



Investigating the Effect of Channel Bend Radius on Flow Characteristics in Inclined Bed Channels

Mohammadreza Zayeri ¹✉ | Mehdi Ghomeshi ²

1. Corresponding Author, Department of Water Structures, Faculty of Water and Environmental Engineering, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran. E-mail: m.zayeri@scu.ac.ir

2. Department of Water Structures, Faculty of Water and Environmental Engineering, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran. E-mail: ghomeshi@scu.ac.ir

Article Info

Article type: Research Article

Article history:

Received: Nov. 6, 2024

Revised: Dec. 11, 2024

Accepted: Dec. 24, 2024

Published online: April. 2025

Keywords:

Three-Dimensional Velocity, Flow Pattern, Vectrino Velocity Meter, Experimental Study.

ABSTRACT

Meanders in rivers are critical areas for studying flow patterns. Flow within river bends is influenced by centrifugal forces and pressure gradients. Given that rivers exhibit various bed slopes, studying the three-dimensional flow pattern in such channels is of significant importance. The objective of this study was to investigate the three-dimensional velocity components of flow in gentle and sharp 90-degree bends with sloped beds. Experiments were conducted in a channel with central curvature radius-to-width ratios of two, four, and six. Velocity measurements were performed using the Vectrino velocity meter, one of the most advanced instruments for measuring flow velocity. The results indicated that due to the effect of the water's weight component along the bed slope, the maximum longitudinal flow velocity in the initial sections of the bend for gentle bends occurs near the outer wall. However, in the later sections, it shifts closer to the middle of the channel width. Across all Froude numbers and all bends, the transverse velocity profile could be divided into two layers: one near the outer wall of the bend with maximum velocity and another near the inner wall of the bend with minimum velocity, located at 25% of the channel width. It was also observed that by doubling the Froude number from 0.05 to 0.1, the location of maximum shear stress extended from the range of up to 30 degrees to the range of up to 50 degrees of the bend section, and was concentrated near the outer wall.

Cite this article: Zayeri, M.R., & Ghomeshi, M., (2025) Investigating the Effect of Channel Bend Radius on Flow Characteristics in Inclined Bed Channels, *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 56 (2), 445-462.

<https://doi.org/10.22059/ijswr.2024.384976.669828>

© The Author(s).

Publisher: The University of Tehran Press.



DOI: <https://doi.org/10.22059/ijswr.2024.384976.669828>



EXTENDED ABSTRACT

Introduction

In the design of irrigation and drainage networks, it is essential to have a comprehensive understanding of the hydraulic behavior of flow in curved paths. These curved paths, often found in natural rivers and man-made structures, can lead to issues such as erosion and sediment deposition if not carefully considered. To mitigate these issues, a thorough understanding of flow patterns in bends is crucial for effective and economical design. However, the complex interplay of flow and bed topography in bends makes it challenging to achieve a complete understanding of these patterns. Numerous studies have investigated the impact of bend curvature on flow patterns in open channels (Elyasi et al., 2014; Liu et al., 2024; Pradhan et al., 2024; Shaheed et al., 2021). These studies, employing experimental, numerical, and Soft Computing methods, have explored various aspects of flow behavior in bends. Despite extensive research on flow patterns in bends, no studies have specifically investigated the effect of channel bend radius on flow characteristics in sloped surfaces. Therefore, this study aims to experimentally examine the influence of bend radius, ranging from sharp to mild, on flow patterns in sloped channels.

Materials and Methods

The study was conducted in a rectangular laboratory flume with a width of 20 cm. The flume was designed to create bends with varying centerline radius to width ratios (R/B), specifically 2, 4, and 6, representing sharp, moderate, and mild bends respectively. To ensure controlled flow conditions, the inlet flow rate was regulated using an electromagnetic flow meter, and mesh screens were employed to smooth the incoming flow. The channel bed was covered with a wooden sheet, and a similar sheet was placed over the curved section after each experiment to maintain consistency. Two Froude numbers (Fr), 0.05 and 0.1, were used to represent different flow regimes. The water surface elevation was kept constant at the entrance of the bend.

A 3D Acoustic Doppler Velocimeter (ADV), specifically the Vectrino+, was utilized to measure the three-dimensional velocity components of the flow. The measurement points were distributed along the channel length, width, and depth to capture a comprehensive representation of the flow field. The collected data, initially in polar coordinates, was converted to Cartesian coordinates using mathematical relationships to facilitate visualization and analysis of the velocity components.

Results and discussion

The longitudinal velocity distribution in the bend exhibited distinct patterns. As the flow entered the bend, the maximum velocity shifted from the center towards the inner wall due to the sudden change in curvature and the resulting pressure gradient. This shift was consistent with previous studies on horizontal beds. However, in the sloped bed, the maximum velocity shifted towards the outer wall due to the influence of gravity and the added force of the fluid weight in the direction of the slope. This observation suggests that the slope significantly alters the velocity distribution compared to horizontal beds. Secondary flows, characterized by transverse velocity components, play a crucial role in flow patterns within bends. The study revealed that the development and structure of secondary flows are influenced by the curvature ratio of the bend. In milder bends (higher R/B ratios), a single rotational flow formed near the inner wall, gradually expanding to encompass the entire cross-section as the flow progressed along the bend. However, in sharper bends (lower R/B ratios), an additional, smaller rotational flow formed near the inner wall, opposite to the direction of the main secondary flow. Bed shear stress is a critical factor in erosion and sediment transport processes within river bends. These findings suggest that the location and extent of the high shear stress zone are influenced by both the bend sharpness and the flow regime.

Conclusion

The study highlights the significant impact of channel bend radius on flow characteristics in sloped surfaces. The interaction of the slope and the centrifugal force results in a unique velocity distribution that differs from that observed in horizontal beds. The development and structure of secondary flows are also influenced by the bend sharpness, with sharper bends exhibiting more complex flow patterns. The distribution of bed shear stress is crucial for understanding erosion and sediment transport processes. The study identified the location and extent of the high shear stress zone and its dependence on both bend sharpness and flow regime. The findings of this study provide valuable insights for the design of irrigation and drainage networks, as well as for understanding and managing river morphology in natural settings.

Author Contributions

For this research article, the individual contributions are as follows: Conceptualization, [Author A] and

[Author B]; methodology, [Author B]; software, [Author A]; validation, [Author A], [Author B], and [Author B]; formal analysis, [Author B]; investigation, [Author A]; resources, [Author A]; data curation, [Author B]; writing—original draft preparation, [Author B]; writing—review and editing, [Author B]; visualization, [Author B]; supervision, [Author B]; project administration, [Author B]; funding acquisition, [Author A]. All authors have read and agreed to the published version of the manuscript.

Data Availability Statement

The data that support the findings of this study are available. For further inquiries regarding the data, please contact author's email.

Acknowledgements

The authors are grateful for the financial support of the Research Council of Shahid Chamran University of Ahvaz (GN: SCU.WH1403.43525).

Ethical considerations

The authors avoided data fabrication, falsification, plagiarism, and misconduct.

Conflict of interest

The author declares no conflict of interest.

