

Document Type

Applied Article

پژوهش کاربردی

نوع مقاله

Numerical Analysis of the Three-Dimensional Flow Field Around Riverbank Spur Dikes in a Grouped Arrangement

F. Golchin¹, N. Kardan^{2*}, M. Dini²

1,2- M.Sc. Graduate and Associate Professor of Civil Engineering- Water Engineering and Hydraulic Structures, Faculty of Technical and Engineering, Azarbaijan Shahid Madani University, Tabriz, Iran.

* Corresponding Author Email: n.kardan@azaruniv.ac.ir

Received 12-04-2025
Revised 10-06-2025
Accepted 15-06-2025
Available online 16-12-2025

بررسی عددی میدان سه بعدی جریان پیرامون آب شکن های رودخانه ای در حالت قرارگیری گروهی

فریبا گلچین^۱، نازیلا کاردان^{۲*}، مهدی دینی^۲

۱ و ۲- به ترتیب دانش آموز خسته کارشناسی ارشد و دانشیار مهندسی عمران-مهندسی آب و سازه های هیدرولیکی، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه شهید مدنی آذربایجان، تبریز، ایران.

ایمیل نویسنده مسئول: n.kardan@azaruniv.ac.ir

تاریخ دریافت ۱۴۰۴/۰۱/۲۳
تاریخ بازنگری ۱۴۰۴/۰۳/۲۰
تاریخ پذیرش ۱۴۰۴/۰۳/۲۵
تاریخ انتشار ۱۴۰۴/۰۹/۲۵

Abstract

The construction of erosion-controlling structures like spur dikes can unintentionally create local flow structures, leading to downstream flow affecting the channel bed upstream of the spur dike. This can result in shear layers, turbulence, localized erosion, and threats to the spur dike structure. Therefore, studying the placement of spur dikes in proximity under different hydraulic conditions is crucial for enhancing the design of these structures. In this study, the three-dimensional flow field around river spur dikes in grouped configurations was numerically analyzed using Fluent software to explore how the spacing of spur dikes influences the hydraulic behavior of the flow. The findings suggest that increasing the distance between spur dikes reduces the length of vortices. On average, the bed shear stress decreased to 0.6 N/m² at a distance ratio of Li/LAP equal to 5, and to 0.13 N/m² at a ratio of 7. Furthermore, at a distance ratio of 4 and flow velocities of 0.345, 0.7, and 1.2 m/s, the maximum bed shear stress was found to be 0.6, 2.6, and 7 N/m², respectively. This indicates the direct impact of flow velocity on the intensity of erosional phenomena on the bed. The reduction in bed shear stress suggests that as the distance between the spur dikes increases, the interactive effects of vortices and the intensification of shear stresses on the bed significantly decrease.

Keywords: Spur Dike, Flow Pattern, Numerical Model, Bed Shear Stress, Fluent Software.

چکیده

احداث سازه هایی مانند آب شکن اگرچه به کنترل فرسایش کمک می کند، اما ممکن است به دلیل ایجاد ساختارهای موضعی جریان، پیامدهای ناخواسته ای به همراه داشته باشد. این ساختارها شامل انبساط و انقباض ناگهانی در مقطع عبور جریان هستند که می توانند منجر به شکل گیری جریان رو به پایین و برخورد آن به بستر آبراهه در بالادست آب شکن شوند. این برخورد، لایه های برشی و آشفتگی های ناشی از آن را ایجاد می کند که می تواند به فرسایش موضعی و تهدید پایداری خود سازه آب شکن منجر شود. از این رو، بررسی قرارگیری آب شکن ها در مجاورت یکدیگر تحت شرایط هیدرولیکی مختلف، به بهبود طراحی این سازه ها کمک شایانی می کند. این پژوهش به بررسی سه بعدی میدان جریان پیرامون آب شکن های رودخانه ای در حالت قرارگیری گروهی با استفاده از نرم افزار فلونت پرداخته و تأثیر فاصله قرارگیری آب شکن ها بر رفتار هیدرولیکی جریان را مورد ارزیابی قرار داده است. نتایج نشان داد با افزایش فاصله بین آب شکن ها، طول گردابه ها به طور قابل ملاحظه ای کاهش می یابد. به طور میانگین، تنش برشی بستر در نسبت فاصله L_i/L_{AP} برابر ۵ به ۰/۶ نیوتن بر مترمربع و در نسبت فاصله ۷ به ۰/۱۳ نیوتن بر مترمربع کاهش یافت. همچنین در نسبت فاصله ۴ و در سرعت های جریان ۰/۳۴۵، ۰/۷۰ و ۱/۲۰ متر بر ثانیه، بیشینه تنش برشی بستر به ترتیب برابر ۰/۶، ۲/۶ و ۷ نیوتن بر مترمربع به دست آمد که نشان دهنده تأثیر مستقیم سرعت جریان بر شدت پدیده های فرسایشی بستر است. کاهش تنش برشی بستر بیانگر آن است که با افزایش فاصله بین آب شکن ها، اثرات متقابل گردابه ها و تشدید تنش های برشی در بستر به طور قابل توجهی کاهش می یابد.

واژه های کلیدی: آب شکن، الگوی جریان، مدل عددی، تنش برشی بستر، نرم افزار فلونت.

How to cite this article:

Golchin, F., Kardan, N., and Dini, M. (2025). Numerical Analysis of the Three-Dimensional Flow Field around Riverbank Spur Dikes in a Grouped Arrangement. Journal of Water and Sustainable Development, 12(3), 45- 62. <https://doi.org/10.22067/jwsd.v12i3.2504-1417>

عمود افزایش می‌یابد. همچنین قدرت جریان ثانویه در نزدیکی آب‌شکن برای زوایای کمتر از ۱۵ درجه در حالات جاذب و دافع نیز حدود ۲۰ درصد افزایش داشته است. این مقادیر برای سایر زوایا کاهشی بوده است. [Kumar و همکاران \(۲۰۱۸\)](#) با بررسی آبشستگی اطراف آب‌شکن آب‌شکن‌های ساده و T شکل نشان دادند آب‌شکن T شکل در حفاظت از بستر و کاهش عمق آبشستگی و خرابی سازه‌های آبی مؤثرتر می‌باشد.

[Kumar و Patel \(۲۰۲۴\)](#) به‌صورت تجربی به بررسی تغییرات زمانی در مورفولوژی بستر و فرسایش اطراف آب‌شکن‌های مستطیلی با زوایای مختلف پرداختند. نتایج این پژوهش نشان داده است در زاویه قرارگیری ۹۰ درجه بیشترین عمق فرسایش حاصل شده و زاویه ۱۲۰ درجه کمترین عمق فرسایش را دارد. [Li و همکاران \(۲۰۲۶\)](#) عمق و حجم فرسایش موضعی ناشی از آب‌شکن‌ها را با رویکرد بهینه‌سازی طراحی آب‌شکن‌ها برای حفاظت از زیستگاه‌های آبی و تثبیت دیواره رودخانه‌ها بررسی نمودند. این مطالعه شامل آزمایش‌های آزمایشگاهی برای اندازه‌گیری حجم حفره فرسایش در شرایط مختلف جریان است. [Ohtsuki و همکاران \(۲۰۲۴\)](#) با بررسی تأثیر آب‌شکن‌ها بر حفظ ظرفیت جریان کانال در بخش‌های مستقیم و قوس‌دار رودخانه‌ها نشان داد آب‌شکن‌ها می‌توانند در کاهش رسوب‌گذاری و ایجاد زیستگاه‌های محیطی مؤثر باشند.

[کشاوری و حکیم زاده \(۱۳۸۷\)](#) به بررسی عددی الگوی جریان اطراف آب‌شکن‌های عمود بر ساحل و مایل نسبت به ساحل پرداختند و دریافتند تشکیل گردابه در آب‌شکن مایل به‌صورت ملایم‌تری نسبت به آب‌شکن عمود بر ساحل صورت می‌گیرد که می‌تواند سبب آبشستگی کمتری در بالادست این آب‌شکن‌ها شود. همچنین نتیجه گرفتند تنش برشی در بستر در حالت آب‌شکن مایل کمتر از آب‌شکن عمود بوده و باعث افزایش طول عمر آب‌شکن مایل خواهد بود. [صفرزاده \(۱۳۸۹\)](#) به‌صورت آزمایشگاهی هیدرودینامیک سه‌بعدی حول تک آب‌شکن با شکل‌های مختلف دماغه، در یک کانال با بستر صلب و تخت را بررسی و نشان داد ساختار جریان متوسط و آشسته حول آب‌شکن‌های مستقیم و غیرمستقیم کاملاً متفاوت است و این موجب می‌شود جریان حول سازه و توزیع تنش برشی بستر کاملاً تحت تأثیر قرار گیرد. [اعزی و همکاران \(۱۳۹۷\)](#) با استفاده از مدل عددی دوبعدی CCHE-2D الگوی جریان و تغییرات بستر آبراهه در اطراف سازه آب‌شکن را شبیه‌سازی کردند. در این پژوهش مدل عددی با دقت مناسبی الگوی جریان را در اطراف آب‌شکن منفرد و سری آب‌شکن‌ها شبیه‌سازی می‌نماید.

[اسمعیلی و همکاران \(۱۳۹۹\)](#) به بررسی آزمایشگاهی تأثیر حضور و عدم حضور آب‌شکن‌های سری بر مؤلفه‌های طولی سرعت در یک کانال پیچان‌رود پرداختند و دریافتند حضور

آب‌شکن‌ها از جمله سازه‌های متداول در مهندسی رودخانه می‌باشند که به‌منظور تعدیل در شرایط هیدرولیکی جریان و کاهش میزان حمل رسوب استفاده می‌شوند. این نوع سازه برحسب نیاز و اهداف مورد نظر در شکل و انواع مختلفی طراحی و احداث می‌شود. سازه آب‌شکن هرچند که به‌منظور کاهش فرسایش و تثبیت موقعیت رودخانه و کانال‌های آبیاری احداث می‌شود، درعین حال تحت تأثیر پدیده فرسایش در مسیر جریان و ایجاد جریان‌های آشسته چرخشی و گردابی در اطراف آن قرار می‌گیرد ([تیموری یگانه، ۱۴۰۱](#)). در نتیجه بررسی حالت‌های مختلف قرارگیری و اشکال مختلف آب‌شکن‌ها به لحاظ کاهش آشفتگی‌های جریان و در نتیجه کنترل فرسایش کناره‌های رودخانه‌ها بسیار اهمیت دارد. در زمینه بررسی الگوی جریان پیرامون آب‌شکن‌ها پژوهش‌های متعددی انجام یافته است که در ادامه به بررسی اجمالی آن‌ها پرداخته می‌شود.

[Ahmad \(۱۹۵۳\)](#) با استفاده از مطالعه آزمایشگاهی تغییر سطح آب حول تک آب‌شکن واقع در یک کانال مستقیم را اندازه‌گیری کرد و نتیجه گرفت در میدان اطراف آب‌شکن جریان غیریکنواخت شکل خواهد گرفت. [Ikeda و Chen \(۱۹۹۷\)](#) الگوی جریان حول تک آب‌شکن در مسیر جریان را بررسی کردند و دریافتند گردابه‌های چرخشی از ابتدای آب‌شکن جدا شده و به‌صورت متناوب با دوره‌های تناوب معینی به سمت پایین‌دست منتقل می‌شوند. همچنین نتایج این بررسی‌ها نشان داد سرعت متوسط حرکت گردابه‌ها تقریباً ثابت بوده و مقدار آنها کمی بیشتر از ۱/۵ درصد سرعت متوسط است. [Vaghefi و Ghodsian \(۲۰۰۹\)](#) میدان جریان و آبشستگی را در کانال تغییر شکل یافته پیرامون آب‌شکن T شکل منفرد در قوس توسعه یافته بررسی کردند.

