهران، ایران

تاریخ دریافت: ۱۹ فروردین ۱۴۰۵؛ تاریخ بازنگری: ۱۰ اردیبهشت ۱۴۰۵؛ تاریخ پذیرش: ۲۳ اردیبهشت ۱۴۰۵؛ تاریخ انتشار آنلاین: ۰۱ مرداد ۱۴۰۵

چکیده

در این پژوهش، تأثیر شعاع قوس کانال بر عملکرد آبشکن‌های سری نفوذپذیر ۲۵ درصد در کنترل الگوی جریان، به صورت عددی بررسی شده است. بدین منظور، دو قوس بیرونی کانال پیچانرودی با شعاع‌های ۳۰۵ و ۴۰۵ متر تحت دبی ثابت ۴۰ لیتر بر ثانیه شبیه‌سازی شده و نتایج آن‌ها با یکدیگر مقایسه گردید. شبیه‌سازی دویعدی میدان جریان با استفاده از نرم‌افزار HEC-RAS 2D انجام شد و آبشکن‌ها در چهار هندسه L ، L معکوس و I به صورت سری در امتداد قوس نصب شد.

شاخص‌های مقایسه شامل توزیع سرعت در قوس بیرونی، الگوی خطوط جریان و میزان کاهش میانگین سرعت نسبت به حالت بدون آبشکن بود. نتایج نشان داد که کاهش شعاع قوس از ۴۰۵ به ۳۰۵ متر، با وجود ثابت بودن دبی ۴۰ لیتر بر ثانیه، منجر به افزایش انحنا و تمرکز بیشتر جریان در نزدیک ساحل بیرونی می‌شود، در نتیجه، نقش آبشکن‌ها در کاهش سرعت در قوس بیرونی برجسته‌تر است. به‌طور خاص، در شعاع ۳۰۵ متر، میزان کاهش میانگین سرعت در ناحیه ساحل بیرونی برای همه هندسه‌ها بیشتر از شعاع ۴۰۵ متر بوده است و آبشکن T شکل در هر دو شعاع بهترین عملکرد را نشان داده، اما اثر آن در قوس ۳۰۵ متری چشمگیرتر است.

به‌طور کلی، نتایج حاکی از آن است که در قوس‌های با شعاع کوچک‌تر، استفاده از آبشکن‌های نفوذپذیر مناسب می‌تواند به‌طور مؤثرتری از فرسایش ساحل بیرونی جلوگیری کرده و در طراحی سامانه‌های حفاظت سواحل مورد توجه قرار گیرد.

کلمات کلیدی: حفاظت سواحل و کناره، شعاع قوس کانال، HEC-RAS 2D، کانال پیچانرودی، شبیه‌سازی

عددی

* پست الکترونیک نویسنده مسئول: yi.reza36@gmail.com

۱- مقدمه

رودخانه‌ها به‌عنوان یکی از مهم‌ترین اجزای چرخه هیدرولوژیک، نقش اساسی در تأمین آب، تغذیه آب‌های زیرزمینی، حمل رسوب و شکل‌دهی به چشم‌اندازهای طبیعی ایفا می‌کنند. در بسیاری از رودخانه‌های طبیعی، وجود قوس‌ها و پیچان‌رودی‌ها سبب ایجاد الگوی جریان پیچیده، تمرکز تنش برشی و در نتیجه تشدید فرسایش در کناره‌های بیرونی می‌شود. تخریب کناره‌ها علاوه بر از بین بردن اراضی کشاورزی و سازه‌های حاشیه رودخانه، هزینه‌های سنگینی را برای پایداری مجدد بستر و سواحل به سیستم‌های مدیریت منابع آب تحمیل می‌کند. از این رو، یافتن راهکارهای مؤثر برای کنترل فرسایش کناره و ساماندهی جریان در قوس‌های رودخانه‌ای همواره مورد توجه پژوهشگران و طراحان بوده است.

در میان روش‌های مختلف حفاظت سواحل، استفاده از آبشکن‌ها به‌عنوان سازه‌های هیدرولیکی عرضی، به دلیل سادگی اجرا، هزینه نسبتاً کمتر و قابلیت تطبیق با شرایط مختلف هیدرولوژیکی، کاربرد گسترده‌ای یافته است. آبشکن‌ها با انحراف بخشی از جریان پرسرعت از نزدیکی ساحل بیرونی به سمت بخش میانی مقطع، موجب کاهش سرعت و تنش برشی در مجاورت کناره‌ها و در نهایت کاهش فرسایش می‌شوند. در سال‌های اخیر، به‌منظور کاهش آثار منفی زیست‌محیطی و هیدرولیکی آبشکن‌های نفوذناپذیر، استفاده از آبشکن‌های نفوذپذیر مورد توجه قرار گرفته است، به‌گونه‌ای که بخشی از جریان از میان سازه عبور کرده و ضمن کاهش تمرکز تنش، الگوی جریان ملایم‌تر و پایدارتری ایجاد می‌شود.