بررسی اثر شعاع انحنای کانال بر مشخصات هیدرولیکی جریان در سطوح شیب‌دار

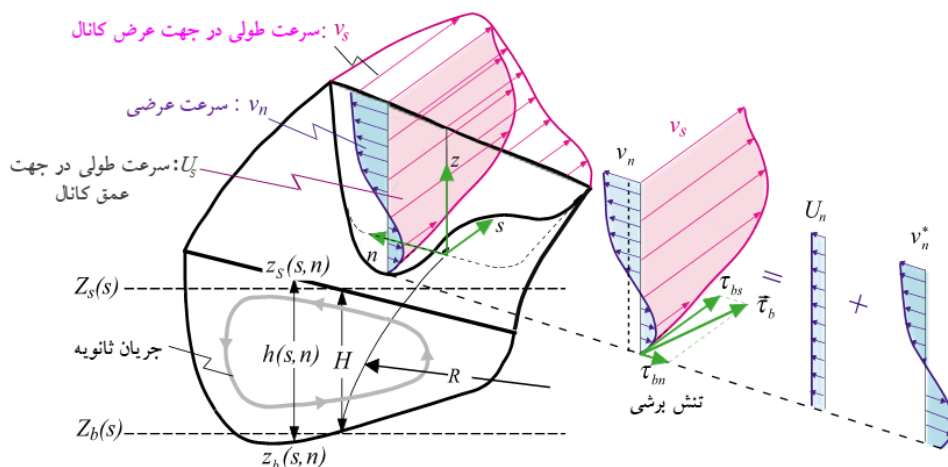
محمد رضا زایری^۱ | مهدی قمشی^۲۱. نویسنده مسئول، گروه سازه‌های آبی، دانشکده مهندسی آب و محیط‌زیست، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران. رایانامه: M.zayri@scu.ac.ir۲. گروه سازه‌های آبی، دانشکده مهندسی آب و محیط‌زیست، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران. رایانامه: ghomeshi@scu.ac.ir

اطلاعات مقاله	چکیده
نوع مقاله: مقاله پژوهشی	مسیرهای خم رودخانه از مناطق مهم در بررسی الگوی جریان به شمار می‌روند. جریان در خم‌های رودخانه تحت تأثیر نیروی گریز از مرکز و گرادیان فشار قرار دارد. با توجه به آنکه رودخانه‌ها دارای شیب‌های بستر مختلف بوده‌اند، بنابراین، مطالعه الگوی جریان سه‌بعدی در این گونه از مجاری اهمیت بالایی دارد. هدف این مقاله بررسی مؤلفه‌های سرعت سه‌بعدی جریان در خم‌های ملایم و تند ۹۰ درجه با بستری شیب‌دار بوده است. آزمایش‌ها در کانالی با نسبت شعاع انحنای مرکزی به عرض دو، چهار و شش انجام شده که اندازه‌گیری سرعت جریان با استفاده از سرعت‌سنج Vectrino که از پیشرفته‌ترین انواع سرعت‌سنج‌هاست، صورت گرفته است. نتایج نشان داد که به دلیل وجود مؤلفه وزن سیال آب در راستای شیب بستر، حداکثر سرعت طولی جریان در بخش‌های ابتدایی خم برای خم‌های ملایم در نزدیکی دیواره خارجی رخ می‌دهد، درحالی‌که در بخش‌های انتهایی به نزدیکی میانه عرض کانال منتقل می‌شود. در همه اعداد فرود و در همه قوس‌ها نیم‌رخ عرضی سرعت به دولایه یکی نزدیک به دیواره خارجی قوس با میزان حداکثر سرعت و در لایه نزدیک به دیواره داخلی نیم‌رخ حداقل سرعت در فاصله ۲۵ درصدی عرض کانال قابل تفکیک می‌باشد همچنین مشاهده شد با افزایش دوبرابری عدد فرود از مقدار ۰/۰۵ به ۰/۱ موقعیت بیشینه تنش برشی از محدوده تا زاویه ۳۰ درجه، به محدوده تا زاویه ۵۰ درجه مقطع و در نزدیکی دیواره خارجی امتداد یافته است.
تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۸/۱۶	
تاریخ بازنگری: ۱۴۰۳/۹/۲۱	
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۱۰/۴	
تاریخ انتشار: اردیبهشت ۱۴۰۴	
واژه‌های کلیدی:	
سرعت سه بعدی،	
الگوی جریان،	
سرعت‌سنج Vectrino،	
مطالعه آزمایشگاهی.	
استناد: زایری؛ محمد رضا، قمشی؛ مهدی، (۱۴۰۴). بررسی اثر شعاع انحنای کانال بر مشخصات هیدرولیکی جریان در سطوح شیب‌دار، مجله تحقیقات آب و خاک ایران، ۵۶ (۲)، ۴۶۲-۴۴۵. https://doi.org/10.22059/ijswr.2024.384976.669828	
ناشر: مؤسسه انتشارات دانشگاه تهران.	© نویسندگان.
DOI: https://doi.org/10.22059/ijswr.2024.384976.669828	



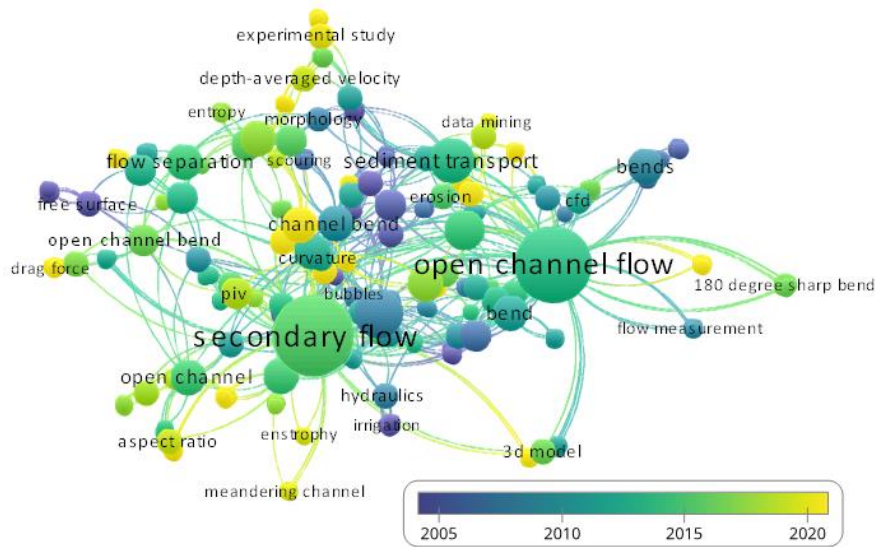
مقدمه

مسیرهای دارای قوس از جمله مقاطع کانال انتقال آب بوده که در طراحی شبکه‌های آبیاری و زهکشی اجتناب‌ناپذیر هستند. علاوه بر این، خم‌ها به‌صورت طبیعی در رودخانه‌ها وجود دارند و مکان مناسبی برای آبیگری در شبکه‌های آبیاری و زهکشی هستند. با توجه به وجود مشکل فرسایش و رسوبگذاری شدید در مسیرهای دارای قوس کانال‌های انتقال آب و خم رودخانه‌ها، از اینرو مطالعه هیدرولیکی جریان در محدوده این مسیرها کمک می‌کند تا الگوی جریان در قوس‌ها بادقت بیشتری طراحی و یا سازه‌های کنترل فرسایش اقتصادی طراحی گردد. در طبیعت از لحاظ هندسی، رودخانه دارای خطوط کناری مستقیم‌الخط به شکل بازه طولانی به‌ندرت یافت می‌شود (Gleason, 2015). ویژگی‌های جریان و توپوگرافی بستر در محل خم رودخانه‌ها به‌قدری پیچیده است که شناخت کامل آن تا به حال به‌طور کامل میسر نشده است (Safarzadeh & Salehi Neyshabouri, 2005). در شکل ۱ به‌صورت شماتیک الگوی جریان در محل خم‌ها نشان داده شده است. متغیرهای $R, H, Z_b, Z_s, U_s, V_n, V_s, t_b$ به ترتیب شعاع خم، عمق آب، تراز بستر، تراز سطح آب، سرعت طولی جریان در جهت عمق کانال، سرعت عرضی جریان، سرعت طولی در جهت عرض کانال و برآیند تنش برشی در بستر می‌باشند. هنگام ورود جریان به انحنا رودخانه و تأثیر نیروی گریز از مرکز، موجب می‌شود تا در هر مقطع عرضی سطح آب در قوس خارجی بالاتر از قوس داخلی قرار گیرد. اختلاف بار آبی باعث پیدایش جریان عرضی (V_n) می‌شود که با تداخل آن با نیروی گریز از مرکز و درنظرگرفتن تغییرات توزیع قائم سرعت جریان عرضی در لایه‌های بالائی آب نمی‌تواند با نیروی گریز از مرکز مقابله و این لایه‌ها از قوس داخلی به سمت قوس خارجی حرکت می‌کنند (Sharma et al., 2023). جهت حرکت در لایه‌های پائینی آب به دلیل کوچک بودن نیروی گریز از مرکز به سمت قوس داخلی است. در اثر اندرکنش بین جریان‌های ثانویه و عدم یکنواختی نیم‌رخ سرعت غیریکنواخت در عمق، الگوی جرابی به نام جریان حلزونی تشکیل می‌شود که وجود این جریان، باعث ایجاد آشفتگی شدید جریان می‌شود. در اثر این پدیده الگوی نیم‌رخ سرعت در جهت عرضی دچار تغییر زیادی نسبت به حالت مستقیم می‌شود (Lin et al., 2024).