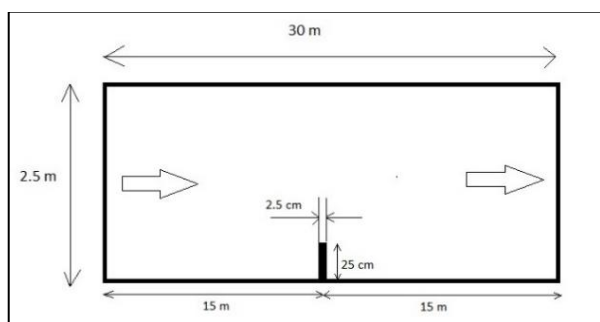
[Yazdi و همکاران \(۲۰۱۰\)](#) الگوی جریان اطراف تک آب‌شکن با استفاده از مدل عددی FLOW-3D را بررسی کردند و میدان جریان سه‌بعدی متلاطم و آبشستگی موضعی بستر در اطراف آب‌شکن با زوایای مختلف را بررسی کردند. [Xiu fang و همکاران \(۲۰۱۲\)](#) الگوی جریان آشسته پیرامون تک آب‌شکن با هندسه متفاوت را مطالعه کردند و دریافتند بیشترین آشفتگی پیرامون آب‌شکن دوزنقه‌ای به وقوع می‌پیوندد. [Jang و Lee \(۲۰۱۶\)](#) اثر فاصله بین آب‌شکن‌های سری بر آبشستگی بستر و الگوی جریان را بررسی کردند و دریافتند عمق آبشستگی در حالت تعادل دینامیک ثابت و عمق آبشستگی بی‌بعد با زیاد شدن فاصله زیاد می‌شود. [Vaghefi و همکاران \(۲۰۱۷\)](#) شرایط جریان در اطراف آب‌شکن T شکل با حضور سازه محافظ را مطالعه کردند و بیان کردند حداکثر تنش برشی بستر برای سازه محافظ در حالت‌های جاذب و دافع حدود ۲۰ درصد نسبت به حالت

پایدار برای مدیریت منابع آبی و حفاظت از محیط زیست نیز انجامیده و در نهایت به افزایش کارایی آبشکن‌ها در کاربردهای مختلف منجر می‌شود. از این رو بررسی گردابه‌های پشت آبشکن‌ها، سرعت جریان در ترازهای مختلف و نیز ارزیابی میزان تنش برشی بستر در نواحی مختلف قرارگیری آبشکن‌ها به صورت عددی و با نرم‌افزار Fluent مورد توجه قرار گرفته است.

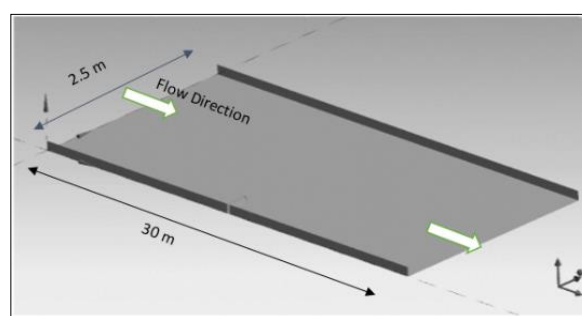
مواد و روش‌ها

مدل آزمایشگاهی در صحت‌سنجی نتایج عددی

در تمامی مدل‌های عددی، برای اطمینان از صحت نتایج عددی، مقادیر به دست آمده از شبیه‌سازی‌های عددی با مقادیر متناظر آن که به صورت آزمایشگاهی و یا میدانی در دسترس می‌باشند مقایسه شده و درستی آنها بررسی می‌شود. در این مدل‌سازی عددی، اثر تعداد سلول‌های شبکه در میدان محاسباتی، شرایط مرزی و نیز مدل‌های آشفتگی بررسی می‌شود. همچنین در شبیه‌سازی با نرم‌افزار فلوئنت انتخاب پارامترهای حل نظیر مقادیر پایه گسسته سازی اهمیت ویژه‌ای دارد که مورد توجه قرار گرفته‌اند. برای این مقایسه، از مطالعه آزمایشگاهی Holtz (۱۹۹۱) استفاده شده و مقایسه مقادیر عددی و آزمایشگاهی انجام یافته است. مدل تجربی Holtz (۱۹۹۱) در کانالی به طول ۳۰ متر و عرض ۲/۵ متر با دیوارهای عمودی صاف انجام شده است. میانگین عمق جریان ۲۳/۰ متر و میانگین عمقی سرعت جریان ۳۴۵/۰ متر بر ثانیه است. آبشکنی مستطیل به طول ۲۵ سانتی‌متر و عرض ۲/۵ سانتیمتر بر اساس شکل (۱) در وسط کانال تعبیه شده است.



(ب)



(الف)

شکل ۱- (الف) نمای سه بعدی کانال آزمایشگاهی Holtz (۱۹۹۱) و (ب) نمای دوبعدی از کانال و آبشکن.

فاصله‌ای کافی دور از محل آبشکن قرار گیرد تا اثر آن بر الگوی جریان و آشفتگی‌ها حذف شود. رویکرد مشابهی توسط پژوهشگران دیگر، از جمله Tarek و همکاران (۲۰۰۴) نیز به کار گرفته شده است. بر این اساس، طول کانال ۶ متر تعریف شد و آبشکن در فاصله ۲ متری از ابتدای کانال قرار داده شد.

آبشکن‌های سری ساده موجب کاهش سرعت جریان در دیواره خارجی می‌شود. در پژوهش حاضر با استفاده از مدل عددی دوبعدی SRH-2D که دارای پایه عددی قوی و پایدار و با الگوریتم مشخص است، به بررسی تأثیر زاویه قرارگیری آبشکن در کانال، بر الگوی جریان حول آبشکن با زوایای ۴۵، ۹۰ و ۱۳۵ پرداخته شده است. تیموری یگانه (۱۴۰۱) با استفاده از مدل عددی SRH-2D الگوی جریان در اطراف دیواره آبشکن، با زوایای قرارگیری مختلف در کانال را شبیه‌سازی نمود. نتایج نشان داد در آبشکن با زاویه ۴۵ درجه، طول ناحیه برگشت جریان نسبت به زاویه قرارگیری ۹۰ و ۱۳۵ به ترتیب نزدیک به ۲ و ۸ برابر کمتر خواهد شد. همچنین تنش برشی در نواحی نزدیک به کف در حالت آبشکن با زاویه ۴۵ درجه کمترین مقدار و آبشکن با زاویه ۱۳۵ درجه بیشترین مقدار را دارد.

بررسی تأثیر فاصله آبشکن‌ها بر الگوی جریان، به‌ویژه تغییرات سرعت و تنش برشی بستر اهمیت بالایی دارد. این پارامترها تأثیر مستقیم بر عملکرد و کارایی آبشکن‌ها در کنترل فرسایش و تثبیت کناره‌های رودخانه‌ها دارند. فاصله بهینه بین آبشکن‌ها می‌تواند به شکل‌گیری الگوهای جریان مناسب و کاهش نوسانات سرعت کمک کند که به نوبه خود می‌تواند منجر به کاهش تنش‌های برشی و حفاظت مؤثرتر از بستر رودخانه شود. همچنین، در شرایط مختلف هیدرولیکی، فاصله میان آبشکن‌ها ممکن است تأثیرات متفاوتی بر پدیده‌های گردابه‌ای و توزیع جریان داشته باشد؛ بنابراین، درک و ارزیابی این تأثیرات می‌تواند به بهبود طراحی و استقرار سازه‌های آبشکن و در نتیجه حفاظت بهتر از مناطق ساحلی و رودخانه‌ای کمک کند. این بررسی‌ها نه تنها به تأمین امنیت سازه‌ها و کاهش خطرات ناشی از فرسایش کمک می‌کند، بلکه به توسعه راهکارهای

برای کاهش زمان محاسبات، تنها قسمتی از طول کانال آزمایشگاهی در نظر گرفته شده است، با این شرط که جریان پیش از رسیدن به آبشکن به حالت کاملاً توسعه‌یافته رسیده باشد. Çengel (۲۰۱۸) رابطه $L_e \text{ Turbulent} = 1.359D(Re)^{1/4}$ را برای محاسبه طول توسعه یافتگی کامل در جریان‌های آشفته ارائه کرده است. همچنین، توجه شده است که مقطع خروجی جریان در

نرم افزار فلوئنت (Fluent) به عنوان یکی از پیشرفته ترین ابزار شبیه سازی در زمینه مدل سازی جریان سیال و انتقال حرارت شناخته می شود و توانایی بالایی در تحلیل هندسه های پیچیده دارد. این نرم افزار بر پایه روش حجم محدود عمل می کند و به کاربران این امکان را می دهد که به راحتی شبکه های بی سازمان را برای تحلیل جریان در هندسه های مختلف ایجاد و مدیریت کنند.

فلوئنت قابلیت تولید شبکه های متنوعی را دارد که شامل المان های مثلثی و چهار ضلعی برای هندسه های دوبعدی و همچنین چهار وجهی، شش وجهی و هرمی برای هندسه های سه بعدی می باشد. یکی از ویژگی های بارز این نرم افزار، توانایی بهینه سازی شبکه است که به کاربر امکان می دهد در نواحی خاصی که تغییرات شدید (مانند لایه های مرزی) دارد، شبکه را به طور دقیق تری تنظیم کند. این ویژگی به افزایش دقت نتایج شبیه سازی کمک می کند و زمان لازم برای تولید شبکه های مؤثر را به طور قابل ملاحظه ای کاهش می دهد. نرم افزار فلوئنت به زبان برنامه نویسی C نوشته شده است و از تمامی امکانات و قابلیت های انعطاف پذیر این زبان بهره می برد. این امر موجب می شود تا فلوئنت بتواند از حافظه دینامیک و ساختار داده های بهینه استفاده کند و اطلاعات محاسباتی را به صورت منعطف و کارآمد مدیریت نماید. به همین دلیل، فلوئنت به عنوان یک ابزار کارآمد در حوزه های مختلف علمی و مهندسی، از جمله مهندسی مکانیک، مهندسی شیمی و مهندسی محیط زیست، شناخته شده است. با استفاده از فلوئنت، پژوهشگران و مهندسان می توانند به تحلیل های دقیق و قابل اعتمادی در مسائل پیچیده بپردازند و در نتیجه به بهبود طراحی و عملکرد سیستم های مختلف کمک کنند.

معادلات حاکم

معادلات دوبعدی انتگرال گیری شده در عمق در مدل عددی فلوئنت شامل روابط (۱) تا (۳) می باشد (کاردان و همکاران، ۱۳۹۲):

معادله پیوستگی

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial(hU)}{\partial x} + \frac{\partial(hV)}{\partial y} = 0 \quad (1)$$

معادله مؤمنتم

$$\frac{\partial(hU)}{\partial t} + \frac{\partial(hUU)}{\partial x} + \frac{\partial(hVU)}{\partial y} = \frac{\partial(hT_{xx})}{\partial x} + \frac{\partial(hT_{xy})}{\partial y} - gh \frac{\partial z}{\partial x} - \frac{\tau_{bx}}{\rho} + D_{xx} + D_{xy} \quad (2)$$

$$\frac{\partial(hV)}{\partial t} + \frac{\partial(hUV)}{\partial x} + \frac{\partial(hVV)}{\partial y} = \frac{\partial(hT_{xy})}{\partial x} + \frac{\partial(hT_{yy})}{\partial y} - gh \frac{\partial z}{\partial y} - \frac{\tau_{by}}{\rho} + D_{yx} + D_{yy} \quad (3)$$

در معادلات فوق، t زمان، x و y مختصات دکارتی، h عمق آب، U و V مولفه های سرعت میانگین گیری شده در عمق در جهات x و y هستند، g شتاب ثقل، T_{xx} و T_{xy} تنش های آشفتگی ناشی از جریان متلاطم D_{xx} ، D_{xy} و D_{yy} عبارت های پراکندگی ناشی از میانگین عمقی، $z = z_b + h$ تراز سطح آب، z_b تراز بستر، ρ چگالی آب و τ_{bx} و τ_{by} تنش های برشی بستر (اصطکاک) می باشند. اصطکاک بستر با استفاده از معادله ضریب زبری مانینگ به صورت رابطه (۴) محاسبه می شود:

$$(\tau_{bx}) = \rho C_f \left(\frac{U}{V} \right) \sqrt{U^2 + V^2}, C_f = \frac{gn^2}{h^{1/3}} \quad (4)$$

در رابطه (۴)، n ضریب زبری مانینگ می باشد. تنش های آشفتگی بر اساس معادله بوسینسک به صورت رابطه (۵) در نظر گرفته می شوند:

$$T_{xx} = 2(v + \nu_t) \frac{\partial U}{\partial x} - \frac{2}{3} k \quad (5)$$

$$T_{xy} = 2(v + \nu_t) \left(\frac{\partial U}{\partial y} + \frac{\partial V}{\partial x} \right) \quad (6)$$

$$T_{yy} = 2(v + \nu_t) \frac{\partial V}{\partial y} - \frac{2}{3} k \quad (7)$$

در معادلات فوق، ν_t ویسکوزیته سینماتیکی آب، ν_t ویسکوزیته گردابی و k انرژی جنبشی آشفتگی می باشد. در نرم افزار فلوئنت مدل های آشفتگی مختلفی برای سازی آشفتگی های جریان وجود دارند. مدل های صفر معادله ای، مدل های یک معادله ای، مدل های دو معادله ای، مدل RSM^۱ و مدل LES^۲. در مدل سازی عددی هر پدیده خاص، انواع مدل های آشفتگی باید ارزیابی و در نهایت بهترین مدل انتخاب شود.