عملکرد آبشکن‌ها به عوامل متعددی از جمله شکل هندسی، طول، فاصله، زاویه قرارگیری نسبت به جریان اصلی، الگوی آرایش (تکی یا سری) و نیز مشخصات هندسی قوس کانال وابسته است. یکی از پارامترهای مهم هندسی، شعاع قوس کانال است که میزان انحنای جریان، شدت جریان ثانویه و تمرکز هسته سرعت را در محدوده قوس کنترل می‌کند. کاهش شعاع قوس، به‌معنای افزایش انحنا و احتمال تشدید پدیده فرسایش در ساحل بیرونی است؛ از این رو انتظار می‌رود نقش آبشکن‌ها در قوس‌های با شعاع کوچک‌تر حساس‌تر و تعیین‌کننده‌تر باشد. با این حال، در بسیاری از مطالعات گذشته، تمرکز اصلی بر بررسی نوع یا آرایش آبشکن‌ها بوده و تأثیر تغییر شعاع قوس بر عملکرد آبشکن‌های نفوذپذیر کمتر به‌صورت مقایسه‌ای مورد توجه قرار گرفته است. از طرفی، توسعه مدل‌های عددی دوبعدی و سه‌بعدی، امکان بررسی دقیق‌تر الگوی جریان پیرامون آبشکن‌ها را بدون نیاز به انجام آزمایش‌های پرهزینه و زمان‌بر آزمایشگاهی فراهم کرده است. مدل HEC-RAS 2D به‌عنوان یکی از ابزارهای قدرتمند شبیه‌سازی جریان‌های سطح آزاد، در سال‌های اخیر به‌طور گسترده برای تحلیل الگوی جریان در کانال‌های پیچان‌رودی و ارزیابی اثر سازه‌های تنظیم جریان مورد استفاده قرار گرفته و کارایی آن در شرایط مختلف هیدرولیکی به اثبات رسیده است.

در این پژوهش، با بهره‌گیری از مدل دوبعدی HEC-RAS 2D، تأثیر شعاع قوس کانال بر عملکرد آبشکن‌های سری نفوذپذیر با نفوذپذیری ۲۵ درصد در کنترل الگوی جریان بررسی شده است. برای این منظور، دو قوس بیرونی کانال پیچان‌رودی با شعاع‌های ۳۰۵ و ۴۰۵ متر به صورت جداگانه تحت دبی ثابت ۴۰ لیتر بر ثانیه مدل‌سازی شده و عملکرد چهار شکل هندسی آبشکن‌های سری (T، L، معکوس و I) در هر دو شعاع با یکدیگر مقایسه گردیده است. شاخص اصلی ارزیابی، میزان کاهش میانگین سرعت در ناحیه ساحل بیرونی نسبت به حالت بدون آبشکن است. هدف نهایی تحقیق، ارائه درکی روشن از نقش شعاع قوس در کارایی آبشکن‌های نفوذپذیر و فراهم کردن زمینه‌ای برای بهینه‌سازی طراحی سامانه‌های حفاظت سواحل در کانال‌های پیچان‌رودی با شرایط هیدرولیکی مشابه می‌باشد.

۲- پیشینه پژوهش

(شجاعیان و همکاران، ۱۳۹۴) در پژوهشی به بررسی اثر نوعی آبشکن نوین موسوم به «باندال لایک» بر پروفیل‌های طولی سرعت در شرایط غیرمستغرق پرداختند. این سازه، ترکیبی از بخش‌های نفوذپذیر و نفوذناپذیر است و همین ماهیت دوگانه، توانایی آن را در کاهش سرعت جریان در مجاورت ساحل افزایش می‌دهد. در این مطالعه، تغییرات پروفیل طولی سرعت پیرامون ردیفی از باندال لایک‌ها برای سه مقدار نفوذپذیری ۳۰، ۴۵ و ۶۴ درصد تحلیل شد. نتایج نشان داد که قسمت نفوذناپذیر

سازه نقش تعیین کننده‌ای در کنترل سرعت و آرام سازی جریان در حاشیه‌ها دارد و افزایش نفوذپذیری از ۳۰ به ۶۴ درصد، حدود ۶ درصد به مقدار سرعت حداکثر در پروفیل‌های سرعت می‌افزاید.

(الیاسی و همکاران، ۲۰۱۶) با استفاده از شبیه سازی عددی، پیامدهای تنگ‌شدگی مقطع کانال ناشی از نصب آبشکن را در یک قوس برای سه میزان ۱۰، ۲۰ و ۲۵ درصد بررسی کردند. نتایج نشان داد که با افزایش میزان تنگ‌شدگی، نوسانات سطح آب تشدید می‌شود؛ به گونه‌ای که بیشترین افزایش ارتفاع سطح آب در بالادست و کمترین آن در پایین دست برای بزرگ‌ترین درصد تنگ‌شدگی به دست آمد. همچنین مشاهده شد که با افزایش تنگ‌شدگی، پهنای ناحیه گردابه‌های پایین دست آبشکن نیز گسترش می‌یابد.

(واقفی و همکاران، ۲۰۱۷) در مجموعه‌ای از آزمایش‌های کانالی، رفتار جریان پیرامون آبشکن T شکل را در یک قوس رودخانه‌ای با دیواره‌های قائم صلب مورد مطالعه قرار دادند. نتایج آن‌ها نشان داد که جریان ثانویه از حدود زاویه ۳۰ درجه قوس آغاز می‌شود و تا حدود ۶۵ درجه به تدریج تضعیف می‌گردد. علاوه بر این، شکل‌گیری گردابه‌ها و جریان‌های معکوس در نواحی بالادست و پایین دست آبشکن به خوبی مشاهده شد که بیانگر پیچیدگی میدان جریان در مجاورت این نوع سازه‌ها است.

(Pandey و همکاران، ۲۰۲۰) در مطالعه‌ای، تأثیر زاویه قوس بر توزیع تنش برشی اطراف آبشکن را مورد ارزیابی قرار دادند. نتایج نشان داد که با افزایش زاویه قوس از ۴۵ به ۱۳۵ درجه، مقدار تنش برشی در پایین دست آبشکن به صورت قابل ملاحظه‌ای افزایش می‌یابد. مقایسه سه زاویه ۴۵، ۹۰ و ۱۳۵ درجه نشان داد که قوس ۱۳۵ درجه با ایجاد تنش برشی حدود ۲٫۵ برابر بزرگ‌تر نسبت به قوس ۴۵ درجه، عمق آبشستگی را به طور چشمگیری افزایش می‌دهد. این یافته‌ها اهمیت هندسه قوس و زاویه انحنا را در طراحی و جانمایی آبشکن‌ها برجسته می‌کند.