شکل ۱. شماتیک الگوی جریان در مقطع یک خم (Lin et al., 2024)

جریان ثانویه، تأثیر زیادی بر ریخت‌شناسی خم‌های آبرفتی در رودخانه دارد؛ به‌طوری‌که سرعت بالای جریان در قوس بیرونی خم باعث حمله شدید به بستر رودخانه و کناره و در نتیجه تخریب آن می‌شود (Pradhan et al., 2024; You et al., 2023). برای بهبود درک بیشتر از جریان در خم‌های رودخانه، تا کنون تحقیقات فراوانی اعم از اندازه‌گیری‌های میدانی (Blanckaert, 2019; Akbari & Vaghefi, 2017; Deng et al., 2021; Liu et al., 2024; Wang et al., 2019) مدل‌سازی عددی (Mehraein et al., 2014; Safaripour et al., 2024) و مطالعاتی جریان در مسیر خم‌ها در پایگاه استنادی اسکوپوس مورد بررسی قرار گرفته شده است. جهت بررسی دقیق‌تر، در شکل ۲ واژگان کلیدی پرکاربرد توسط محققین پیشین در بررسی جریان ثانویه در کانال‌های روباز با مسیرهای قوسی شکل، همواره مورد توجه محققین با استفاده از ابزارها و روش‌های آزمایشگاهی، عددی و محاسبات نرم بوده است.



شکل ۲. واژگان کلیدی در پیشینه پژوهش گزارش شده پیرامون الگوی جریان در قوس‌ها

Salajgheh et al (2005) به بررسی آزمایشگاهی الگوی جریان در یک خم ۹۰ درجه پرداختند. آزمایش‌ها در یک فلوم مستطیل شکل، با انحنای نسبی (R/B) برابر سه انجام شد، که R شعاع قوس و B عرض کانال می‌باشد. آنان به این نتیجه رسیدند که بیشترین تغییرات متوسط سرعت در راستای عمق جریان و حداکثر شیب عرضی سطح آب در زاویه ۱۸۰ درجه قوس و حداقل آن در زاویه ۳۰ و ۱۰۰ درجه قوس به وقوع می‌پیوندد. همچنین بررسی نیم‌رخ‌های متوسط سرعت در راستای عمق جریان در هر سه بعد نشان می‌دهد که حداکثر سرعت آب در عمق ۷/۷ سانتی‌متر از بستر و حداقل آن در عمق ۵/۷ سانتی‌متر از سطح آب است. (Abad et al (2009) به مطالعه الگوی جریان متوسط و آشفته در کانال پیچانرودی کینوشیتا^۱ با بستر صلب پرداختند و مؤلفه‌هایی همچون تنش رینولدزی^۲ و انرژی جنبشی آشفتگی^۳ را در مقاطع عرضی این کانال محاسبه نمودند. در این مطالعه آزمایش‌ها نشان داد که با رسیدن به راس قوس، هسته سرعت پیشینه جریان به سمت دیواره داخلی کانال متمایل می‌شود. (Blanckaert & De Vriend (2010) به بررسی مشخصات جریان آشفته در یک کانال قوسی با زاویه مرکزی ۱۲۰ درجه پرداختند. آنها برای برداشت داده‌های سرعت جریان از سرعت‌سنج ADVP^۴ استفاده کردند و مؤلفه‌های انرژی جنبشی و تنش برشی را محاسبه نمودند.

در مطالعه‌ای بیان شد جریان ثانویه قوی در خم ۹۰ درجه با انحنای نسبی ($\frac{R}{B} = 3$) تشکیل می‌شود. داده‌های تجربی و شبیه‌سازی عددی نشان می‌دهد که جریان ثانویه باعث انتقال تکانه جانبی به سمت دیواره خارجی می‌شود و توزیع سرعت لگاریتمی را در مؤلفه سرعت طولی تا حدی مختل می‌کند. همچنین محل حداکثر سرعت ورودی تا مقطع زاویه ۳۰ درجه نزدیک به دیواره داخلی کانال بوده و سپس در پایین دست آن این سرعت پیشینه به سمت دیواره خارجی کانال حرکت می‌کند (Abhari et al., 2010). (Blanckaert (2011) به معرفی جریان‌های ثانویه پرداخت و این جریان‌ها را به دو دسته کلی تقسیم بندی نمود. دسته اول جریان‌های ثانویه ناشی از فشار (جریان ثانویه نوع اول) که جریان‌های موجود در مسیرهای قوسی می‌باشد که سبب توزیع سرعت‌های متفاوت در مقاطع عرضی مختلف می‌شود. دسته دوم جریان‌های ثانویه ناشی از آشفتگی (جریان ثانویه نوع دوم) هستند که این نوع جریان‌ها به دلیل عدم تقارن تنش‌های برشی آشفتگی در مسیرهای مستقیم رخ می‌دهد (به عنوان مثال در مقاطع غیر دایروی). در رودخانه‌های با مسیر مستقیم، ذرات کوچک شناور در سطح آب متمایل دارند که به سمت قسمت مرکزی مقطع بروند که این پدیده دلیلی بر وجود جریان‌های عرضی می‌باشد.

Elyasi et al. (2014) به بررسی عددی اثر شعاع نسبی بر الگوی جریان، در قوس ۹۰ درجه با چهار نسبت شعاع به عرض دو تا پنج، با استفاده از نرم‌افزار FLOW3D پرداختند. نتایج آن‌ها نشان داد که به سمت انتهای قوس، برای حالت نسبت شعاع به عرض برابر دو، سرعت پیشینه در مقطع همچنان در نواحی نزدیک دیواره داخلی اتفاق افتاده، اما برای سایر نسبت‌های شعاع به عرض محل وقوع