در مدل دو معادله ای $k-\epsilon$ مقیاس طول مشخصه حرکت آشفتگی با استفاده از معادله انتقال محاسبه می شود. مدل $k-\epsilon$ از یک معادله برای k و یک معادله برای ϵ تشکیل شده است که در معادلات (۸) و (۹) آورده شده است.

$$\begin{aligned} \frac{\partial(hk)}{\partial t} + \frac{\partial(hUk)}{\partial x} + \frac{\partial(hVk)}{\partial y} &= \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{h\nu_t}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{h\nu_t}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial y} \right) + P_h + P_{kb} \\ &\quad - h\epsilon \end{aligned} \quad (8)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial(h\epsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(hU\epsilon)}{\partial x} + \frac{\partial(hV\epsilon)}{\partial y} &= \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{h\nu_t}{\sigma_\epsilon} \frac{\partial \epsilon}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{h\nu_t}{\sigma_\epsilon} \frac{\partial \epsilon}{\partial y} \right) + C_{\epsilon 1} \frac{\epsilon}{k} P_h \\ &\quad + P_{\epsilon b} - C_{\epsilon 2} h \frac{\epsilon^2}{k} \end{aligned} \quad (9)$$

در معادلات فوق، ضرایب به صورت معادلات (۱۰-۱۲) در نظر گرفته می شود (Rodi, ۱۹۹۳):

مدل سازی هندسه کانال و آبشکن

برای مدل سازی عددی، ابتدا هندسه مدل در نرم افزار DISIGNMODELER ترسیم و سپس هندسه مدل به نرم افزار ANSYS MESHING فراخوانده شده و شبکه بندی شد. در مدل سازی سه بعدی از شبکه های منشوری در طول و عرض کانال استفاده شده و شبکه های نزدیک آبشکن برای دستیابی به نتایج دقیق تر، ریزتر انتخاب شده است. نتایج پژوهش [کاردان و همکاران \(۱۳۹۲\)](#) نشان داده است در شبیه سازی سه بعدی جریان در کانال، شبکه بندی نوع نامنظم نتایج بهتری حاصل می کند، اما با این وجود در پژوهش زیر نیز دو نوع شبکه بندی منظم و نامنظم بررسی شد. این شبکه بندی ها در شکل (۲) نمایش داده شده است. در حالت شبکه بندی نامنظم (شکل ۲-ب) شبکه بندی به دو شکل متفاوت انجام یافته است. این کار برای بررسی تأثیر استفاده از شبکه های مثلثی با ابعاد کوچک تر در اطراف آبشکن انجام شد.

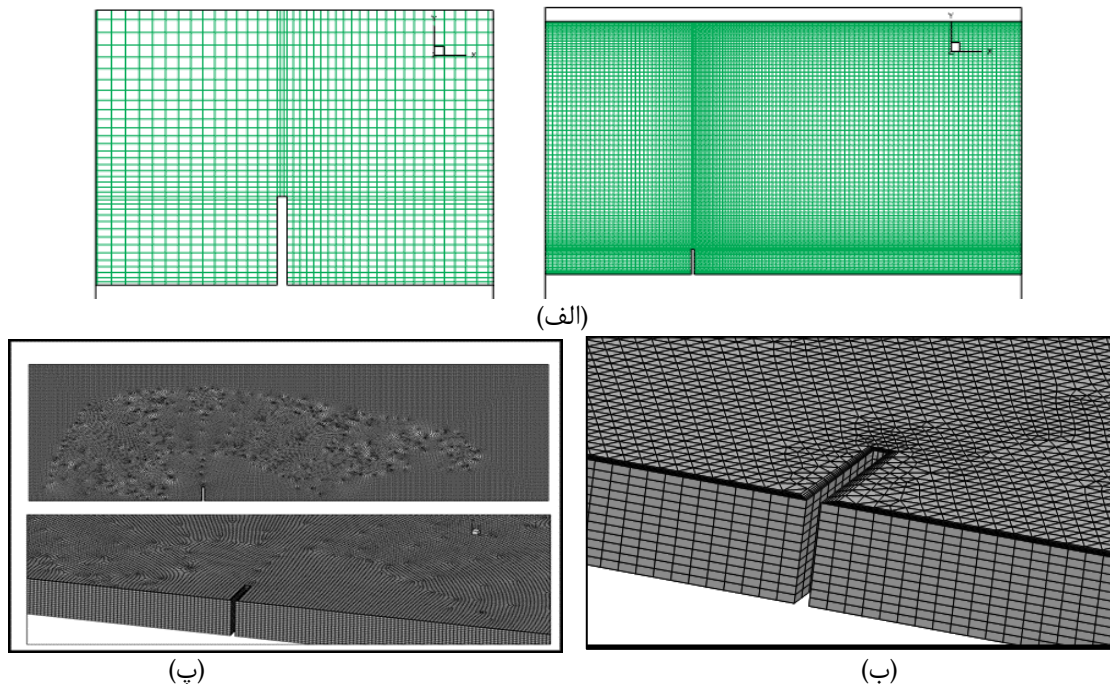
$$P_h = h v_t \left[2 \left(\frac{\partial U}{\partial x} \right)^2 + 2 \left(\frac{\partial V}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial V}{\partial x} + \frac{\partial U}{\partial y} \right)^2 \right] \quad (10)$$

$$P_{kb} = C_f^{-\frac{1}{2}} U_*^3 \quad (11)$$

$$P_{\epsilon b} = C_{\epsilon f} C_{\epsilon 2} C_{\mu}^{1/2} C_f^{-3/4} U_*^4 / h$$

$$C_{\mu} = 0.09, C_{\epsilon 1} = 1.44, C_{\epsilon 2} = 1.92, \sigma_k = 1, \sigma_{\epsilon} = 1.3, C_{\epsilon f} = 1.8 \sim 3.6 \quad (12)$$

ثابت تجربی مدل k-ε برای محاسبه تنش های رینولدز، ضریب تولید انرژی جنبشی تلاطم در معادله ε، C_{ε1} ضریب استهلاک انرژی جنبشی تلاطم در معادله ε، C_{ε2} ضریب پرنتل تلاطمی برای انرژی جنبشی تلاطم k، σ_ε عدد پرنتل تلاطمی برای نرخ اتلاف تلاطم ε، C_{εf} ضریب اصلاح تولید تلاطم ناشی از گروین (بسته به هندسه و شرایط جریان تغییر می کند).



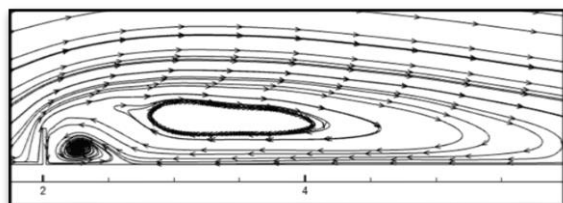
شکل ۲- (الف) شبکه بندی منظم در پلان و در عمق جریان (چهاروجهی منظم)، (ب) شبکه بندی نامنظم در پلان و منظم در عمق جریان (مش های هرمی) و (پ) شبکه بندی نامنظم در پلان و منظم در عمق جریان (مش های شش وجهی).

صورت نامتقارن رخ می دهد: گردابه ابتدا در یک سمت نزدیک آبشکن تشکیل شده، رشد می کند، جدا می شود و در پایین دست مستهلک می شود، این فرآیند به طور متناوب از دو سمت تکرار می شود. در مقابل، شبکه های نامنظم نشان داده شده در شکل (۲-ب و پ) با ایجاد اختلال جزئی در تقارن هندسی، امکان تشکیل و ریزش گردابه های نامتقارن را فراهم می کنند که با مشاهدات آزمایشگاهی همخوانی دارد. این رفتار نامتقارن ناشی از شکست طبیعی تقارن در جریان های با عدد رینولدز بالا است که در شبکه منظم به دلیل حفظ کامل

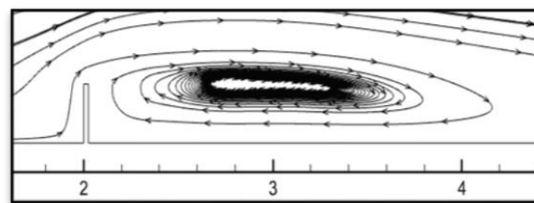
نتایج حاصل از هر سه نوع شبکه بندی در شکل (۲) از نظر پارامترهای کلی جریان مانند پروفیل های سرعت و توزیع کمیت های هیدرولیکی، بسیار نزدیک به یکدیگر و همچنین نزدیک به نتایج مقاله مینا (داده های صحت سنجی) بودند. با این حال تفاوت اساسی در رفتار گردابه ها^۳ در ناحیه ویک^۴ پشت آبشکن مشاهده شد. همان طور که در شکل (۲-الف) مشاهده می شود، در شبکه بندی کاملاً منظم، گردابه ها به صورت کاملاً متقارن تشکیل می شوند. این تقارن با پدیده واقعی جریان در عدد رینولدز بالا سازگار نیست، زیرا در شرایط آزمایشگاهی، ریزش گردابه (vortex shedding) به

بخش‌های بعدی ارائه خواهد شد)، نشان‌دهنده آن است که تغییرات سطح آب در مدل عددی با مشاهدات آزمایشگاهی همخوانی مناسبی دارد.

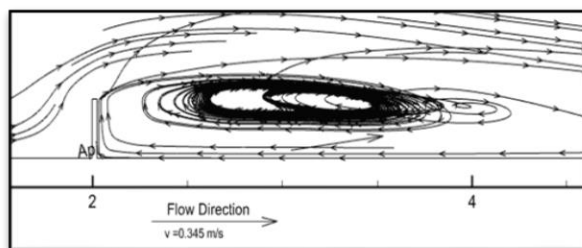
با مقایسه دقیق‌تر شکل (۳-الف، ب و پ) می‌توان دریافت که شبکه‌بندی شش‌وجهی (شکل ۳-الف) خطوط جریان روان‌تر و منظم‌تری تولید کرده است. در مقابل، در شبکه‌بندی هرمی (شکل ۳-ب) و به‌ویژه در شبکه‌بندی چهاروجهی منظم (شکل ۳-پ) خطوط جریان کمی نامنظم‌تر به نظر می‌رسند. این تفاوت بیانگر برتری نسبی شبکه‌بندی شش‌وجهی در بازتولید دقیق‌تر الگوی جریان و کاهش اثرات مصنوعی ناشی از ساختار شبکه است. باتوجه به این مشاهدات، شبکه‌بندی شش‌وجهی برای ادامه شبیه‌سازی‌های عددی انتخاب شد.



(ب)



(الف)



(پ)

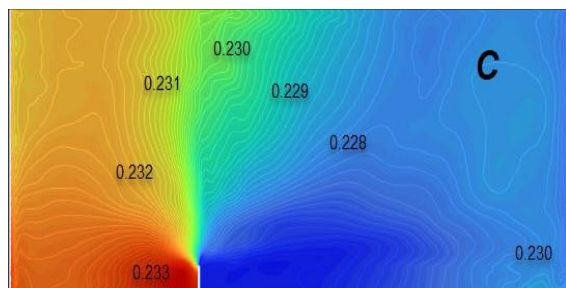
شکل ۳- الف) تشکیل گردابه در شبکه‌بندی به روش شش‌وجهی، ب) به روش هرمی و پ) به روش چهاروجهی منظم.

نشان‌دهنده تطابق مناسب بین مدل عددی و آزمایشگاهی است. در هر دو شکل، ناحیه کاهش سرعت در پشت آب‌شکن (ناحیه ویک) و ناحیه افزایش سرعت در کناره‌ها به‌خوبی قابل تشخیص است و موقعیت و گستردگی این نواحی در مدل عددی با داده‌های آزمایشگاهی [Holtz \(۱۹۹۱\)](#) سازگار می‌باشد. این تطابق تأیید می‌کند که مدل عددی با شبکه‌بندی شش‌وجهی نامنظم قادر است الگوهای پیچیده جریان اطراف آب‌شکن، از جمله تغییرات سطح آب و توزیع سرعت، را با دقت قابل قبولی بازتولید کند. در مدل‌های عددی، تعداد المان‌های شبکه در میدان محاسباتی تأثیر قابل‌توجهی بر دقت نتایج دارد. به همین منظور، سه تعداد مختلف المان برای شبکه‌بندی کانال بررسی شد و درصد خطای نتایج عددی نسبت به نتایج آزمایشگاهی محاسبه گردید. نتایج این بررسی در جدول (۱) ارائه شده است.

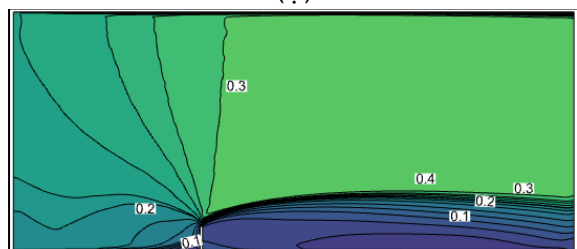
تقارن المان‌ها سرکوب می‌شود. بنابراین، برای شبیه‌سازی دقیق‌تر پدیده‌های واقعی جریان، در مدل عددی نهایی از شبکه‌بندی نامنظم (شکل ۲-ب و پ) استفاده شد.