در میان تحقیقات صورت گرفته، مطالعه آزمایشگاهی (اسمعیلی و همکاران، ۱۴۰۱) به عنوان یکی از منابع شاخص در حوزه آبشکن‌های سری نفوذپذیر در کانال‌های پیچانرودی مطرح است. در این پژوهش، آبشکن‌های سری ساده نفوذپذیر و نفوذناپذیر در یک کانال پیچانرودی شامل سه قوس متوالی ۴۵، ۹۰ و ۴۵ درجه نصب شدند و آبشکن‌ها در نیمه دوم خم ۹۰ درجه جانمایی گردیدند. پژوهشگران با اعمال تغییرات در دبی جریان، درصد نفوذپذیری و طول آبشکن، تأثیر این پارامترها را بر الگوی توزیع سرعت در مقاطع عرضی مختلف بررسی کردند. نتایج حاصله نشان داد که بیشترین کاهش سرعت جریان در ناحیه واقع بین آبشکن اول و دوم اتفاق می‌افتد و چگونگی ترکیب پارامترهای هندسی و هیدرولیکی می‌تواند به طور چشمگیری بر کارایی حفاظتی آبشکن‌ها و میزان کاهش سرعت در محدوده ساحل بیرونی اثرگذار باشد.

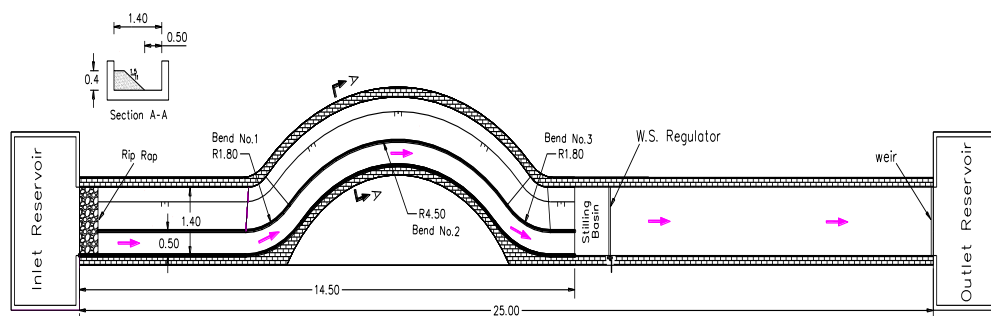
با وجود دستاوردهای ارزشمند این گروه از مطالعات، بخش قابل توجهی از پژوهش‌های پیشین یا در کانال‌های مستقیم انجام شده‌اند، یا تنها یک شکل هندسی مشخص از آبشکن را بررسی کرده‌اند؛ از این رو، یک ارزیابی منسجم و مقایسه‌ای از تأثیر اشکال مختلف آبشکن‌های سری نفوذپذیر در قوس بیرونی رودخانه‌های پیچانرودی همچنان محدود است. بر این اساس، پژوهش حاضر با تکیه بر داده‌ها و نتایج به دست آمده از کار اسمعیلی و همکاران و با بهره‌گیری از مدلسازی دوبعدی در نرم افزار HEC-RAS 2D، به مقایسه کارایی هندسه‌های مختلف آبشکن‌های سری نفوذپذیر با نفوذپذیری ۲۵ درصد در کاهش سرعت جریان در قوس بیرونی یک پیچانرود، تحت دبی ثابت ۴۰ لیتر بر ثانیه و برای دو شعاع قوس ۳۰۵ و ۴۰۵ متر پرداخته‌است.

۳- روش تحقیق

مدل آزمایشگاهی مرجع (اسمعیلی و همکاران، ۱۴۰۱) شامل ترکیبی از بازه‌های مستقیم و قوسی است که در مجموع طولی معادل ۲۶ متر دارد، در حالی که تصویر پلان آن در امتداد افق ۲۵ متر را نشان می‌دهد. به بیان دیگر، حضور قوس‌ها باعث افزایش حدود یک متر در طول واقعی مسیر جریان نسبت به طول افقی شده است. مقطع عرضی کانال به صورت مستطیلی با عرض ۱/۴ متر و ارتفاع ۰/۶ متر طراحی شده و کف آن از بتن صلب ساخته شده است. در ابتدای کانال، یک مخزن آرام‌کننده قرار دارد که از طریق یک قطعه تبدیل به کانال آزمایشگاهی متصل می‌شود. به منظور کاهش تلاطم ورودی و جلوگیری از

فرسایش جداره شیب‌دار ابتدای کانال، در ورودی، حوضچه‌های آرامش با طول تقریبی ۱ متر از مصالح دانه‌درشت تعبیه گردید. پس از این حوضچه، بخشی مستقیم از کانال به طول حدود ۴ متر قرار گرفته و سپس جریان وارد بخش قوسی می‌شود.