1 Kinoshita meandering channel
 2 Reynolds stress
 3 Kinetic energy of turbulence
 4 Acoustic Doppler Velocity Profiler

سرعت بیشینه به نواحی نزدیک دیواره خارجی منتقل می‌شود. (Vaghefi et al. (2015) مؤلفه‌های سه بعدی سرعت جریان و همچنین نحوه توزیع انرژی جنبشی و حاصل ضرب نوسانات سرعت در طول قوس ۱۸۰ درجه را مورد مطالعه قرار دادند. نتایج آزمایشات آنها نشان داد که سرعت طولی جریان در نزدیکی سطح آب نسبت به نزدیکی بستر کانال ۶۰ درصد افزایش یافته است. این مطالعه نشان داد شدت جریان ثانویه در راس قوس یعنی مقاطع ۸۰ تا ۱۰۰ درجه به بیشترین مقدار خود می‌رسد. (Chooplou & Vaghefi (2019) در مطالعه‌ای آزمایشگاهی، تنش برشی بستر را با استفاده از روش عمق متوسط، در قوس ۱۸۰ درجه با انحناى نسبی $\frac{R}{B}=2$ ، مورد بررسی قرار دادند. آنان برای اندازه‌گیری سرعت جریان، از دستگاه سرعت‌سنج سه بعدی ADV^۱ استفاده کردند. نتایج تحقیق آنها، بیانگر افزایش تنش برشی بستر در ورودی قوس و در نزدیکی دیواره داخلی کانال تا مقطع عرضی ۴۰ درجه می‌باشد. همچنین نتایج آنان نشان می‌دهد در یک قوس با انحناى شدید، آشفتگی نقش مهمی در جریان ایفا می‌کند. (Shaheed et al. (2021) در مطالعه‌ای بیان کردند شرایط مرزی در مدل سازی عددی الگوی جریان در قوس‌ها نقش مهمی در توزیع سرعت در مقطع عرضی دارند. انتخاب شرایط مرزی صحیح و مناسب می‌تواند به شبیه‌سازی دقیق‌تر و نتایج بهتر منجر شود. بر اساس یافته‌های آنان، مشاهده می‌شود که اکثر مدل‌های آشفتگی نظیر RANS^۲ و LES^۳ در شبیه‌سازی جریان ثانویه در قوس‌ها با بعضی تفاوت‌ها در دقت، عملکرد خوبی داشته‌اند. همچنین توزیع سرعت به طور قابل توجهی تحت تأثیر شعاع انحنا قرار دارد. بیشینه سرعت در قوس‌های با انحناى شدید در ابتدای قوس نزدیک به ساحل داخلی رخ می‌دهد و سپس به تدریج به سمت ساحل خارجی حرکت می‌کند. حداکثر سرعت جریان‌های ثانویه در زیر سطح آزاد رخ می‌دهد. همچنین سرعت جریان‌های ثانویه با افزایش شعاع انحنا کاهش می‌یابد. (Hu & Yu (2023) با استفاده از شبیه‌سازی عددی سه بعدی به بررسی توزیع تنش برشی بستر در یک کانال با قوس ۱۸۰ درجه پرداختند. نتایج آنان نشان می‌دهد که حداکثر تنش برشی بستر در ناحیه ساحل داخلی از مقاطع ۵۰ تا ۱۱۰ درجه ظاهر می‌شود. همچنین بیشترین سهم در تولید جریان گردابی توسط شیب عرضی سطح آب و در نتیجه افزایش گردابان فشار ایفا می‌شود. (Farag Boghdady et al (2023) با بررسی و آزمایش‌های میدانی بر روی ۲۰ قوس اصلی در رودخانه نیل^۴ (شاخه دامیتا) با ارائه رابطه رگرسیونی با ضریب تعیین^۵ ($R^2=0.71$) دریافتند که عمق آبشستگی در ساحل خارجی این قوس‌ها به مؤلفه‌های شعاع قوس، عرض رودخانه، عمق آب بالادست، سرعت طولی و عرضی جریان رودخانه بستگی دارد. (You, Tao, et al., (2023) از تکنیک تصویربرداری ذرات، با وضوح زمانی و شبیه‌سازی‌های عددی، برای مطالعه ویژگی‌های جریان در کانال‌های U-شکل، با هندسه‌های مختلف در بخش خم استفاده نمودند. نتایج آنان نشان می‌دهد که هندسه خم به طور قابل توجهی بر ساختار میدان جریان تأثیر می‌گذارد؛ همچنین کانال‌های مربعی، گردابه‌های بزرگ‌تر و تنش برشی رینولدز بیشتری نسبت به کانال‌های دایره‌ای ایجاد می‌کنند. عدد چرخش نیز به دلیل نیروهای کوریولیس^۶ (نیروی ناشی از انحراف حرکت ذرات سیال، هنگامی که در یک محور مختصات چرخش قرار دارد) بر اندازه ساختارهای گردابی و الگوهای جریان ثانویه تأثیر می‌گذارد.

بر اساس اطلاعات به دست آمده، تاکنون هیچ تحقیقی در خصوص الگوی جریان در قوس ۹۰ درجه در کانال‌های شیب‌دار انجام نشده است. بر اساس پیشنهادهای ارائه شده (Elyasi et al., 2014)، در صورتی که نسبت شعاع به عرض بیشتر از ۳ باشد، قوس ملایم و در حالتی که نسبت شعاع به عرض کمتر از ۳ باشد، قوس تند نامیده می‌شود. بنابراین در مطالعه آزمایشگاهی حاضر اثر سطح شیب‌دار بر الگوی جریان در قوس‌های تند تا ملایم مورد بررسی و مطالعه قرار گرفت.

مواد و روش‌ها

آزمایش‌ها در یک کانال با مقطع مستطیلی شکل مطابق با شکل ۳، با عرض ۲۰ سانتی‌متر، ارتفاع کانال ۷۰ سانتی‌متر و طول ۸ متر، با سه خم با نسبت شعاع انحناى خط مرکزی به عرض کانال ($\frac{R}{B}$)، به ترتیب برابر ۲، ۴ و ۶ در آزمایشگاه هیدرولیک دانشگاه شهید چمران اهواز انجام شد. شیب بستر کانال در مسیر خم برای هر سه قوس برابر $0.33/100$ در نظر گرفته شد. پس از اندازه‌گیری دبی ورودی به کانال توسط

1 acoustic doppler velocimeter

2 Reynolds averaged NavieStokes

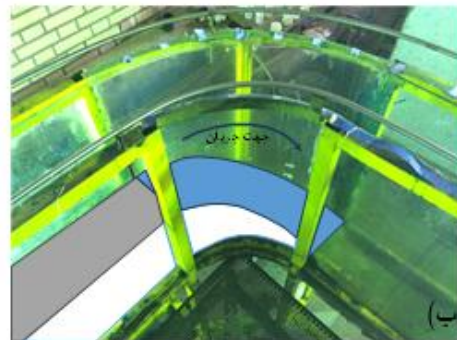
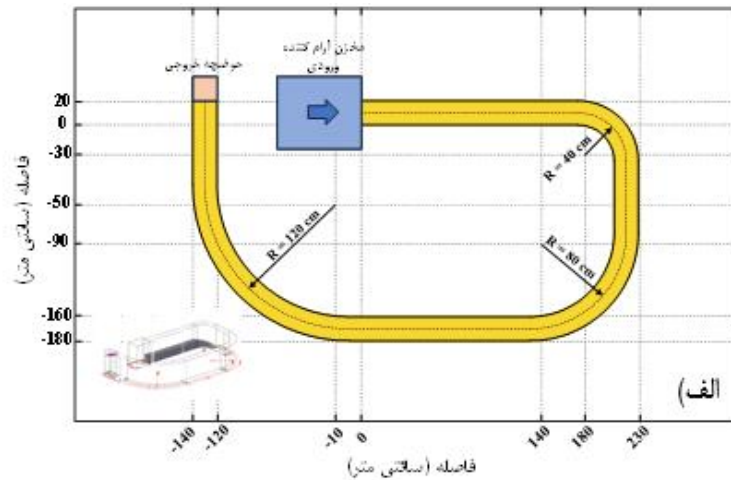
3 large eddy simulation

4 Nile river

5 Coefficient of determination

6 Coriolis Forces

دبی‌سنج الکترومغناطیس^۱، از سه سری صفحه‌های مشبک جهت آرام نمودن جریان ورودی به کانال در مسیر مستقیم پیش از ابتدای قوس استفاده گردید. برای جلوگیری از ایجاد زبری در بستر، صفحه‌ای چوبی و صیقل داده شده بر روی آن قرار گرفت. پس از اتمام آزمایش‌ها بر روی یک قوس، مصالح بستر برداشته شده و بر روی قوس دیگر، مشابه همین عملیات، جهت شیب‌دار نمودن آن انجام شد. شکل ۳ ب و ج نمونه‌های از مسیر شیب‌دار بستر جریان در قوس با نسبت شعاع به عرض ۲ و ۴ را نشان می‌دهد. آزمایش‌ها در دو دبی ۱، ۱/۵ لیتر بر ثانیه و با ثابت نگه داشتن تراز سطح آب بوسیله سرریز با عمق ۱۰ سانتی‌متر در بالادست در ابتدای ورودی به قوس، به ترتیب با اعداد فرود^۲، ۰/۵ و ۰/۱ و اعداد رینولدز، ۱۳۳۰۶ و ۱۹۹۶۰ انجام شد.



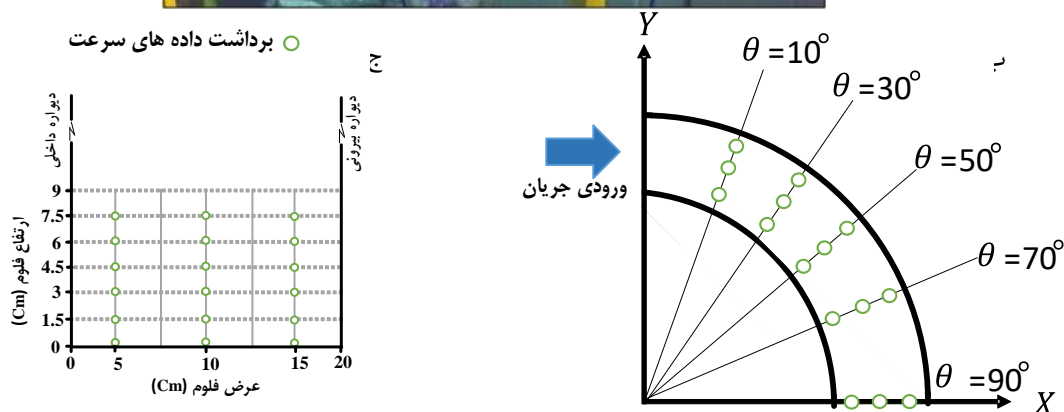
شکل ۳. الف) شماتیک ابعاد هندسی مدل آزمایشگاهی، ب) مسیر شیب‌دار جریان در قوس با نسبت شعاع به عرض ۲ ($\frac{R}{B} = 2$ و ج)