شکل (۳) نمای دوبعدی خطوط جریان در ناحیه نزدیک آب‌شکن را برای سه نوع شبکه‌بندی مورد بررسی نشان می‌دهد: (الف) شبکه‌بندی با المان‌های شش‌وجهی (نامنظم) در پلان و منظم در عمق، (ب) شبکه‌بندی با المان‌های هرمی (نامنظم در پلان و منظم در عمق) و (پ) شبکه‌بندی کاملاً منظم با المان‌های چهاروجهی. همان‌طور که در شکل (۳) مشاهده می‌شود، در هر سه نوع شبکه‌بندی، خطوط جریان در پایین‌دست آب‌شکن به صورت گردابه‌ای تشکیل شده‌اند و موقعیت مرکز این گردابه‌ها در هر سه حالت تقریباً یکسان است. این مشابهت در موقعیت و شکل‌گیری گردابه‌ها، همراه با نتایج کانتورهای تراز سطح آب (که در

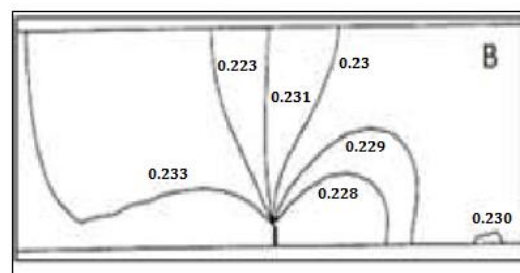
شکل (۴) مقایسه‌ای بین نتایج مدل آزمایشگاهی [Holtz \(۱۹۹۱\)](#) و نتایج مدل عددی حاضر را ارائه می‌دهد: (الف) کانتورهای هم‌تراز سطح آب در مدل آزمایشگاهی هولتز (۱۹۹۱)، (ب) کانتورهای هم‌تراز سطح آب به‌دست‌آمده از مدل عددی با شبکه‌بندی نامنظم شش‌وجهی، (پ) کانتورهای سرعت جریان در تراز $y/h = 0.75$ نسبت به بستر در مدل آزمایشگاهی [Holtz \(۱۹۹۱\)](#) و (ت) کانتورهای سرعت جریان در همین تراز به‌دست‌آمده از مدل عددی. همان‌طور که در شکل ۴ (الف) و (ب) مشاهده می‌شود، الگوی کانتورهای هم‌تراز سطح آب در مدل عددی (شکل ۴-ب) با نتایج آزمایشگاهی (شکل ۴-الف) همخوانی بسیار خوبی دارد. حداکثر ارتفاع آب در ناحیه بالادست آب‌شکن و حداقل ارتفاع در ناحیه نزدیک به آب‌شکن در هر دو مورد تقریباً در موقعیت‌های یکسانی رخ داده و مقادیر آن‌ها نیز نزدیک به یکدیگر است. همچنین، مقایسه کانتورهای سرعت جریان در تراز $y/h = 0.75$ (شکل ۴-پ و ت)



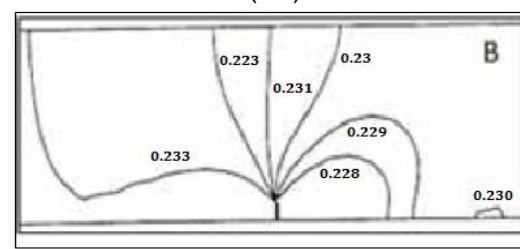
(ب)



(ت)



(الف)



(پ)

شکل ۴- الف) منحنی‌های هم‌تراز سطح آب در مدل آزمایشگاهی Holtz (۱۹۹۱)، (ب) منحنی‌های هم‌تراز سطح آب در مدل عددی با شبکه‌بندی نوع شش‌وجهی، (پ) کانتورهای سرعت جریان در نسبت $y/h = 0.75$ از تراز بستر در مدل آزمایشگاهی Holtz (۱۹۹۱) و (ت) کانتور سرعت جریان در همین تراز به دست آمده از مدل عددی.

جدول ۱- ابعاد کانال و تعداد شبکه‌ها در هر بعد در شبکه‌بندی نامنظم.

ارتفاع (m)	عمق جریان (m)	عرض (m)	طول (m)	کیفیت مش	طول گردابه (m)	سرعت در تراز مشخص (m/s)	اختلاف (%)
۰/۳۳	۰/۲۳	۲/۵	۶	-	---	---	---
۰/۳۳	۰/۲۳	۲/۵	۳۰	--	۲/۵	۰/۳۸	---
۱۵	۱۲	۱۰۲	۲۷۸	۰/۹۲۴	۲/۴۳	۰/۳۶	۲
۱۲	۸	۸۹	۲۲۸	۰/۹۰۳	۲/۴	۰/۳۵	۷
۱۰	۶	۷۵	۲۰۰	۰/۸۸۱	۲/۲	۰/۳۱	۱۸

مورد نیاز دارد، انتخاب شبکه‌بندی بهینه باید تعادلی بین دقت نتایج و زمان شبیه‌سازی برقرار کند. بر اساس مقایسه خطای میانگین نسبی سرعت جریان در تراز $y/h = 0.75$ و کانتورهای هم‌تراز سطح آب (شکل ۴)، و همچنین در نظر گرفتن زمان محاسباتی، شبکه‌بندی ریز به‌عنوان گزینه مناسب انتخاب شد. در این شبکه‌بندی، تعداد کل المان‌ها در حوزه محاسباتی برابر ۲۳۷۰۹۶ است و نتایج حاصل از آن دقت کافی را با زمان محاسباتی معقول ارائه می‌دهند. برای شبیه‌سازی آشفتگی‌های جریان، از سه مدل آشفتگی $k-\epsilon$ standard، $k-\epsilon$ RNG و $k-\omega$ SST استفاده شد. در هر سه مدل آشفتگی نتایج قابل قبول و نزدیک به هم به دست آمد. تنها با این تفاوت که در مدل آشفتگی $k-\omega$ SST کانتورهای سرعت با دقت بیشتری نسبت به مدل آشفتگی $k-\epsilon$ بود (به‌ویژه در نواحی مرزی) اما در ادامه اجرای مدل‌ها با مدل آشفتگی $k-\omega$ SST مشکل عدم همگرایی اتفاق افتاد. نتایج بعدی نشان داد این مدل آشفتگی در

در شبکه‌بندی متوسط، نتایج عددی اختلاف قابل توجهی با داده‌های تجربی Holtz (۱۹۹۱) نشان می‌دهند. به‌طور خاص، مقادیر سرعت جریان در تراز $y/h = 0.75$ نسبت به بستر، بر اساس مقایسه کانتورهای سرعت (شکل ۴-پ و ت) و همچنین محاسبه میانگین خطای نسبی در نقاط منتخب، حدود ۱۸ درصد با نتایج آزمایشگاهی تفاوت دارد. با ریزتر کردن اندازه المان‌های شبکه، این اختلاف به‌طور قابل‌ملاحظه‌ای کاهش می‌یابد؛ به‌طوری‌که در شبکه‌بندی ریز، میانگین خطای نسبی سرعت در همان تراز به حدود ۷ درصد می‌رسد. در شبکه‌بندی خیلی ریز نیز این مقدار به حدود ۲ درصد کاهش می‌یابد. علاوه‌براین کیفیت کلی شبکه (بر اساس معیارهای استاندارد مانند معیار Orthogonal Quality یا Skewness) از مقدار ۰/۸۸۱ در شبکه‌بندی متوسط به ۰/۹۲۴ در شبکه‌بندی خیلی ریز بهبود یافته است. با توجه به اینکه افزایش تعداد المان‌های شبکه تأثیر قابل‌توجهی بر مدت‌زمان محاسبات و منابع

سرعت‌های بالای جریان عملکرد خوبی نداشته و دچار عدم همگرایی می‌شود، ولی در سرعت‌های پایین مشکل خاصی مشاهده نشد. باتوجه‌به اینکه در مرحله صحت‌سنجی سرعت جریان پایین و برابر با 0.345 متر بر ثانیه است از مدل آشفتگی $k-\omega$ SST نتایج بسیار مطلوبی حاصل شد؛ ولی در مدل‌های دیگر با افزایش سرعت جریان به مقدار 0.7 متر بر ثانیه و یا 1.2 متر بر ثانیه این مدل آشفتگی دیگر مناسب نبود. ازاین‌رو مدل آشفتگی $k-\epsilon$ اعمال شد. در مدل آشفتگی $k-\epsilon$ standard در مقایسه با مدل آشفتگی $k-\epsilon$ RNG در سرعت‌های پایین (سرعت جریان 0.345 متر بر ثانیه) تقریباً نتایج مشابهی حاصل شد؛ ولی در سرعت‌های بالا، شبیه‌سازی مدل RNG بهتر بود که در نهایت مدل آشفتگی $k-\epsilon$ RNG انتخاب و به کار برده شد. معیار ارزیابی عملکرد مدل‌های آشفتگی، نزدیک بودن سرعت جریان شبیه‌سازی شده به مقادیر آزمایشگاهی و نیز الگوی جریان و گردابه‌ها در پایین‌دست آب‌شکن بود. برای شرایط مرزی، در دیواره‌ها^۵، شرایط مرزی غیرلغزشی با زبری برابر صفر در دیواره‌ها و زبری بستر^۶ برابر با ۳

میلی‌متر در نظر گرفته شده است (براساس با قطر متوسط رسوبات در مدل آزمایشگاهی). برای ورودی کانال^۷، ورودی فشار^۸ است که برای سیال آب تعریف شده است. تراز آب^۹ در کانال برابر 0.23 متر و سرعت^{۱۰} جریان ورودی به کانال 0.345 متر بر ثانیه وارد شد. خروجی کانال^{۱۱} و سقف کانال^{۱۲}، شرط مرزی از نوع فشار خروجی^{۱۳} تعریف شده است.

تعریف مدل‌ها

هدف پژوهش حاضر، ارزیابی عملکرد آب‌شکن‌های سری در شرایط مختلف و بررسی تأثیر آن‌ها بر پارامترهای کلیدی جریان نظیر سرعت بیشینه و تنش برشی بستر است. بررسی این پارامترها می‌تواند درک ارزشمندی در مورد مکانیسم فرسایش بستر در اطراف آب‌شکن‌ها ارائه دهد، بدون نیاز به انجام شبیه‌سازی‌های پیچیده و زمان‌بر انتقال رسوب. مدل‌های عددی مورد بررسی در این پژوهش در جدول (۲) تعریف شده‌اند.

جدول ۲- مدل‌های عددی مورد بررسی در پژوهش حاضر

پارامتر مورد ارزیابی	فواصل آب‌شکن‌ها	نسب بی‌بعد شده نسبت به طول آب‌شکن	سرعت جریان در ورودی
مقادیر	۱۰۰ سانتی‌متر	۴	0.345 متر بر ثانیه
	۱۳۰ سانتی‌متر	۵	0.7 متر بر ثانیه
	۱۷۰ سانتی‌متر	۷	1.2 متر بر ثانیه

در ادامه پژوهش، با استفاده از مدل عددی صحت‌سنجی شده (با شبکه‌بندی شش‌وجهی نامنظم و تعداد المان‌های بهینه 237096)، شبیه‌سازی‌های لازم برای هر یک از حالت‌های مندرج در جدول (۲) انجام شد تا تأثیر فاصله آب‌شکن‌ها و سرعت ورودی بر الگوهای جریان، توزیع سرعت و تنش برشی بستر بررسی گردد.

نتایج و بحث

آب‌شکن‌های سرگرد با نسبت فاصله L_{AP}/L برابر ۴ از یکدیگر

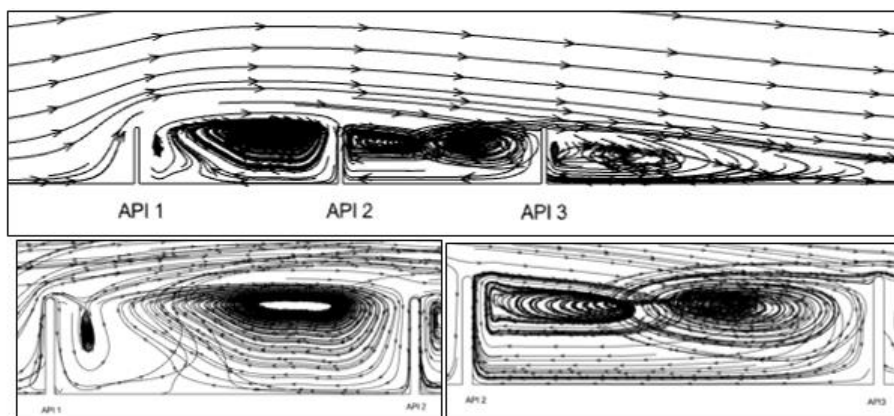
نتایج به‌دست‌آمده از حل مدل عددی برای حالتی که سرعت جریان در ورودی کانال برابر 0.345 متر بر ثانیه است، در شکل (۵) ارائه شده است.