ناحیه قوسی شامل سه بخش متوالی به ترتیب یک قوس چپ‌گرد، یک قوس راست‌گرد و مجدداً یک قوس چپ‌گرد است که در مجموع طولی حدود ۱۰ متر دارند و با زوایای ۴۵، ۹۰ و ۴۵ درجه به هم متصل شده‌اند. در پایین دست این بخش، کانال دوباره به طول تقریبی ۱۱ متر به صورت مستقیم ادامه یافته و در نهایت به مخزن تخلیه‌کننده ختم می‌شود. در انتهای کانال، برای اندازه‌گیری دبی جریان، یک سرریز مستطیلی نصب شده و به منظور کنترل تراز سطح آب، یک دریچه تنظیمی در نظر گرفته شده است. جهت ایجاد جداره فرسایش‌پذیر در سمت چپ کانال، ابتدا نوار ثابتی به عرض ۰/۵ متر از سمت راست مقطع به عنوان کف غیرقابل فرسایش اختصاص داده شده و در سمت چپ، شیب کناری با شیب یک به یک و نیم (یک عمودی به یک و نیم افقی) از جنس ماسه اجرا شده است. آزمایش‌ها برای سه دبی ۳۰، ۳۵ و ۴۰ لیتر بر ثانیه انجام گرفته و عمق جریان در محدوده قوس در حدود ۱۲ سانتی‌متر ثابت نگه داشته شده است. اندازه‌گیری تراز سطح آب با استفاده از دستگاه Point Gage با دقت ۰/۲ میلی‌متر صورت گرفته است. با توجه به محدودیت‌های طراحی، حداکثر میزان تنگ‌شدگی عرض جریان در محل استقرار آبشکن‌ها از ۳۰ درصد عرض کانال تجاوز نکرده است. آبشکن‌های نفوذپذیر به کار رفته از لوله‌های پلی‌اتیلنی با قطر ۱۰ میلی‌متر ساخته شده‌اند و برای حصول وضعیت غیرمستغرق، طول لوله‌ها در ارتفاع ۳۰ سانتی‌متر بریده شده تا آبشکن‌هایی با ارتفاع ۰/۳ متر نسبت به کف کانال ایجاد شود (شکل ۱).



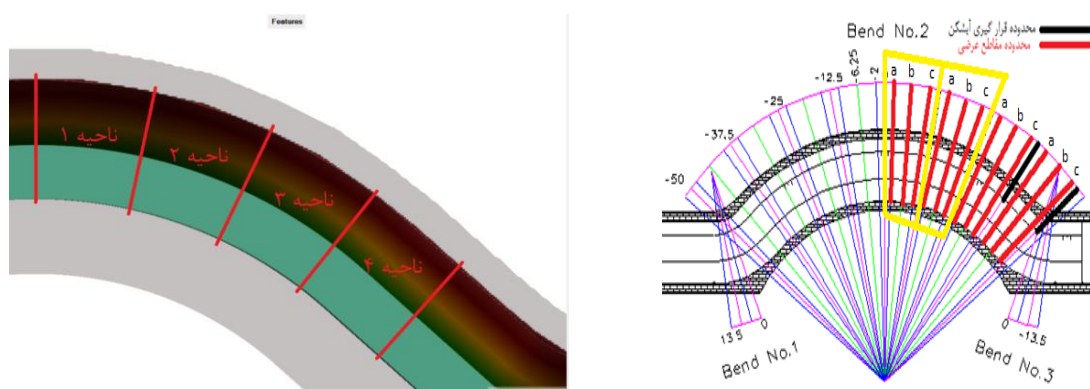
شکل ۱: نمای پلان کانال آزمایشگاهی پیچان‌رودی

این تحقیق ماهیتی کاربردی داشته و بر پایه شبیه‌سازی عددی انجام شده است. در گام نخست، هندسه کانال پیچان‌رودی مطابق شرایط مدل فیزیکی مرجع در محیط نرم‌افزار دوبعدی HEC-RAS 2D بازسازی گردید. کانال شبیه‌سازی شده دارای یک قوس با شعاع ۴/۵ متر و یک قوس جداگانه دیگر با شعاع ۳/۵ متر بوده و در ساحل بیرونی این قوس، آرایشی از آبشکن‌های سری با نفوذپذیری ۲۵ درصد تعبیه شده است. به منظور بررسی تأثیر شکل پلان آبشکن‌ها، چهار فرم مختلف شامل آبشکن‌های L، T، L معکوس و I به صورت سناریوهای مستقل در هر کانال با قوس جداگانه در مدل تعریف و تحلیل شد، به گونه‌ای که در هر سناریو تنها شکل هندسی آبشکن تغییر کرده و سایر پارامترهای هندسی و هیدرولیکی ثابت نگه داشته شدند.

در ادامه، شرایط مرزی و هیدرولیکی مدل بر مبنای داده‌های آزمایشگاهی تنظیم گردید. یک دبی ورودی ۴۰ لیتر بر ثانیه به عنوان جریان ورودی در مرز بالادست تعریف شد و در مرز پایین دست، شرط عمق جریان با توجه به شیب و تراز کف کانال اعمال گردید. شبکه محاسباتی دوبعدی با دقت مناسب، به‌ویژه در محدوده قوس بیرونی و اطراف آبشکن‌ها، تولید شد؛ به‌طوری که ابعاد المان‌ها در حدود ۰/۱ در ۰/۱ متر انتخاب گردید تا تغییرات موضعی سرعت و الگوی جریان با جزئیات کافی شبیه‌سازی شود.

برای ارزیابی دقت مدل نواحی کانال به مانند شکل ۲ تقسیم‌بندی شد و نرم‌افزار HEC-RAS 2D از طریق مقایسه مقادیر سرعت محاسباتی با سرعت‌های اندازه‌گیری شده در مدل آزمایشگاهی، مورد کالیبراسیون و صحت‌سنجی قرار گرفت. نتایج

این مرحله نشان داد که مدل قادر است میدان سرعت جریان را با میانگین خطایی در حدود ۸ درصد بازتولید کند که از دید مهندسی قابل قبول ارزیابی می‌شود (جدول ۱).