$$\frac{R}{B} = 4$$

به منظور اندازه‌گیری مؤلفه‌های سرعت و تعیین الگوی سه بعدی جریان از دستگاه سرعت‌سنج سه بعدی مدل ADV Vectrino+ مطابق شکل ۴ استفاده شده است. عملکرد دستگاه بر اساس ارسال یک موج صوتی با بسامد مشخص (s^{-1}) ۲۰۰ و دریافت بازتاب آن از جریان و تشخیص سرعت جریان از میزان تغییر در بسامد اولیه می‌باشد (Koch & Chanson, 2005). در واقع این سرعت‌سنج از یک قسمت ارسال صدا و از چهار دریافت‌کننده آن استفاده می‌کند. صدا از طریق قسمت مرکزی ردیاب^۳ فرستاده شده و توسط چهار شاخک (Beam) دریافت می‌شود (Salehi & Strom, 2011). با توجه به میزان تغییر در بسامد موج ارسالی، این دستگاه سرعت ذره سیال را محاسبه می‌کند. محدوده سرعت در این دستگاه از ± 0.1 تا ± 2 متر بر ثانیه قابل تنظیم بوده و دقت آن ± 0.5 درصد بوده است (Nortek, 2001).

در شکل ۴ ب نقاط برداشت داده‌های آزمایشگاهی مؤلفه‌های سه بعدی سرعت در یک شعاع نسبی در پلان عرضی کانال نمایش

داده شده است. همانگونه که مشاهده می‌شود در ۵ مقطع بین زاویه ۱۰ تا ۹۰ درجه برای هر قوس با شعاع انحنا نسبی مختلف و همچنین در هر مقطع عرضی در ۱۸ نقطه مختلف داده برداری سرعت انجام شد. در شکل ۴ همچنین نمایی از شبکه بندی کانال برای تعیین موقعیت نقاط برداشت شده در طول قوس، عرض و عمق آن نشان داده شده است.



شکل ۴. الف) دستگاه سرعت سنج ADV، نقاط اندازه گیری مؤلفه های سرعت (ب) در پلان و (ج) مقطع عرضی

با توجه به اینکه مختصات نقاط و سرعت های برداشت شده در حین آزمایش ها، بر اساس سیستم مختصات قطبی بوده که به صورت مؤلفه های شعاعی، مماسی و قائم هستند، به منظور ترسیم داده ها در نرم افزار متلب^۱ نیاز است که مؤلفه های موقعیت و سرعت داده های مذکور از مختصات قطبی به مختصات کارتزین تبدیل شوند. با استفاده از روابط زیر می توان این تبدیل مختصات را انجام داد. با استفاده از روابط ۱ تا ۳ مؤلفه های سرعت جریان و مختصات نقاط تبدیل می شوند (Sozopor et al., 2015):

$$u = u_{\theta} \cos \theta + u_r \sin \theta \quad \text{رابطه ۱}$$

$$v = u_{\theta} \sin \theta - u_r \cos \theta \quad \text{رابطه ۲}$$

$$r = r' + \Delta r, \quad x = r \sin \theta, \quad y = r \cos \theta \quad \text{رابطه ۳}$$

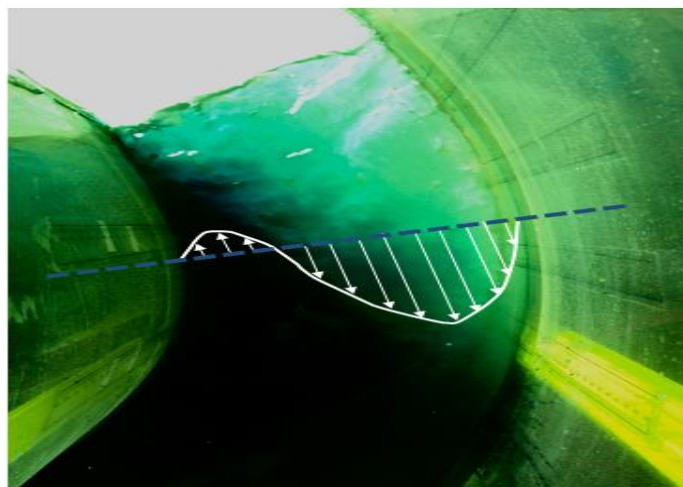
در روابط ۱ تا ۳، Δr فاصله نقطه اندازه گیری از دیواره داخلی (سانتی متر)، u_r و u_{θ} سرعت های دوبعدی در مختصات قطبی (سانتی متر بر ثانیه)، u و v سرعت های دوبعدی در مختصات دکارتی (سانتی متر بر ثانیه)، θ زاویه هر نقطه برداشت شده نسبت به محور افقی و r' شعاع قوس داخلی (سانتی متر) است.

نتایج و بحث

بررسی الگوی توزیع سرعت متوسط در قوس

همان گونه که اشاره شد بردار سرعت طولی (بردارهای عمود بر مقطع جریان در هر موقعیت قوس) با استفاده از سرعت سنج در یک امتداد

شعاعی و در زوایای ۱۰، ۵۰، ۷۰ و ۹۰ درجه اندازه‌گیری شد. در مطالعه‌های سایر محققین که در بخش مقدمه به آن اشاره شد، بر روی الگوی توزیع سرعت در مسیر قوس در بستر افقی مشاهده می‌شود که با ورود جریان به داخل قوس تا زاویه ۳۰ درجه، به دلیل گرادیان طولی فشار ناشی از نیروی جانب مرکز در بازه‌ی کوتاهی از ورودی قوس، به خاطر تغییر ناگهانی انحنای، در امتداد دیواره داخلی کاهش فشار و در امتداد دیواره خارجی افزایش فشار اتفاق می‌افتد که منجر می‌شود حداکثر سرعت به طرف دیواره داخلی منتقل می‌شود (Shaker & Kashefipour, 2015). بعد از این مقطع، حداکثر سرعت به نزدیکی دیواره خارجی منتقل می‌شود. علت این پدیده، تولید جریان‌های ثانویه در داخل مقاطع عرضی است؛ به طوری که، این جریان‌ها که در نزدیک سطح آب به طرف دیواره خارجی و در نزدیکی بستر به طرف دیواره داخلی برقرار هستند، بر گرادیان طولی فشار غالب شده و باعث انتقال عرضی مومنت طولی جریان می‌شوند. اما در بستر شیب‌دار با ورود جریان به مسیر قوس، سرعت طولی حداکثر در همه نسبت‌های شعاع به عرض به سمت دیواره خارجی انتقال پیدا می‌کند. علت این پدیده اضافه شدن نیروی وزن سیال در راستای شیب جریان و افزایش سرعت جریان بوده که تولید جریان ثانویه را تشدید می‌نماید (Keevil et al., 2007).