بررسی خطوط جریان در پلان و عمق (شکل ۵) نشان می‌دهد که در فاصله بین آب‌شکن اول و دوم ناحیه (A-B)، گردابه‌ها عمدتاً در نزدیکی بستر کانال و تراز بستر تشکیل می‌شوند و تأثیر آن‌ها به لایه‌های نزدیک بستر محدود است. در فاصله بین آب‌شکن دوم و سوم ناحیه (B-C)، تداخل گردابه‌های جداشده از آب‌شکن دوم با گردابه‌های برگشتی ناشی از آب‌شار سوم رخ می‌دهد که منجر به ایجاد جریان چرخشی پیچیده‌تری در این ناحیه می‌شود. در این

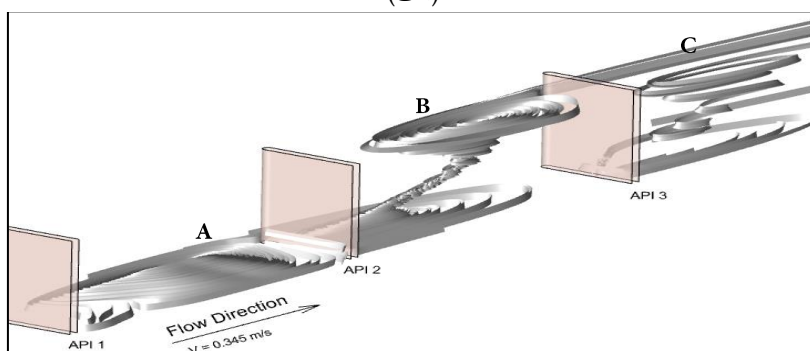
فاصله، گردابه‌ها تا نزدیکی سطح آزاد جریان گسترش یافته‌اند. پس از آب‌شکن سوم پایین‌دست ناحیه (C)، شدت و قدرت گردابه‌ها به‌طور قابل توجهی کاهش می‌یابد و گردابه‌ای با شدت کمتر در پشت آب‌شکن سوم تشکیل می‌شود که با حرکت جریان به پایین‌دست کشیده و مستهلک می‌گردد. در این ناحیه نیز گردابه‌ها تا سطح آزاد جریان امتداد دارند.

با توجه به اینکه در فاصله اول (بین آب‌شکن اول و دوم)، گردابه‌ها عمدتاً به تراز بستر محدود هستند و نزدیک‌ترین تماس را با بستر دارند، می‌توان نتیجه گرفت که پتانسیل فرسایشی و تخریبی این گردابه‌ها در مقایسه با دو فاصله بعدی بیشتر است، زیرا انرژی چرخشی آن‌ها مستقیماً بر بستر کانال متمرکز می‌شود. در ادامه، این نتایج با بررسی توزیع سرعت و تنش برشی بستر در ترازهای مختلف تکمیل خواهد شد.

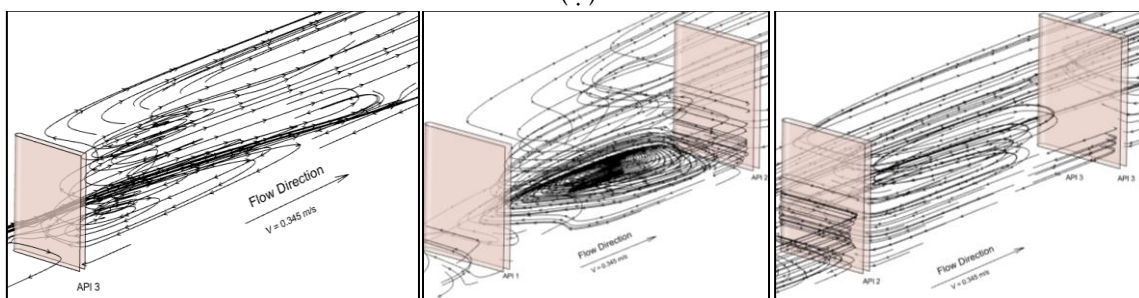
کانتورهای سرعت جریان در تراز $y/h = 0.75$ نسبت به بستر و کانتورهای تنش برشی بستر برای سرعت جریان 0.345 متر بر ثانیه به‌ترتیب در شکل (۶-الف) و (ب) نشان داده شده‌اند.



(الف)



(ب)



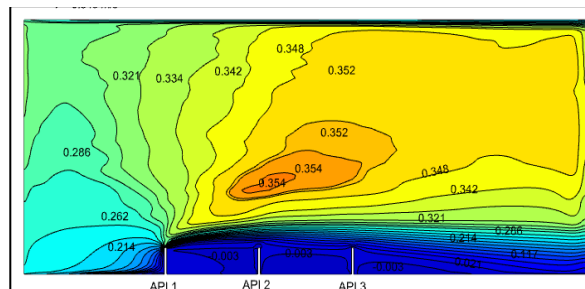
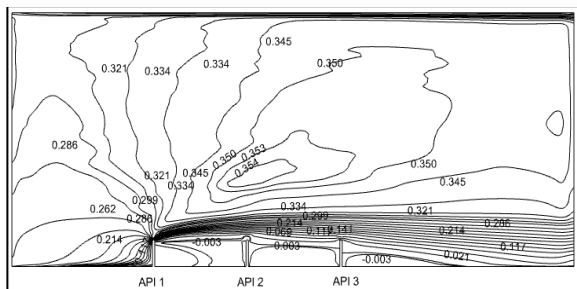
(پ)

شکل ۵- الف) گردابه‌های تشکیل یافته در ناحیه ویک آب‌شکن‌ها، (ب) نمای سه‌بعدی گردابه‌ها در عمق جریان و (پ) خطوط جریان سه‌بعدی در پیرامون آب‌شکن‌ها در نسبت فاصله L_1/L_{AP} برابر ۴ و سرعت جریان ۰/۳۴۵ متر بر ثانیه.

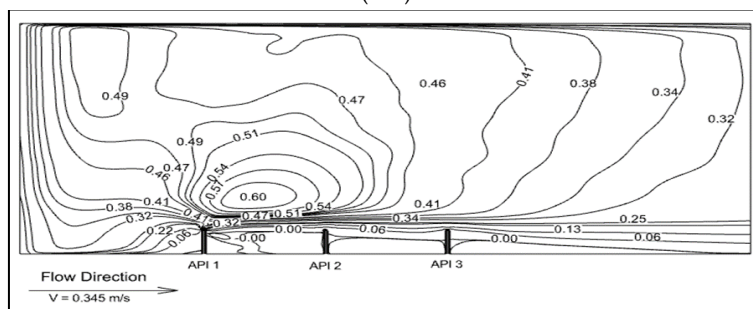
نزدیکی سطح آزاد جریان گسترش می‌یابد. این گسترش عمودی باعث پراکندگی انرژی گردابه‌ها در ستون آب شده و تماس مستقیم آن‌ها با بستر را کاهش می‌دهد. به‌ویژه در این نواحی، کاهش قابل توجه تنش برشی بستر مشاهده می‌شود که انتظار می‌رود فرسایش بستر را به‌طور مؤثری محدود کند.

این نتایج بر اهمیت فاصله‌گذاری مناسب بین آب‌شکن‌های سری تأکید دارد. قرارگیری آب‌شکن‌ها با فواصل مناسب می‌تواند نواحی با تنش برشی بالا را کنترل کرده و توزیع یکنواخت‌تری از تنش‌ها ایجاد کند، که در نهایت به کاهش فرسایش محلی بستر و افزایش پایداری کناره‌های رودخانه کمک می‌نماید. بنابراین، در طراحی سازه‌های هیدرولیکی مانند آب‌شکن‌های سری، توجه به تأثیر فاصله بین آن‌ها بر الگوی گردابه‌ها و توزیع تنش برشی بستر ضروری است.

همان‌طور که در شکل (۶) مشاهده می‌شود، حداکثر تنش برشی بستر در ناحیه بین آب‌شکن اول و دوم ناحیه (A) رخ می‌دهد و مقدار آن حدود $0/6$ نیوتن بر مترمربع است. در همین ناحیه، سرعت جریان نیز به بیشینه مقدار خود یعنی حدود $0/345$ متر بر ثانیه می‌رسد. در ناحیه بین آب‌شکن دوم و سوم ناحیه (B)، مقدار حداکثر تنش برشی بستر به حدود $0/34$ نیوتن بر مترمربع کاهش می‌یابد. این کاهش در ناحیه پایین‌دست آب‌شکن سوم ناحیه (C) ادامه یافته و مقدار تنش برشی به حدود $0/13$ نیوتن بر مترمربع می‌رسد. این تغییرات تنش برشی مستقیماً با الگوی گردابه‌ها (که در شکل (۵) نشان داده شده) مرتبط است. در ناحیه A، گردابه‌ها عمدتاً به تراز بستر محدود هستند و انرژی چرخشی آن‌ها مستقیماً بر بستر اعمال می‌شود، که منجر به تنش برشی بالاتر و در نتیجه پتانسیل فرسایشی بیشتر می‌گردد. در مقابل، در نواحی B و C، گردابه‌ها تا

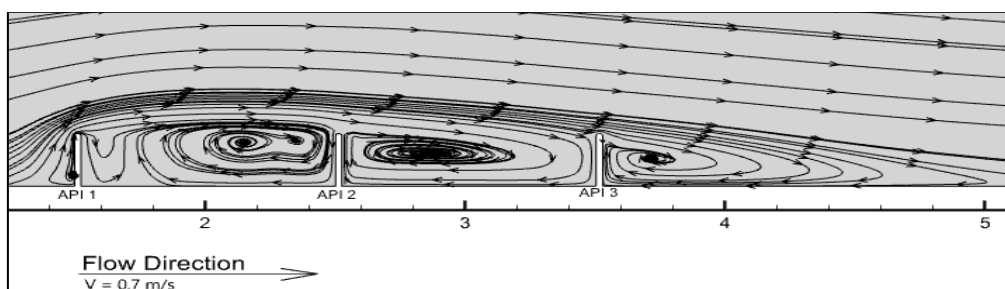


(الف)

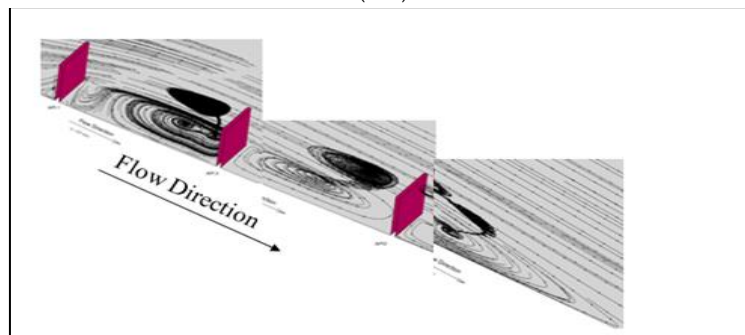


(ب)

شکل ۶- الف) کانتورهای سرعت جریان در تراز y/h برابر 0.75 و ب) کانتورهای تنش برشی بستر در سرعت جریان 0.345 m/s .



(الف)



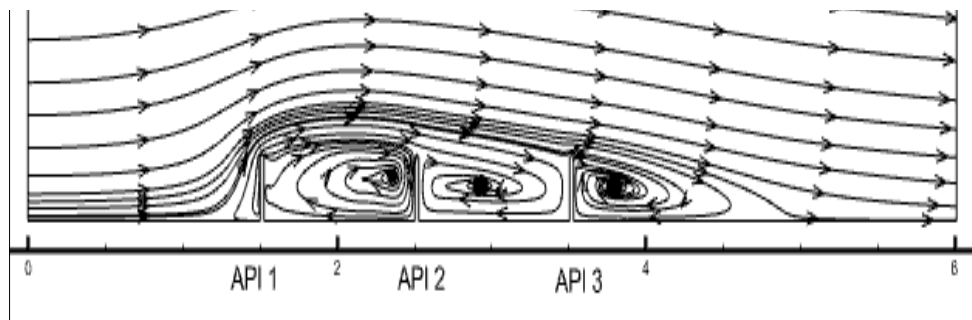
(ب)

شکل ۷- الف) نمای دوبعدی بردارهای سرعت در اطراف آبشکن‌ها و ب) نمای سه‌بعدی گردابه‌ها در ناحیه ویک آبشکن‌ها در سرعت 0.7 متر بر ثانیه.