شکل ۲: کانال و ناحیه‌ها در قوس خارجی

جدول ۱: مقایسه درصد خطاهای ناحیه اول و دوم در مدل شاهد

ناحیه اول				
مقطع عرضی	a	b	c	میانگین سه مقطع
درصد (%)	۶/۵	۷/۲۴	۷/۸	۷/۱۲
ناحیه دوم				
مقطع عرضی	a	b	c	میانگین سه مقطع
درصد (%)	۸/۱۶	۷/۵	۵/۹	۷/۱۸

پس از اتمام کالیبراسیون، برای هر ترکیب از «شکل هندسی آبشکن» و «شعاع قوس کانال»، شبیه‌سازی جداگانه‌ای انجام شد و میدان دوبعدی سرعت در سراسر بازه قوسی استخراج گردید. معیار اصلی برای سنجش عملکرد اشکال مختلف آبشکن، درصد کاهش میانگین سرعت در ناحیه ساحل بیرونی قوس نسبت به حالت شاهد (بدون آبشکن) بود. بدین منظور، چندین مقطع عرضی (شکل ۲) در طول قوس تعریف شده و پروفیل‌های توزیع سرعت در هر حالت استخراج و با یکدیگر مقایسه گردید تا اثر آبشکن‌ها بر کاهش سرعت و بهبود شرایط هیدرولیکی در قوس کانال تحلیل شود.

۴- تفسیر

نتایج شبیه‌سازی عددی نشان می‌دهد که حضور آبشکن‌های نفوذپذیر در قوس بیرونی کانال، الگوی جریان را به‌صورت قابل ملاحظه‌ای اصلاح کرده و از تمرکز بیش از حد سرعت در مجاورت ساحل بیرونی جلوگیری می‌کند. مقایسه دو شعاع قوس ۳۰۵ و ۴۰۵ متر نشان داد که هندسه قوس نقش مهمی در میزان تأثیرگذاری آبشکن‌ها دارد؛ به‌طوری‌که در قوس تندتر (شعاع ۳۰۵ متر)، تمایل جریان به سمت دیواره بیرونی بیشتر بوده و در نتیجه، پتانسیل فرسایش در این ناحیه بالاتر است. در چنین شرایطی، عملکرد مؤثر آبشکن‌ها در کاهش سرعت و انحراف بخشی از جریان به سمت داخل قوس اهمیت بیشتری پیدا می‌کند.

بررسی توزیع سرعت در مقاطع مختلف قوس نشان داد که به کارگیری آبشکن‌های نفوذپذیر، با ایجاد ناحیه‌ای از جریان کم‌سرعت در پشت و بین آبشکن‌ها، موجب کاهش میانگین سرعت در مجاورت ساحل بیرونی می‌شود. این ناحیه کم‌سرعت، مانند یک لایه حفاظتی عمل کرده و از انتقال مستقیم جریان پراثرژی به دیواره بیرونی جلوگیری می‌نماید. در عین حال، به دلیل نفوذپذیر بودن آبشکن‌ها، شدت گردابه‌ها و آشفتگی موضعی نسبت به آبشکن‌های نفوذناپذیر کمتر شده و الگوی جریان یکنواخت‌تری در مجاورت ساحل ایجاد می‌شود.

از مقایسه چهار شکل هندسی آبشکن‌ها در دو شعاع قوس می‌توان دریافت که تفاوت در پلان آبشکن‌ها، نحوه توسعه ناحیه حفاظت‌شده و جهت‌گیری جریان اصلی را تحت تأثیر قرار می‌دهد. آبشکن‌های نوع T به دلیل داشتن سر پهن در انتهای بازوی اصلی، سطح مؤثر بیشتری در مقابل جریان ایجاد کرده و در عین حال، با هدایت بخشی از جریان به سمت وسط کانال، کاهش قابل توجهی در سرعت ساحل بیرونی ایجاد می‌کنند. در مقابل، آبشکن‌های I با پلان ساده و باریک، تأثیر کمتری در انحراف جریان داشته و در نتیجه، کاهش سرعت در ساحل بیرونی برای این هندسه محدودتر است.

در قوس با شعاع ۳۰۵ متر، به دلیل شدت بیشتر جریان ثانویه و تمرکز خطوط جریان در سمت بیرونی، اختلاف عملکرد بین هندسه‌های مختلف آبشکن برجسته‌تر می‌شود. نتایج نشان می‌دهد که در این شعاع، آبشکن‌های T و تا حدی L، عملکرد بهتری در کاهش سرعت و گسترش ناحیه کم‌سرعت در ساحل بیرونی دارند، در حالی که آبشکن‌های L معکوس و I، به‌ویژه در بخش‌های میانی و انتهایی قوس، کارایی ضعیف‌تری از خود نشان می‌دهند. در قوس با شعاع ۴۰۵ متر، به دلیل کاهش شدت انحنا و ملایم‌تر بودن الگوی جریان، اختلاف بین اشکال مختلف آبشکن کمتر شده، با این حال همچنان برتری نسبی آبشکن‌های T در کاهش سرعت ساحل بیرونی قابل مشاهده است.

به طور کلی، می‌توان گفت که ترکیب «قوس تندتر» با «آبشکن مناسب» می‌تواند در مدیریت خطر فرسایش در پیچان‌روها مؤثرتر از شرایط قوس ملایم بدون آبشکن یا با آبشکن‌های کم‌اثر باشد. نتایج به‌دست‌آمده نشان می‌دهد که انتخاب صحیح هندسه آبشکن، به‌ویژه در قوس‌هایی با شعاع کم و جریان‌های با دبی بالاتر، نقش تعیین‌کننده‌ای در کاهش انرژی جریان در مجاورت ساحل بیرونی و در نتیجه کاهش پتانسیل فرسایش دارد.