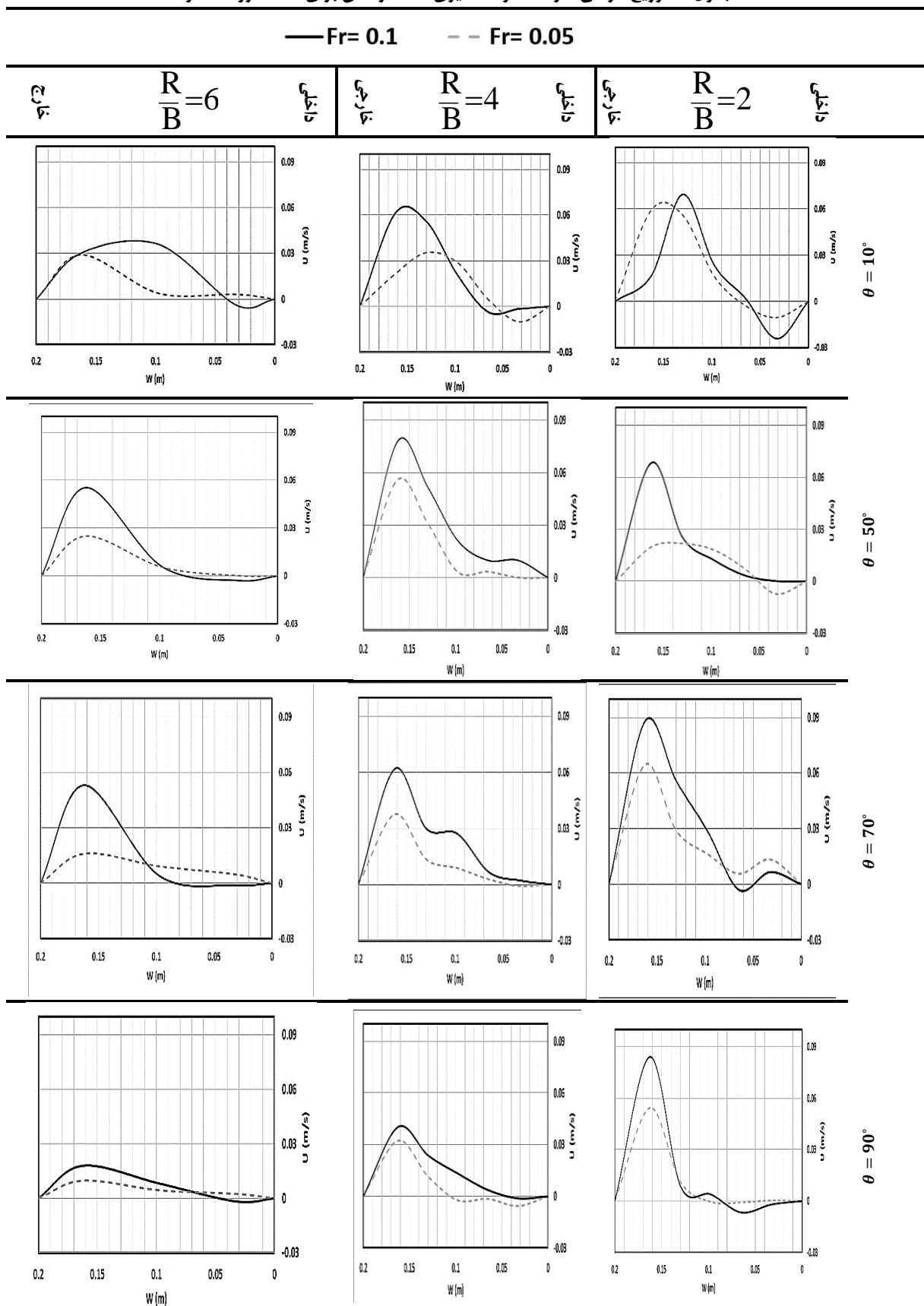


شکل ۵. نمایش جدانشدگی جریان در دیواره داخلی در قوس با $R/B=2$

مطابق شکل ۵ با تزریق ماده رنگی به سیال مشاهده می‌شود با ورود جریان به قوس جدانشدگی جریان در دیواره داخلی به وقوع می‌پیوندد (ناحیه مشکی رنگ) که با افزایش عمق در نیمه دوم قوس و نزدیک دیواره داخلی، ناحیه جدانشدگی جریان در قوس‌های ملایم گسترش می‌یابد و نزدیک بستر جدانشدگی جریان به علت غلبه کردن نیروی گرادیان فشار بر نیروی گریز از مرکز، اتفاق نمی‌افتد. بنابراین ناحیه جدانشدگی جریان نزدیک دیواره داخلی و در نیمه دوم قوس‌های ملایم به شکل مخروط اتفاق می‌افتد. در جدول ۱ توزیع عرضی سرعت متوسط گیری شده در عمق برای اعداد فرود ۰/۵ و ۰/۱ نشان داده شده است. همانگونه که مشاهده می‌شود در تمامی اعداد فرود و خم‌های مورد مطالعه، نیم‌رخ عرضی سرعت به دو لایه یکی نزدیک به دیواره خارجی قوس با میزان حداکثر سرعت و در لایه نزدیک به دیواره داخلی نیم‌رخ حداقل سرعت قابل تفکیک می‌باشد. با فاصله گرفتن از ابتدای خم به سمت انتهای آن از طول لایه دوم یعنی نزدیک به دیواره داخلی کاسته و به طول لایه اول نزدیک به دیواره خارجی اضافه خواهد شد. با افزایش عدد فرود، سرعت طولی و نیروی گریز از مرکز بیشتر شده و در نهایت افزایش نیروی گریز از مرکز باعث می‌شود که خطوط جریان زودتر از دیواره داخلی قوس جدا شده و ناحیه جدانشدگی جریان اتفاق بیافتد. می‌توان بیان داشت سرعت بیشینه جریان (U_{max}) نزدیک به دیواره خارجی در قوس تند ($\frac{R}{B}=2$) به دلیل بالا بودن نیروی گریز از مرکز نسبت به دو خم دیگر مقادیر بیشتری داشته است و تا انتهای خم تقریباً از روندی ثابت پیروی می‌کند. در نسبت شعاع به عرض ۴ و ۶ این روند از موقعیت زاویه ۷۰ درجه خم تا انتهای قوس از شدت بیشینه سرعت جریان در نزدیکی قوس خارجی کاسته شده است. سرعت برگشتی در نزدیکی دیواره داخلی برای نسبت شعاع به عرض ۴ در موقعیت ۷۰ درجه و برای نسبت شعاع به عرض ۶ از موقعیت ۵۰ درجه به مقدار صفر می‌رسد. با توجه به جدول ۱ در هر دو عدد فرود ۰/۵ و ۰/۱ مشاهده می‌شود ناحیه جدانشدگی جریان در نیم‌رخ عرضی سرعت (بین دو لایه) در یک فاصله ثابت (۲۵ درصد عرض کانال) از دیواره داخلی رخ می‌دهد و با کاهش سرعت بیشینه در لایه نزدیک به دیواره خارجی طبق اصل پیوستگی جریان از سرعت منفی دیواره

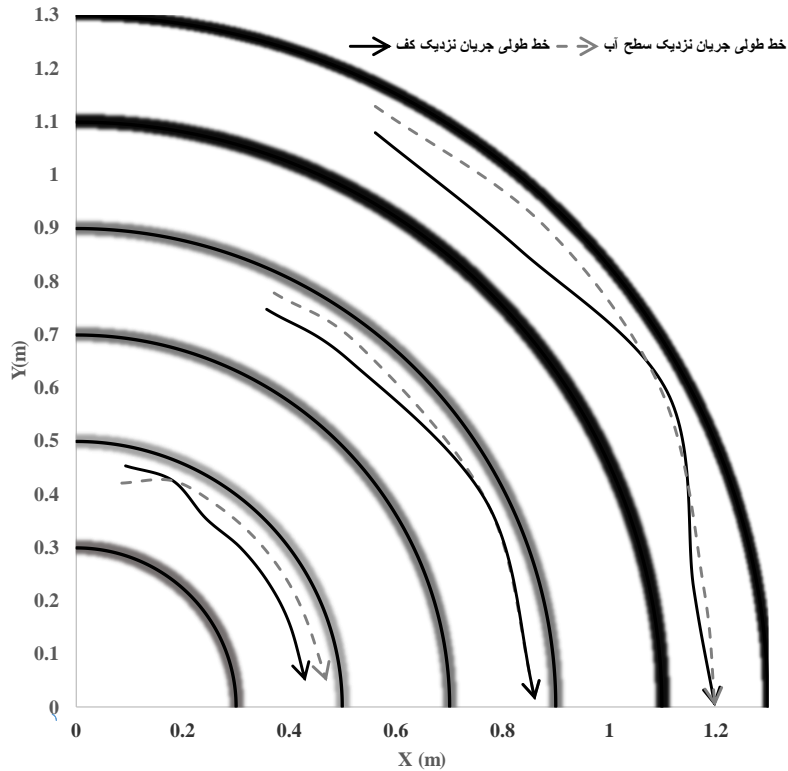
داخلی نیز کاسته می‌شود تا به مقدار صفر برسد.