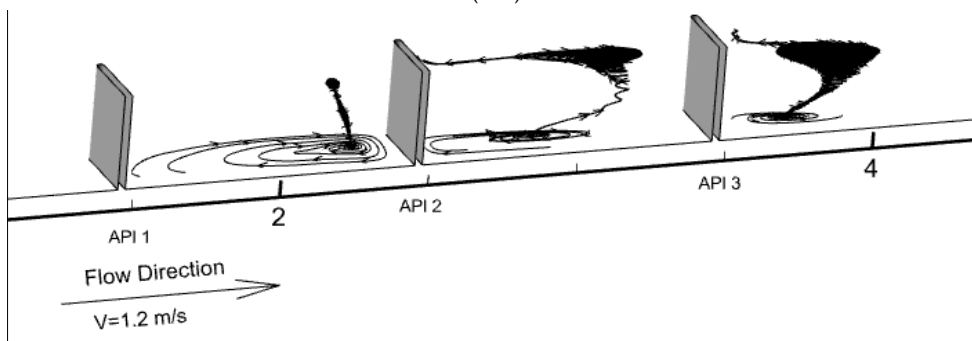
آبشکن‌ها می‌گردد که در نمای سه‌بعدی شکل (۷-ب) به خوبی قابل تشخیص است. بررسی کانتورهای سرعت و تنش برشی در شکل (۸) نشان می‌دهد که بیشینه تنش برشی بستر در ناحیه بین آبشکن اول و دوم ناحیه (A) به حدود $2/6$ نیوتن بر مترمربع می‌رسد. این مقدار تقریباً چهار برابر بیشینه تنش برشی در همان ناحیه برای سرعت جریان 0.345 m/s متر بر ثانیه (0.6 نیوتن بر مترمربع) است. در نواحی B و C نیز تنش برشی به ترتیب به حدود 0.4 و 0.2 نیوتن بر مترمربع افزایش یافته است.

نتایج حاصل از حل مدل با سرعت 0.7 متر بر ثانیه

نتایج حاصل از حل مدل عددی برای حالتی که سرعت جریان در ورودی کانال برابر 0.7 متر بر ثانیه است، در شکل‌های (۷) و (۸) ارائه شده است. همان‌طور که در شکل (۷-الف) مشاهده می‌شود، با افزایش سرعت جریان به 0.7 متر بر ثانیه، بردارهای سرعت در اطراف آبشکن‌ها شدت بیشتری یافته و جریان با شتاب بالاتری از کنار و بالای آبشکن‌ها عبور می‌کند. این امر منجر به کاهش نسبی ابعاد و شدت گردابه‌ها در نواحی بین

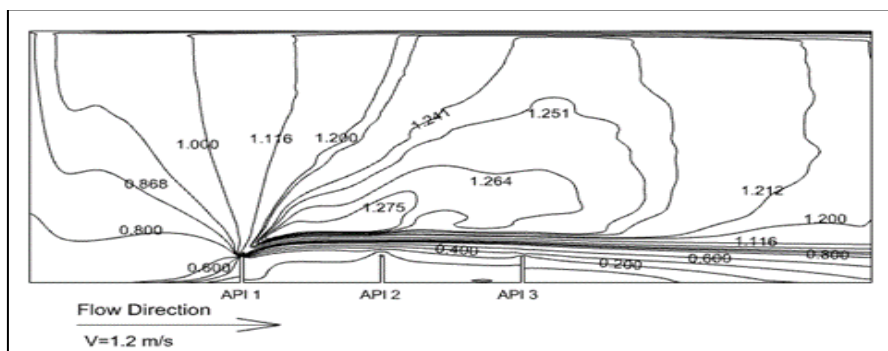


(الف)

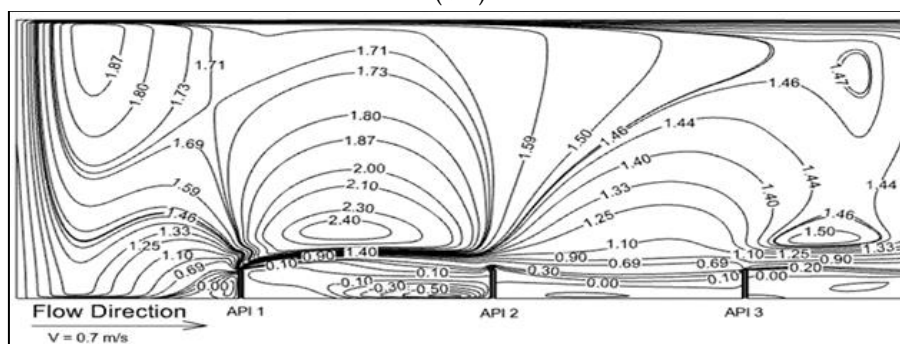


(ب)

شکل ۹- الف) نمای دوبعدی از خطوط جریان در تراز بستر و (ب) نمای سه بعدی از خطوط جریان در اطراف آب شکن‌ها در سرعت $1/2$ متر بر ثانیه.



(الف)



(ب)

شکل ۱۰- الف) کانتورهای سرعت جریان، (ب) کانتورهای تنش برشی بستر در سرعت جریان $1/2$ متر بر ثانیه.

جدول ۳- جمع بندی نتایج عددی به دست آمده برای فواصل مختلف آب شکن

نسبت فاصله آب شکن ها (L_i/L_{AP})	سرعت ورودی (متر بر ثانیه)	ناحیه (شکل (۵	مقدار تنش برشی (نیوتن بر مترمربع)
۴	۰/۳۴۵	فاصله A	۰/۶
		فاصله B	۰/۳۴
		فاصله C	۰/۱۳
	۰/۷	فاصله A	۲/۴
		فاصله B	۰/۴
		فاصله C	۰/۲
۵	۱/۲	فاصله A	۷
		فاصله B	۲/۵
		فاصله C	۱/۲
	۰/۳۴۵	فاصله A	۰/۵۶
		فاصله B	۰/۲۶
		فاصله C	۰/۰۲
۷	۰/۷	فاصله A	۲/۶
		فاصله B	۰/۴
		فاصله C	۰/۰۳
	۱/۲	فاصله A	۷/۵
		فاصله B	۱
		فاصله C	۰/۵
	۰/۳۴۵	فاصله A	۰/۶
		فاصله B	۰/۰
		فاصله C	۰/۰
	۰/۷	فاصله A	۲/۴
		فاصله B	۰/۱
		فاصله C	۰/۰
	۱/۲	فاصله A	۳/۴
		فاصله B	۰/۰۳
		فاصله C	۰/۰

قابل ملاحظه ای کاهش یافته که نشان دهنده اثر مثبت افزایش فاصله در کاهش پتانسیل فرسایشی نواحی پایین دست است.

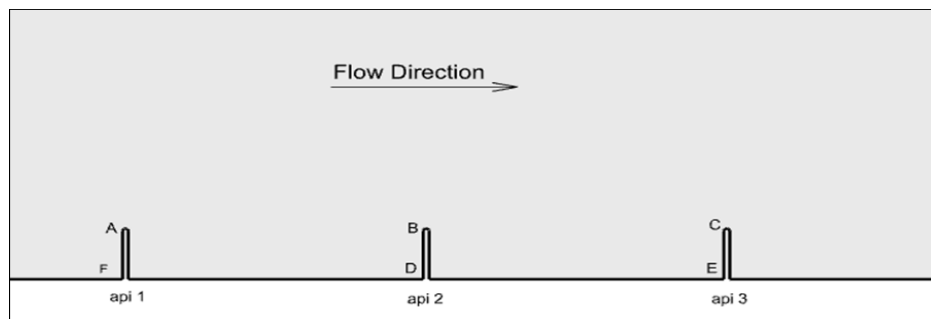
در نسبت فاصله $L_i/L_{AP} = ۷$ ، بررسی الگوهای گردابه (که در شکل های مربوطه قابل مشاهده است) نشان می دهد حتی در ناحیه A نیز گردابه ها همانند نواحی B و C از بستر فاصله گرفته و تا نزدیکی سطح آزاد جریان گسترش یافته اند. این امر باعث کاهش شدت تماس گردابه ها با بستر و در نتیجه کاهش کلی تنش برشی در تمام نواحی می شود. شدت گردابه ها پس از آب شکن سوم به طور چشمگیری کاهش یافته و از آب شکن فاصله می گیرند. همچنین، افزایش فاصله باعث می شود جریان با انحنای بیشتری از دماغه آب شکن اول عبور کند و تمرکز گردابه ها عمدتاً به پشت آب شکن دوم منتقل شود. در نتیجه، محل تمرکز بیشینه تنش برشی نیز از ناحیه بین آب شکن اول و

بر اساس نتایج جدول (۳)، در نسبت فاصله آب شکن ها (L_i/L_{AP}) برابر ۵ و سرعت جریان ۰/۳۴۵ متر بر ثانیه، بیشینه تنش برشی بستر در ناحیه A به ۰/۵۶ نیوتن بر مترمربع می رسد که نسبت به حالت $L_i/L_{AP} = ۴$ (۰/۶ نیوتن بر مترمربع) حدود ۷ درصد کاهش نشان می دهد. در نواحی B و C نیز این مقدار به ترتیب به ۰/۲۶ و ۰/۰۲ نیوتن بر مترمربع کاهش یافته است. در سرعت جریان ۰/۷ متر بر ثانیه و همان نسبت فاصله ۵، بیشینه تنش برشی در ناحیه A برابر ۲/۶ نیوتن بر مترمربع است که نسبت به سرعت پایین تر (۰/۳۴۵ متر بر ثانیه) افزایش قابل توجهی دارد، اما در مقایسه با نسبت فاصله ۴ تغییر چندانی نکرده است. در سرعت ۱/۲ متر بر ثانیه، بیشینه تنش برشی در ناحیه A برای نسبت ۵ به ۷/۵ نیوتن بر مترمربع می رسد که نسبت به سرعت ۰/۳۴۵ متر بر ثانیه حدود ۱۳ برابر افزایش یافته است. در این نسبت فاصله، تنش برشی در نواحی B و C نسبت به نسبت فاصله ۴ به طور

دوم به دماغه آب‌شکن اول (نقطه جدایش جریان) جابه‌جا می‌شود.

در سرعت جریان 0.345 متر بر ثانیه و نسبت فاصله 7 ، بیشینه تنش برشی بستر در دماغه آب‌شکن اول به 0.6 نیوتن بر مترمربع می‌رسد که تفاوت قابل توجهی با نسبت‌های 4 و 5 ندارد. اما در سرعت $1/2$ متر بر ثانیه، بیشینه تنش برشی با افزایش فاصله به این مقدار (از حدود 7 نیوتن بر مترمربع در نسبت 4 به $3/4$ نیوتن بر مترمربع) حدود 50 درصد کاهش می‌یابد. به‌طورکلی افزایش فاصله آب‌شکن‌ها از 4 به 5 (حدود 25 درصد افزایش فاصله واقعی) تأثیر محدودی بر بیشینه تنش برشی دارد، اما افزایش به نسبت 7 (حدود 75 درصد افزایش فاصله واقعی) منجر به کاهش حدود 50 درصدی بیشینه تنش برشی در سرعت‌های بالا می‌شود.

افزایش فاصله بین آب‌شکن‌ها (L_i/L_{AP}) به‌طور کلی باعث کاهش تنش برشی بستر در نواحی مختلف می‌گردد، زیرا تداخل گردابه‌های مجاور کاهش یافته و انرژی چرخشی در حجم بیشتری از ستون آب پراکنده می‌شود. در مقابل، افزایش سرعت جریان به دلیل رشد انرژی جنبشی و فشار هیدرودینامیکی، تنش برشی را به‌طور قابل توجهی افزایش می‌دهد. این نتایج بر اهمیت بهینه‌سازی فاصله آب‌شکن‌های سری در طراحی تأکید دارد تا ضمن کنترل فرسایش بستر، پایداری سازه‌ای نیز حفظ شود. برای تحلیل دقیق‌تر سرعت جریان و تنش برشی در نقاط کلیدی پیرامون آب‌شکن‌ها، مقادیر این پارامترها در نقاط تعریف‌شده در شکل (۱۱) ارائه شده است.



شکل ۱۱- نقاط تعریفی برای ارزیابی سرعت و تنش برشی E, D, F, C, B, A

این نقاط شامل نواحی نزدیک دماغه آب‌شکن‌ها، مراکز گردابه‌ها، نقاط جدایش جریان و نواحی بازیابی جریان در پایین‌دست می‌باشند.

جدول (۴) مقادیر سرعت جریان در تراز $y/h = 0.75$ نسبت به بستر را در نقاط کلیدی تعریف شده در شکل (۱۱) (پیرامون آب‌شکن‌ها) برای ترکیب‌های مختلف نسبت فاصله آب‌شکن‌ها (L_i/L_{AP}) و سرعت ورودی جریان ارائه می‌دهد.

جدول ۴- مقایسه سرعت در تراز y/h برابر 0.75 از تراز بستر در نقاط مشخص شده پیرامون آب‌شکن‌ها.