۵- تحلیل نتایج

برای تحلیل عددی عملکرد هندسه‌های مختلف آبشکن و تأثیر شعاع قوس، شاخص «درصد کاهش میانگین سرعت در ساحل بیرونی قوس نسبت به حالت شاهد» مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که در هر دو شعاع قوس، استفاده از آبشکن‌های نفوذپذیر باعث کاهش معنی‌دار میانگین سرعت در ناحیه ساحل بیرونی می‌شود، اما مقدار این کاهش، وابستگی قابل توجهی به شکل هندسی آبشکن و شعاع قوس دارد.

در قوس با شعاع ۴۰۵ متر، بیشترین کاهش میانگین سرعت در ساحل بیرونی مربوط به آبشکن‌های T بود؛ به گونه‌ای که میانگین کاهش سرعت در ناحیه اول (بیشترین کاهش) ۳۶/۱۵ درصد بود. سپس در همان ناحیه آبشکن‌های L، L معکوس و مستقیم به ترتیب در مرتبه بعدی قرار گرفتند. به صورت کلی در کل مسیر کانال (هر چهار ناحیه) همین الگو تکرار شده است (جدول ۲ تا ۵).

جدول ۲: درصد کاهش سرعت آب در مدل اصلی نسبت به مدل شاهد ناحیه اول

آبشکن‌های نفوذپذیر ۲۵ درصد				
آبشکن L شکل	آبشکن T شکل	آبشکن I شکل	آبشکن I شکل	دبی lit/sec
29.68	36.15	27.83	21.92	Q=40

جدول ۳: درصد کاهش سرعت آب در مدل اصلی نسبت به مدل شاهد ناحیه دوم

آبشکن های نفوذپذیر ۲۵ درصد				
آبشکن L شکل	آبشکن T شکل	آبشکن L شکل	آبشکن I شکل	دبی lit/sec
28.82	35.37	27.78	21.53	Q=40

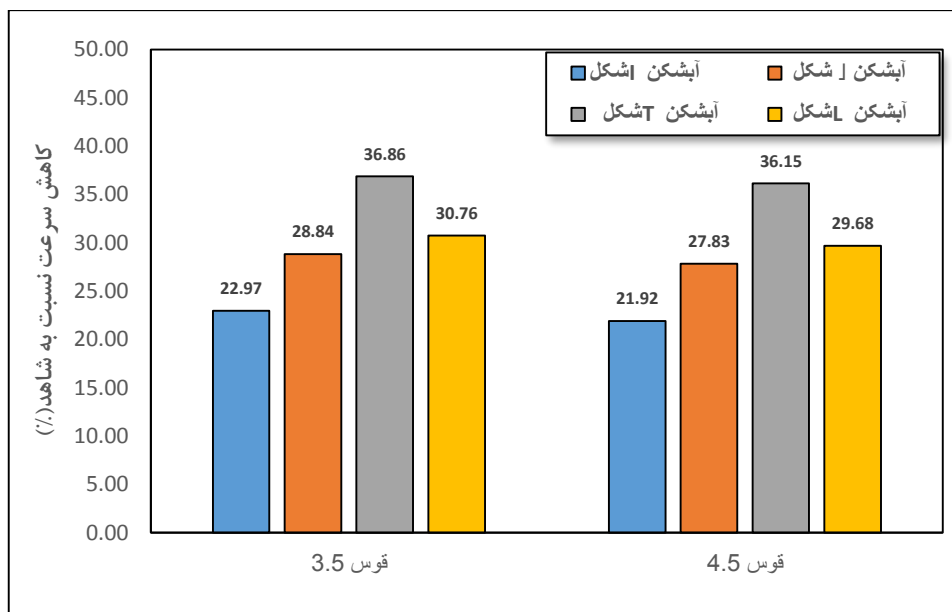
جدول ۴: درصد کاهش سرعت آب در مدل اصلی نسبت به مدل شاهد ناحیه سوم

آبشکن های نفوذپذیر ۲۵ درصد				
آبشکن L شکل	آبشکن T شکل	آبشکن L شکل	آبشکن I شکل	دبی lit/sec
28.78	34.45	27.20	21.05	Q=40

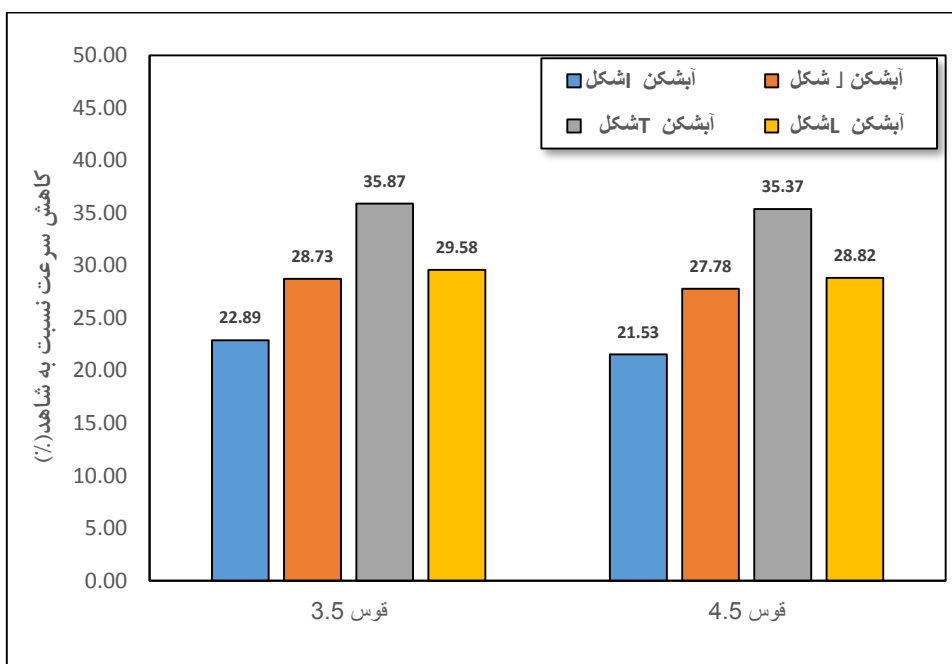
جدول ۵: درصد کاهش سرعت آب در مدل اصلی نسبت به مدل شاهد ناحیه چهارم