جدول ۱. توزیع عرضی سرعت متوسط گیری شده در عمق برای اعداد فرود ۰/۱ و ۰/۰۵



بررسی بیشینه سرعت طولی جریان

با توجه به اینکه خطوط جریان در سیال در هر نقطه مماس بر بردار سرعت در آن نقطه است بنابراین خطوط جریان با استفاده از بردارهای سرعت در محدوده قوس قابل ترسیم است. شکل ۶ خطوط جریان طولی نزدیک سطح آب و نزدیک بستر را برای عدد فرود $0/1$ در تمامی قوس‌ها نشان می‌دهد.

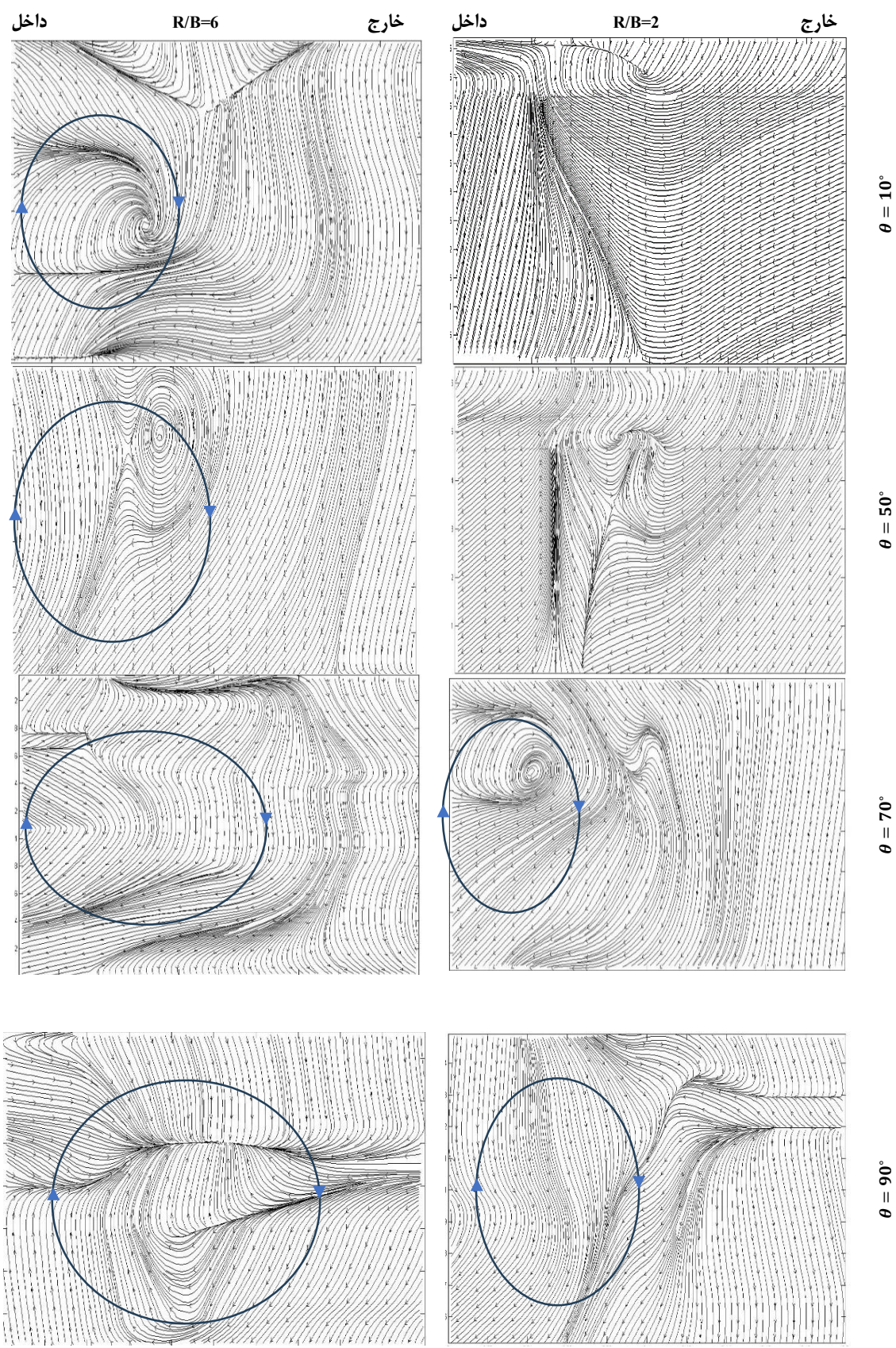


شکل ۶. خطوط طولی بیشینه سرعت جریان در نزدیکی بستر و سطح آب در تمامی قوس‌ها

با توجه به شکل ۶ برای نسبت شعاع به عرض ۲ می‌توان گفت در عمق ۵ سانتی‌متر از بستر و همچنین عمق ۵ سانتی‌متر از سطح آب سرعت‌های بیشینه در نزدیکی دیواره خارجی بوده و تا انتهای قوس روند خود را حفظ می‌نمایند. به علت افزایش نیروی گریز از مرکز انحنا خطوط جریان در این قوس تند نیز بیشتر می‌گردد. این روند برای نسبت شعاع به عرض ۴ هم صادق بوده با این تفاوت که به دلیل افزایش عمق آب در یک سوم انتهای قوس موقعیت حداکثر سرعت در نزدیکی بستر و سطح آب در یک راستا قرار می‌گیرند. با کاهش نسبت نیروی گریز از مرکز و همچنین افزایش عمق آب در پایین دست خم در نسبت شعاع به عرض ۶ سبب می‌شود موقعیت بیشینه سرعت طولی جریان به میانه کانال منتقل گردد.

بررسی جریان ثانویه

در این بخش اثر نسبت‌های مختلف شعاع به عرض قوس، بر الگوی جریان ثانویه در مقاطع عرضی بررسی می‌شود. در شکل ۷ الگوی جریان ثانویه با استفاده از خطوط جریان در زاویه‌های ۷۰، ۵۰، ۱۰ و ۹۰ درجه و برای نسبت‌های شعاع به عرض قوس ۲ و ۶ نشان داده شده‌اند. مطابق این شکل در مقطع ورودی قوس در زاویه ۱۰ درجه، با افزایش سطح آب در جهت طولی در نزدیکی قوس خارجی، روند مثبت شدن گرادیان فشار طولی و با کاهش سطح آب در جهت طولی در نزدیکی قوس داخلی، روند منفی شدن گرادیان فشار طولی اتفاق می‌افتد که با توجه به وقوع این فرایند و همچنین به منظور حفظ پیوستگی، این جریان یک سویه در راستای عرضی از دیواره خارجی به سمت دیواره داخلی قوس شکل می‌گیرد؛ ولی، همان‌گونه که پیش از این ذکر گردید جریان چرخشی دیگری با جهت چرخش موافق جریان ثانویه اصلی و با ابعاد کوچک‌تر در نزدیکی دیواره داخلی تشکیل می‌گردد. با پیشروی طولی جریان در مسیر خم الگوی خطوط جریان در شکل ۷ تشکیل جریان ثانویه در زاویه ۵۰ درجه از قوس را برای نسبت شعاع به عرض ۶ به دلیل طی کردن مسیر طولی بیشتر در دیواره داخلی به خوبی نمایش می‌دهد ولی در این مقطع در قوس تندتر (نسبت شعاع به عرض ۲) این جریان هنوز تشکیل نشده است.



شکل ۷. نمایش الگوی جریان در قوس ۹۰ درجه با نسبت شعاع به عرض ۲ و ۶

در زاویه ۷۰ درجه برای نسبت شعاع به عرض دو وضعیت چرخش نسبتاً مشابه زاویه ۵۰ درجه در قوس ملایم می‌باشد و جریان ثانویه در نزدیکی دیواره داخلی شکل گرفته است. در این موقعیت در قوس ملایم جریان چرخشی در دیواره داخلی از بین رفته و یک جریان ثانویه غیرمتقارن در تمام مقطع که در نزدیکی بستر به سمت دیواره داخلی است در حال شکل‌گیری می‌باشد. بر اساس شکل ۷ در انتهای قوس (زاویه ۹۰ درجه) جریان‌های ثانویه در قوس ملایم‌تر به صورت متقارن و کامل مشاهده می‌شود به نحوی که در سطح به دلیل غلبه نیروی گریز از مرکز بر گرادیان فشاری به سمت دیواره خارجی در حال چرخش می‌باشد. در قوس تند در این موقعیت روند جدایش جریان در دیواره داخلی از بین نرفته و یک جریان غیرمتقارن را شاهد هستیم.