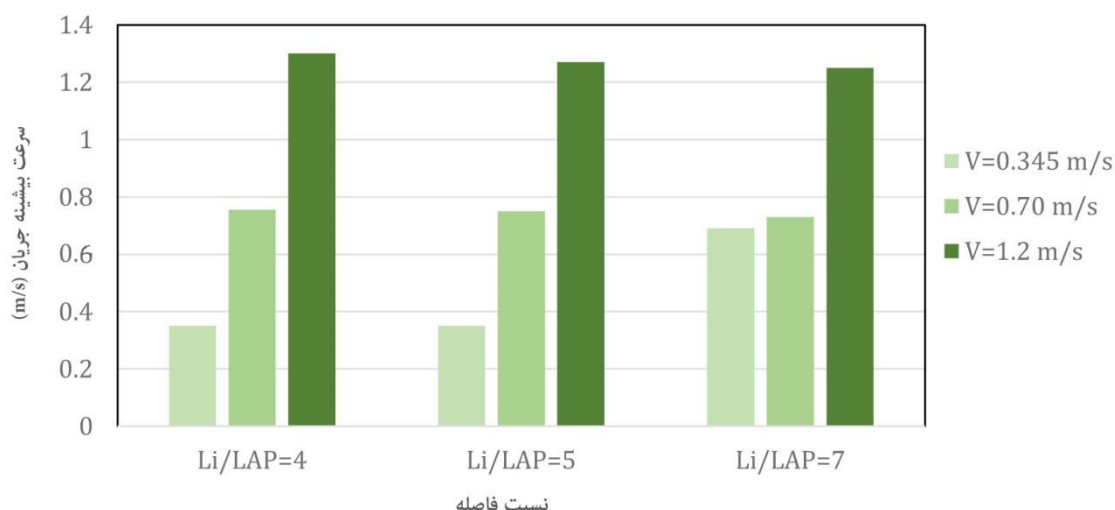
سرعت در مختصات زیر						نسبت فاصله آب‌شکن	سرعت جریان
F	E	D	C	B	A		
0.000	0.000	0.000	0.020	-0.030	0.350	۴	0.345 m/s
0.000	0.000	0.000	0.030	-0.001	0.280	۵	
-0.010	-0.010	-0.010	0.130	-0.010	0.390	۷	
-0.002	-0.005	-0.005	-0.020	-0.170	0.79	۴	0.70 m/s
0.000	0.000	-0.010	0.180	-0.080	0.660	۵	
-0.002	0.000	0.000	0.340	-0.170	0.850	۷	
-0.004	-0.010	-0.005	-0.262	-0.330	1.45	۴	1.20 m/s
0.000	0.000	0.010	0.420	-0.100	1.17	۵	
-0.020	0.000	0.000	0.660	-0.260	1.520	۷	

سرعت به حدود $1/0$ متر بر ثانیه کاهش می‌یابد، در حالی که در نقطه C (ناحیه بازیابی جریان در پایین‌دست) سرعت به حدود 0.39 متر بر ثانیه می‌رسد. این تفاوت‌ها بیانگر تأثیر شدید هندسه آب‌شکن‌ها بر الگوی جریان است. در

بر اساس نتایج جدول (۴) در سرعت جریان ورودی 0.345 متر بر ثانیه، مقادیر سرعت در نقاط کلیدی پیرامون آب‌شکن‌ها تفاوت قابل توجهی نشان می‌دهند. برای مثال، در نقطه A (معمولاً نزدیک دماغه یا ناحیه انقباض جریان)

به حدود 0.34 متر بر ثانیه می‌رسد. این تغییرات گسترده‌تر، تأثیر مستقیم افزایش سرعت ورودی بر شدت انقباض جریان در نواحی جانبی آب‌شکن‌ها و گسترش نواحی کم‌سرعت در پشت آن‌ها را تأیید می‌کند. نقاط B و D همچنان کمترین مقادیر سرعت را دارند که نشان‌دهنده حفظ نقش آب‌شکن‌ها در ایجاد نواحی آرام و کاهش محلی تنش برشی بستر، حتی در سرعت‌های بالاتر، است.

نقاط B و D (واقع در مراکز نواحی ویک و گردابه‌ها) سرعت‌ها به مقادیر بسیار پایین (نزدیک به صفر یا حتی منفی در نواحی برگشتی) می‌رسند که نشان‌دهنده وجود جریان‌های آرام و چرخشی قوی در پشت آب‌شکن‌ها است. در سرعت جریان ورودی 0.7 متر بر ثانیه، دامنه تغییرات سرعت در نقاط مختلف به‌طور چشمگیری افزایش می‌یابد. سرعت در نقطه A به حدود 0.79 متر بر ثانیه و در نقطه C



شکل ۱۱- نمودار ستونی تغییرات سرعت پیشینه جریان بر حسب نسبت فاصله آب‌شکن‌ها

سرعت در نقاط مختلف، تغییرات دینامیکی شدیدتری را با رشد سرعت ورودی نشان می‌دهد که منجر به تقویت گردابه‌ها و نواحی انقباض جریان می‌شود (جدول ۵).

در سرعت جریان ورودی $1/2$ متر بر ثانیه، روند کلی مشابه باقی می‌ماند، اما شدت تغییرات بیشتر می‌شود. برای مثال، سرعت در نقطه A به حدود $1/45$ متر بر ثانیه و در نقطه C به حدود 0.66 متر بر ثانیه می‌رسد. این افزایش کلی

جدول ۵- مقایسه سرعت برگشتی گردابه‌ها تحت مقادیر مختلف سرعت جریان ورودی.

سرعت منفی حداکثر بین آب‌شکن‌ها (متر بر ثانیه)		نسبت فاصله آب‌شکن‌ها	سرعت جریان
Api2 - Api3	Api1 - Api2		
-0.20	-0.10	4	0.345 m/s
-0.20	0	5	
-0.35	-0.115	7	
-0.94	-0.62	4	0.70 m/s
-0.70	-0.100	5	
-0.70	-0.270	7	
-0.200	-0.190	4	1.20 m/s
-0.130	-0.240	5	
-0.400	-0.400	7	

قوی و تشکیل گردابه‌های پایدار در این نواحی است که می‌تواند به فرسایش محلی بستر و تغییر الگوی جریان کمک کند. در سرعت جریان ورودی 0.7 متر بر ثانیه، پیشینه سرعت منفی در گردابه‌ها به‌طور قابل‌توجهی افزایش می‌یابد. برای مثال، در نسبت فاصله ۷، این مقدار در ناحیه A به 0.27 - متر بر ثانیه و در ناحیه B به 0.7 - متر بر ثانیه می‌رسد. این افزایش نشان‌دهنده تقویت شدت

بر اساس نتایج جدول (۵) در سرعت جریان ورودی 0.345 متر بر ثانیه، پیشینه سرعت منفی (جریان برگشتی) در نواحی بین آب‌شکن‌ها نسبتاً پایین است. به‌ویژه در نسبت فاصله آب‌شکن‌ها (L_i/L_{AP}) برابر ۷، این مقدار در ناحیه A (بین آب‌شکن اول و دوم) به 0.115 - متر بر ثانیه و در ناحیه B (بین آب‌شکن دوم و سوم) به 0.35 - متر بر ثانیه می‌رسد. مقادیر منفی سرعت بیانگر وجود جریان برگشتی

گردابه‌ها و گسترش جریان‌های برگشتی با رشد سرعت ورودی است. در نهایت، در سرعت جریان ورودی ۱/۲ متر بر ثانیه، بیشینه سرعت منفی به حداکثر مقدار خود می‌رسد. در نسبت فاصله ۷، سرعت منفی در هر دو ناحیه A و B به حدود ۰/۴ - متر بر ثانیه ثبت شده است. این نتایج تأیید می‌کنند که با افزایش سرعت جریان ورودی، شدت گردابه‌ها و جریان‌های برگشتی در نواحی بین آب‌شکن‌ها به‌طور

چشمگیری افزایش می‌یابد، که منجر به پیچیدگی بیشتر الگوی جریان و تشدید پتانسیل فرسایشی در بستر می‌شود. به‌طور کلی جدول (۶) تأثیر مستقیم سرعت جریان ورودی را بر تشکیل و شدت گردابه‌ها در نواحی بین آب‌شکن‌ها نشان می‌دهد. این گردابه‌ها نه تنها تنش برشی بستر را تحت تأثیر قرار می‌دهند، بلکه به شکل‌گیری الگوهای جریان پیچیده‌تر و پایدارتر منجر می‌شوند که در طراحی آب‌شکن‌های سری باید مد نظر قرار گیرد.

جدول ۶- مقایسه سرعت بیشینه، تنش برشی بیشینه و محل تنش برشی و طول گردابه آخر با سرعت جریان ورودی ۰/۳۴۵ متر بر ثانیه

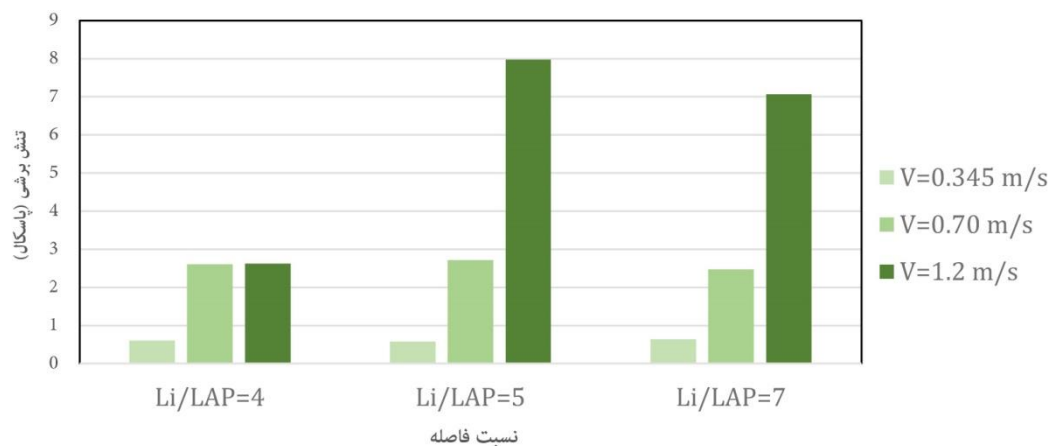
سرعت جریان	نسبت فاصله آب‌شکن	سرعت بیشینه (m/s)	تنش برشی بیشینه (Pa)	محل تنش برشی بیشینه (x,y)	طول گردابه آخر (m)
m/s ۰/۳۴۵	۴	۰/۳۵۰	۰/۶۰۰	(۰/۶۱ و ۱/۲۵)	۲/۲۴۰
	۵	۰/۳۵۰	۰/۵۸۰	(۲/۰۳ و ۱/۷۷)	۱/۶۰۰
	۷	۰/۳۶۹	۰/۶۳۳	(۰/۵۳ و ۲/۱۰)	۱/۰۰
۰/۷۰ m/s	۴	۰/۷۵۵	۲/۶۰۰	(۲ و ۰/۵۸)	۱/۱۵۷
	۵	۰/۷۵۰	۲/۷۱۰	(۱/۹۸ و ۰/۵۷)	۰/۹۲۰
	۷	۰/۷۳۰	۲/۴۷۰	(۲/۱۷ و ۰/۱۶)	>۱
۱/۲۰ m/s	۴	۱/۳۰۰	۲/۶۲۰	(۱/۹۶ و ۰/۵۰۰)	۱/۱۲۰
	۵	۱/۲۷۰	۷/۹۷۰	(۱/۹۶ و ۰/۴۸۰)	۱/۳۰۰
	۷	۱/۲۵۰	۷/۰۶۰	(۲/۱۱ و ۰/۵۹۰)	>۱

جدول (۶) جمع‌بندی جامعی از پارامترهای کلیدی جریان ارائه می‌دهد. بررسی این نتایج نشان می‌دهد که با افزایش سرعت ورودی، بیشینه سرعت جریان و تنش برشی بستر به‌طور قابل‌توجهی رشد می‌کند، در حالی که افزایش نسبت فاصله آب‌شکن‌ها (L_i/L_{AP}) منجر به کاهش طول گردابه‌ها و جابه‌جایی موقعیت بیشینه تنش برشی به سمت بالادست (دماغه آب‌شکن اول) می‌شود.