آبشکن های نفوذپذیر ۲۵ درصد				
آبشکن L شکل	آبشکن T شکل	آبشکن L شکل	آبشکن I شکل	دبی lit/sec
28.73	34.21	27.13	20.92	Q=40

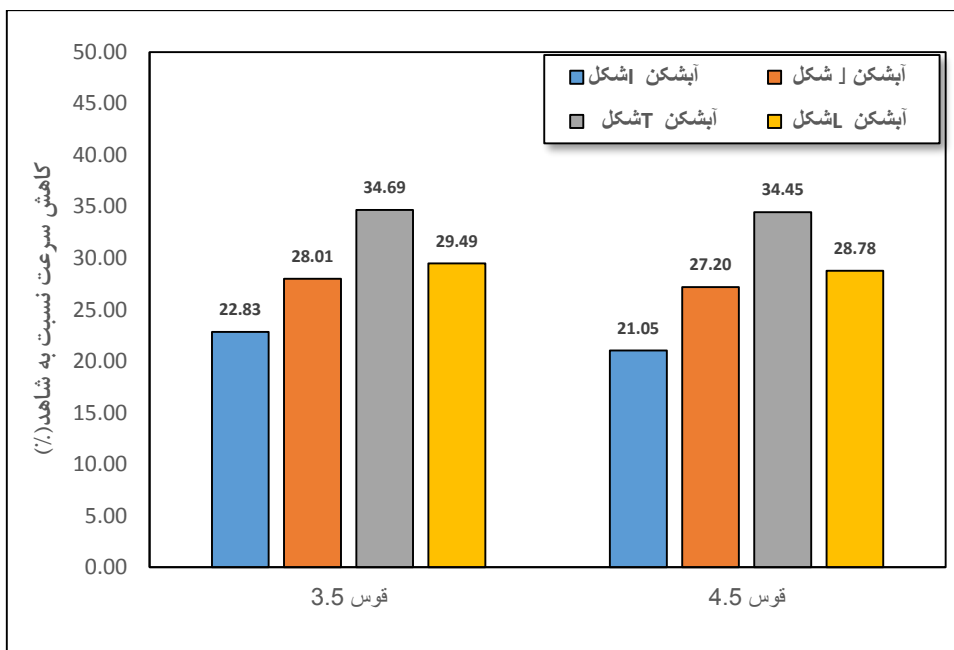
در قوس با شعاع ۳۰۵ متر، الگوی کلی نتایج مشابه شعاع ۴۰۵ متر است، اما شدت کاهش سرعت بین هندسه‌ها افزایش یافته است. به طوری که برای هندسه T شکل عدد ۳۶/۸۶ گزارش شده است. از مقایسه درصد کاهش سرعت بین دو شعاع قوس می‌توان نتیجه گرفت که در قوس تندتر (۳۰۵ متر)، نقش هندسه آبشکن پررنگ‌تر است. این نتایج، برتری آبشکن‌های T و سپس L را در هر دو شعاع قوس و تشدید اختلاف عملکرد در قوس تندتر (۳۰۵ متر) تأیید می‌کند. در شکل‌های ۳ تا ۶ مقایسه تمامی هندسه آبشکن‌ها در دو قوس در تمام نواحی مد نظر انجام شده است.



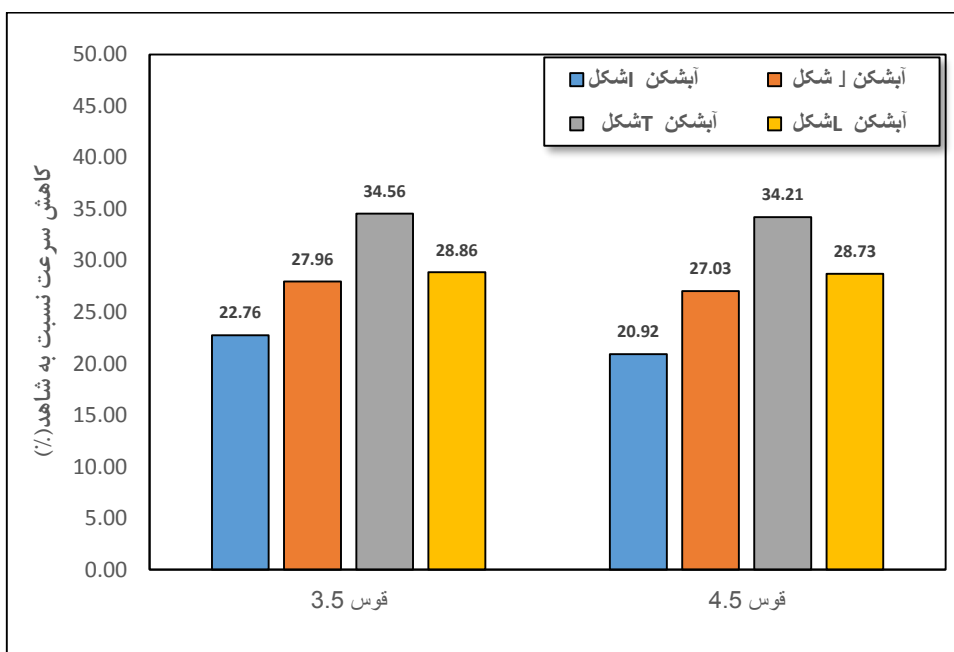
شکل ۳- مقایسه کاهش سرعت آب در مدل اصلی نسبت به مدل شاهد (ناحیه اول)