بر اساس نتایج جدول (۶) در سرعت جریان ورودی ۰/۳۴۵ متر بر ثانیه، بیشینه سرعت جریان در تمامی نسبت‌های فاصله آب‌شکن‌ها برابر ۴، ۵ و ۷ تقریباً ثابت و برابر با حدود ۰/۳۵ متر بر ثانیه است. تنها در نسبت فاصله ۷، این مقدار به‌طور جزئی به ۰/۳۶۹ متر بر ثانیه افزایش می‌یابد. این افزایش ناچیز نشان‌دهنده تأثیر محدود آرایش آب‌شکن‌ها بر بیشینه سرعت محلی در سرعت‌های پایین ورودی است، زیرا جریان فرصت کافی برای بازیابی و توزیع یکنواخت‌تر در فواصل بزرگ‌تر دارد. در مقابل، بیشینه تنش برشی بستر در سرعت ورودی ۰/۳۴۵ متر بر ثانیه تفاوت‌های بیشتری نشان می‌دهد. بالاترین مقدار (۰/۶۳۳) نیوتن بر مترمربع یا ۶۳۳ پاسکال) در نسبت فاصله ۷ مشاهده می‌شود، درحالی‌که در نسبت‌های ۵ و ۴ به‌ترتیب حدود ۰/۵۸ و ۰/۶۰ نیوتن بر مترمربع (۵۸۰ و ۶۰۰ پاسکال)

است (شکل ۱۲). این نتایج بیانگر آن است که افزایش فاصله آب‌شکن‌ها در سرعت‌های پایین، تمرکز تنش برشی را در نقاط خاص (مانند دماغه آب‌شکن اول) افزایش می‌دهد، زیرا تداخل گردابه‌های مجاور کاهش یافته و انرژی محلی در نواحی جدایش جریان متمرکزتر می‌شود.

همان‌طور که در شکل (۱۲) مشاهده می‌شود، در سرعت‌های بالاتر ورودی (۰/۷ و ۱/۲ متر بر ثانیه)، روند تغییرات بیشینه تنش برشی با افزایش نسبت فاصله معکوس می‌شود و کاهش قابل‌توجهی نشان می‌دهد، که این امر بر برتری نسبت‌های فاصله بالاتر در کاهش پتانسیل فرسایشی در رژیم‌های پرسرعت تأکید دارد. موقعیت مکانی بیشینه تنش برشی نیز با تغییر نسبت فاصله جابه‌جا می‌شود. برای مثال، در نسبت فاصله ۴، این نقطه در مختصات تقریبی $x = ۱/۲۵$ متر، $y = ۰/۶۱$ متر قرار دارد که معمولاً در ناحیه بین آب‌شکن اول و دوم است. در نسبت فاصله ۵، به مختصات $x = ۱/۷۷$ متر، $y = ۲/۰۳$ متر و در نسبت فاصله ۷ به $x = ۲/۱۰$ متر، $y = ۰/۵۳$ متر منتقل می‌شود. این جابه‌جایی به سمت بالادست (دماغه آب‌شکن اول) با افزایش فاصله، تأییدی بر کاهش تداخل گردابه‌ها و تمرکز تنش در نقاط جدایش جریان اولیه است.



شکل ۱۲- نمودار ستونی تغییرات تنش برشی بر حسب نسبت فاصله آب‌شکن‌ها.

بهینه بین آب‌شکن‌ها در طراحی و استقرار آن‌ها است. نتایج همچنین نشان می‌دهد با افزایش سرعت جریان، تنش‌های برشی بستر به‌طور قابل ملاحظه‌ای افزایش می‌یابند. به‌ویژه، در شرایط با سرعت‌های بالاتر، گردابه‌ها به سطح آزاد آب نزدیک‌تر شده و قدرت تخریبی جریان افزایش می‌یابد. این پدیده می‌تواند به فرسایش شدیدتر بستر در نواحی نزدیک به آب‌شکن‌ها منجر شود. به‌طور خاص، در بررسی‌های انجام شده، مشخص شد که بیشینه تنش برشی در ناحیه اول بین آب‌شکن‌ها به‌طور قابل توجهی بیشتر از نواحی دیگر است که این امر به‌وضوح نشان دهنده تأثیر هندسه و طراحی آب‌شکن‌ها بر الگوی جریان و فرسایش بستر می‌باشد. در نهایت، این پژوهش تأکید می‌کند در طراحی و استقرار آب‌شکن‌ها، توجه به عوامل مختلف از جمله فاصله بین آب‌شکن‌ها و سرعت جریان می‌تواند به کاهش فرسایش و بهبود عملکرد سازه‌های آب‌شکن کمک کند.

منابع

اسمعیلی، پدram، بوداقپور، سیامک، رستمی، محمد، و میرزایی، مهدی. (۱۳۹۹). مطالعه آزمایشگاهی مؤلفه‌های طولی سرعت پیرامون آب‌شکن‌های سری ساده. نشریه علمی پژوهشی مهندسی آبیاری و آب ایران، ۱۱(۴۲)، ۶۰-۷۴.

doi: 10.22125/iwe.2020.120721

اعزی، سودابه، خانجانی، محمد جواد، و کرمانی، محمد. (۱۳۹۷). شبیه‌سازی دوبعدی الگوی جریان و تغییرات بستر در آبراهه‌های مستقیم و پیچانرودی تحت تأثیر سازه آب‌شکن. نشریه علمی آبیاری و زهکشی ایران، ۱۲(۴)، ۹۷۰-۹۸۱.

تیموری یگانه، مریم. (۱۴۰۱). شبیه‌سازی دوبعدی الگوی جریان در اطراف آب‌شکن با استفاده از مدل عددی-SRH-2D. نشریه آب و توسعه پایدار، ۹(۱)، ۱۲۷-۱۳۴.

<https://doi.org/10.22067/jwsd.v9i1.2110.1092>

طول گردابه‌ها در سرعت جریان ۰/۳۴۵ متر بر ثانیه نیز با افزایش نسبت فاصله به‌طور قابل توجهی کاهش می‌یابد: از حدود ۲/۴ متر در نسبت ۴، به ۱/۶۰ متر در نسبت ۵ و ۱ متر در نسبت ۷. این کاهش مستقیماً ناشی از کاهش اثرات متقابل بین آب‌شکن‌های سری است. با افزایش فاصله، هر آب‌شکن تأثیر هیدرولیکی مستقل‌تری بر جریان اعمال می‌کند و فرصت بیشتری برای بازیابی جریان یکنواخت در نواحی بین آن‌ها فراهم می‌شود. در نتیجه، شدت تغییرات سرعت و فشار کاهش یافته، تشکیل گردابه‌های بزرگ محدودتر شده و انرژی چرخشی سریع‌تر مستهلک می‌گردد. این پدیده نه‌تنها طول گردابه‌ها را کوتاه‌تر می‌کند، بلکه تنش برشی بستر را در نواحی پایین‌دست کاهش می‌دهد و توزیع یکنواخت‌تری از تنش‌ها ایجاد می‌نماید. بنابراین، افزایش فاصله آب‌شکن‌ها (به‌ویژه تا نسبت $L_i/L_{AP} = 7$) می‌تواند به‌عنوان استراتژی مؤثری برای کنترل فرسایش محلی بستر و بهبود پایداری کلی سیستم حفاظتی در سرعت‌های پایین تا متوسط جریان مورد توجه قرار گیرد.

نتیجه‌گیری کلی

در این پژوهش، به بررسی عددی سه‌بعدی میدان جریان پیرامون آب‌شکن‌ها در حالت قرارگیری گروهی پرداخته شد. نتایج این پژوهش نشان داد اهمیت و تأثیرات قابل توجه آب‌شکن‌ها بر الگوی جریان و فرسایش بستر در سرعت‌های مختلف جریان متفاوت است. تحلیل‌های انجام شده نشان داد با افزایش فاصله بین آب‌شکن‌ها، طول گردابه‌ها کاهش می‌یابد. این کاهش طول گردابه‌ها به دلیل توزیع یکنواخت‌تر جریان در نواحی بین آب‌شکن‌ها است که می‌تواند به کاهش نوسانات سرعت و تنش‌های برشی در بستر رودخانه منجر شود. در واقع، فاصله بیشتر بین آب‌شکن‌ها به کاهش اثرات متقابل بین آن‌ها کمک کرده و موجب می‌شود که جریان به حالت طبیعی‌تر نزدیک شود. این یافته‌ها نشان دهنده اهمیت در نظر گرفتن فاصله

changes by using Nays2D. Journal of Korea Water Resources Association, 49(3), 241-252.
<https://doi.org/10.3741/JKWRA.2016.49.3.241>
 Ohtsuki, K., Kono, T., Arikawa, T., Taniwaki, H., & Itsukushima, R. (2024). Spur Dike Applications for the Sustainability of Channels in Incised Steep Bend Streams. Water, 16(4), 575.
<https://doi.org/10.3390/w16040575>
 Patel, H. K., & Kumar, B. (2024). Optimal spur dike orientation for scour mitigation under downward seepage conditions. Journal of Hydrology and Hydromechanics, 27(3), 386-397.
<https://doi.org/10.2478/johh-2024-0019>
 Rodi, W. (1993). On the simulation of turbulent flow past bluff bodies. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 46-47, 3-19.
 Tarek, M., Imran, J., & Chaudhry, H. (2004). Numerical modeling of three dimensional flow field around circular piers. Journal of Hydraulic Engineering, 130(2), 91-100.
[https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9429\(2004\)130:2\(91\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(2004)130:2(91))
 Vaghefi, M., Ghodsian, M., & Akbari, M. (2017). Experimental investigation on 3D flow around a single T shaped spur dike in a bend. Period. Polytech. Civil Engineering, 61(3), 462-470.
<https://doi.org/10.3311/PPci.7999>
 Xiufang, Z., Pingyi M., & Chengyu, Y. (2012). Experimental study on flow turbulence distribution around a spur dike with different structure. Procedia Engineering, 28(5), 772-775.
<https://doi.org/10.1016/j.proeng.2012.01.807>
 Yazdi, j., Sarkardeh, H., Azamathulla, H., & Ghani, A. (2010). 3D simulation of flow around a single spur dike with free-surface flow. International Journal of River Basin Management, 8(1), 55-62.
<https://doi.org/10.1080/15715121003715107>

پی‌نوشت‌ها

1. Reynolds Stress Models (RSM)
2. Large Eddy Simulation (LES)
3. Vortices
4. Wake
5. Walls
6. Bed
7. Channel Inlet
8. Pressure Inlet
9. Free Surface Level
10. Velocity Inlet
11. Outlet
12. Top
13. Pressure Outlet

صفرزاده، اکبر. (۱۳۸۹). مطالعه آزمایشگاهی الگوی جریان آشفته حول آب‌شکن با شکل‌های مختلف دماغه. رساله دکتری، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران.
 کاردان، نازیلا، حکیم زاده، حبیب و حسن زاده، یوسف. (۱۳۹۲). شبیه‌سازی عددی سه‌بعدی پارامترهای هیدرودینامیکی اطراف پایه استوانه‌ای با استفاده از مدل‌های آشفتگی مختلف. علوم و مهندسی آبیاری، ۳۷(۴)، ۳۹-۵۴.
[20.1001.1.25885952.1393.37.4.4.8](https://doi.org/10.1001.1.25885952.1393.37.4.4.8)
 کشاورز، محمد حسین و حکیم زاده، حبیب. (۱۳۸۷). شبیه‌سازی عددی سه‌بعدی الگوی جریان و گردابه‌ها اطراف آب‌شکن‌های L شکل نفوذناپذیر در پنج زاویه مختلف از نیمه اول قوس نیم دایره. یازدهمین کنفرانس هیدرولیک ایران. دانشگاه ارومیه، ارومیه.
 Ahmad, M. (1953). Experiments on design and behavior of spur dikes. Proceedings of the international hydraulics convention. University of Minnesota. Minneapolis, USA.
 Çengel, Yunus A. (2018). Fluid mechanics: fundamentals and applications. John M. Cimbala (Fourth Ed.). New York, NY. ISBN 978-1-259-69653-4. OCLC 958355753.
 Chen, F. Y., & Ikeda, S. (1997). Horizontal separation in shallow open channels with spur dikes. Journal of Hydrosience and Hydraulic Engineering, 15(2), 15-30.
 Ghodsian, M., & Vaghefi, M. (2009). Experimental study on scour and flow field in a scour hole around a T-shape spur dike in a 90° bend. International Journal of Sediment Research, 24(2), 145-158.
[https://doi.org/10.1016/S1001-6279\(09\)60022-6](https://doi.org/10.1016/S1001-6279(09)60022-6)
 Holtz, K. P. (1991). Numerical simulation of recirculating flow at groynes. Journal of computer Methods in Water Resources, 2(2), 463- 477.
 Li, G., Sui, J., Dziedzic, M., & Ali, F. (۲۰۲۶). Local scour around submerged spur dikes under ice-covered conditions: experimental and numerical investigation. Cold Regions Science and Technology, 241, 104695.
<https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2025.104695>
 Kumar, T., Tyagi, L. D., & Kumar, M. (2018). Comparison of scour around different shapes of groynes in open channel. International Journal of Recent Trends in Engineering and Research, 4(3), 382-392.
<https://doi.org/10.18280/mmep.090515>
 Lee, K. S., & Jang, C. L. (2016). Numerical investigation of space effects of serial spur dikes on flow and bed