شکل ۴- مقایسه کاهش سرعت آب در مدل اصلی نسبت به مدل شاهد (ناحیه دوم)



شکل ۵- مقایسه کاهش سرعت آب در مدل اصلی نسبت به مدل شاهد (ناحیه سوم)



شکل ۶- مقایسه کاهش سرعت آب در مدل اصلی نسبت به مدل شاهد (ناحیه چهارم)

۶- نتیجه گیری

در این پژوهش، تأثیر شکل هندسی آبشکن‌های نفوذپذیر و شعاع قوس بر الگوی جریان و کاهش سرعت در ساحل بیرونی یک کانال پیچانرودی با استفاده از مدل دوبعدی HEC-RAS 2D مورد بررسی قرار گرفت. هندسه کانال بر اساس مدل آزمایشگاهی مرجع بازسازی شده و دو شعاع قوس ۳۰۵ و ۴۰۵ متر، همراه با چهار شکل مختلف آبشکن (L، T، L معکوس و I) تحت دبی ثابت ۴۰ لیتر بر ثانیه شبیه‌سازی گردید. نتایج کالیبراسیون نشان داد که مدل عددی با میانگین خطای حدود ۸ درصد در بازتولید میدان سرعت، از دقت کافی برای تحلیل‌های مهندسی برخوردار است.

مقایسه سناریوهای مختلف نشان داد که استفاده از آبشکن‌های نفوذپذیر، به‌طور کلی باعث کاهش معنی‌دار سرعت در ناحیه ساحل بیرونی قوس و بهبود الگوی توزیع سرعت در عرض کانال می‌شود. در این میان، آبشکن‌های T در هر دو شعاع قوس، بهترین عملکرد را در کاهش میانگین سرعت ساحل بیرونی و انتقال ناحیه پرسرعت به سمت میانه کانال از خود نشان دادند. آبشکن‌های L نیز عملکرد نسبتاً مناسبی داشتند، در حالی که هندسه‌های I و L معکوس، کمترین کاهش سرعت را ایجاد کرده و در برخی مقاطع، همچنان مقادیر قابل توجهی از سرعت در مجاورت دیواره بیرونی باقی ماند.

مقایسه دو شعاع قوس نشان داد که در قوس تندتر با شعاع ۳۰۵ متر، گرچه شدت تمرکز جریان در ساحل بیرونی بیشتر است، اما به‌کارگیری هندسه مناسب آبشکن می‌تواند نقش مؤثری در کاهش سرعت و کنترل پتانسیل فرسایش ایفا کند. همچنین، اختلاف عملکرد بین اشکال مختلف آبشکن در شعاع ۳۰۵ متر بیشتر از شعاع ۴۰۵ متر است که بیانگر حساسیت بیشتر پیچانرودهای تند به نوع طرح آبشکن می‌باشد (جدول ۶).

به طور کلی، نتایج این مطالعه نشان داد که:

۱. آبشکن‌های نفوذپذیر سری با نفوذپذیری ۲۵ درصد، ابزار مؤثری برای کاهش سرعت و حفاظت سواحل بیرونی در قوس‌های کانال هستند.
۲. هندسه آبشکن نقش کلیدی در میزان کارایی آن دارد و در بین هندسه‌های مورد بررسی، پلان T به‌عنوان گزینه برتر معرفی می‌شود.
۳. در قوس‌های تندتر (شعاع کمتر)، انتخاب شکل مناسب آبشکن از اهمیت بیشتری برخوردار است و می‌تواند تا حد زیادی اثرات نامطلوب افزایش انحنا بر تمرکز جریان و فرسایش را کاهش دهد.

جدول ۶: متوسط درصد کاهش در چهار نوع آبشکن و در میانگین چهار ناحیه

نفوذپذیری	شعاع قوس (متر)	متوسط درصد کاهش در میانگین چهار ناحیه آبشکن‌ها			
		آبشکن I شکل	آبشکن L شکل	آبشکن T شکل	آبشکن L شکل
25%	3.5	22.87	28.39	35.50	29.43
	4.5	21.36	27.49	35.05	29.00

فهرست مراجع

1. Vaghefi, M., M. Ghodsian and M. Akbari. 2017. Experimental investigation on 3D flow around a single Tshaped spur dike in a bend. *Period. Polytech. Civil Eng*, 61(3): 462-470.
2. Elyasi, S., A. Eghbalzade, M. Javan and M. Vaghefi . 2016. Effect of Section Constriction Due to T-shaped Spur Dike in a Bend on Flow Pattern Using FLOW-3D Software. *Iranian Journal of Irrigation and Drainage*, 6(9): 983-993 (in Persian).
3. Pandey, M., & Ahmad, Z. (2020). Effect of bend angle on shear stress distribution around a spur dike in open- channel bends. *Environmental Fluid Mechanics*, 20(3), 689–712.
4. Shajaian, Z., Kashefipour, S. M., Mousavi Jahromi, S. H., & Shafaei Bejestan, M. (2015). *Experimental analysis of the effect of Bandal-like spur dikes on longitudinal velocity profiles*. *Danesh Ab va Khak (Quarterly)*, 25(2)
5. 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.