بررسی توزیع تنش برشی

تغییرات تنش برشی در قوس نسبت به مسیر مستقیم، عامل اصلی فرسایش و رسوب‌گذاری در رودخانه‌ها می‌باشد. برای به دست آوردن تنش برشی در قوس از رابطه کوپر^۱ به صورت زیر استفاده شده است (Kassem & Chaudhry, 2002; Knight et al., 2007):

$$\tau_{tx} = \frac{\rho g}{2} u \sqrt{u^2 + v^2} \quad \text{(رابطه ۴)}$$

$$\tau_{ty} = \frac{\rho g}{2} v \sqrt{u^2 + v^2} \quad \text{(رابطه ۵)}$$

برای محاسبه تنش برشی کل بستر از رابطه ۶ استفاده می‌شود (Sozopor et al., 2015):

$$\tau_b = \sqrt{\tau_{tx}^2 + \tau_{ty}^2} \quad \text{(رابطه ۶)}$$

که به ترتیب تنش برشی در جهت طولی (رابطه ۴) و عرضی (رابطه ۵) می‌باشند، در روابط بالا ρ جرم مخصوص سیال و g شتاب ثقل می‌باشد. در معادلات بالا U و V به ترتیب متوسط عمقی سرعت در جهت طولی و عرضی و c ضریب شزی^۲ بوده که از رابطه ۷ قابل محاسبه است:

$$c = \frac{R^{1/6}}{n} \quad \text{(رابطه ۷)}$$

که در آن R شعاع هیدرولیکی و n ضریب زبری معادل می‌باشد.

شکل ۸ الف و ب توزیع تنش برشی بستر در دو عدد فرود ۰/۰۵ و ۰/۱ در طول قوس با نسبت‌های شعاع به عرض مختلف نمایش می‌دهد، طیف قرمز رنگ ناحیه پر تنش در قوس را نشان می‌دهد.

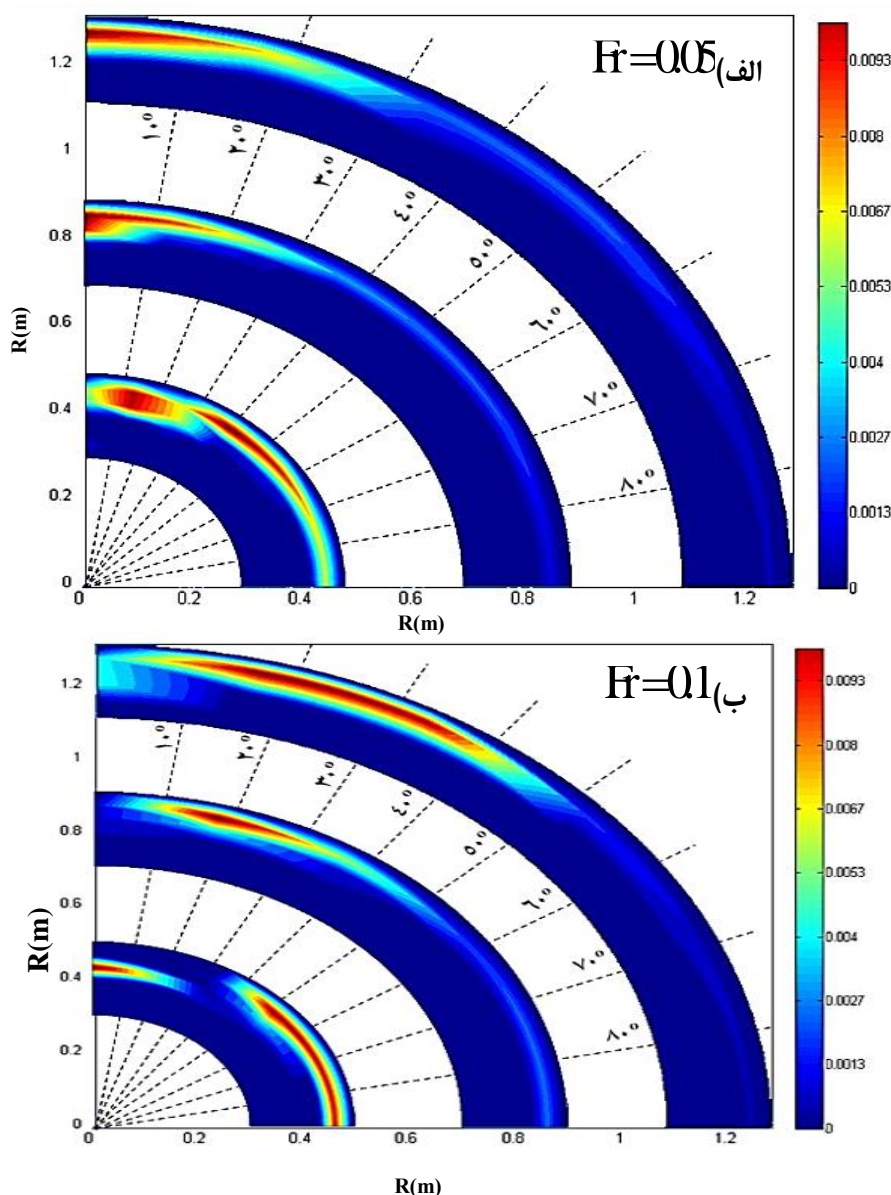
همان‌گونه که مشاهده می‌شود ناحیه پر تنش برای تمامی قوس‌ها و در هر دو عدد فرود در نزدیکی دیواره خارجی شکل گرفته است. این ناحیه پر تنش در عدد فرود ۰/۰۵ در نسبت شعاع به عرض ۴ و ۶ تا زاویه ۳۰ درجه از مقطع ورودی و در عدد فرود ۰/۱ تا زاویه ۵۰ درجه ادامه داشته و بعد از این زاویه با افزایش عمق و کاهش سرعت کاهش یافته است. همچنین برای قوس تند (نسبت شعاع به عرض ۲) ناحیه پر تنش در تمامی مسیر برای هر دو عدد فرود ادامه یافته است.

نتیجه‌گیری

جریان ثانویه یکی از ویژگی‌های برجسته کانال‌های داری خم می‌باشد که می‌تواند سرعت جریان و توزیع تنش برشی بستر را تغییر دهد. همان‌طور که پیش‌تر اشاره شد، هدف از این مطالعه بررسی تأثیر شعاع انحنا بر الگوی جریان در خم رودخانه‌های با بستر شیب‌دار بوده است. برای این منظور، داده‌های مربوط به اندازه‌گیری سه‌بعدی سرعت جریان تحلیل و ارزیابی شده است. نتایج کلی این تحقیق آزمایشگاهی نشان می‌دهد که الگوی توزیع سرعت در قوس به‌گونه‌ای است که به دلیل وجود شیب بر خلاف بستر افقی، نواحی با حداکثر سرعت در بخش پایین دست قوس و نزدیک به دیواره خارجی متمرکز شده‌اند. نتایج این تحقیق با سایر نتایج انحنا نسبی قوس‌ها به دلیل تأثیر شیب متفاوت می‌باشد. (Qudsian et al. (2008) بر روی قوس با انحنا نسبی ۳ به این نتیجه رسیدند که تنش برشی حداکثر از مقطع

1 Coper

2 Chézy Coefficient



شکل ۸. توزیع تنش برشی بستر در تمامی نسبت‌های شعاع به عرض در دو عدد فرود الف) ۰/۰۵ و ب) ۰/۱

۴۰ تا موقعیت ۵۰ درجه نزدیک دیوار داخلی رخ می‌دهد ولی در تحقیق حاضر، موقعیت تنش برشی حداکثر از مقطع ۱۰ تا ۷۰ درجه نزدیک دیوار خارجی برقرار می‌باشد. (Anwar (1986) به این نتیجه رسید که الگوی سرعت در ورودی به شعاع قوس بستگی ندارد ولی در خروجی اثرات الگوی جریان مربوط به قوس باقی می‌ماند که با نتایج تحقیق حاضر مطابقت دارد. بر اساس نتایج به‌دست‌آمده از مطالعات (2014) Elyasi et al. پیرامون سرعت طولی جریان، در ابتدای قوس و برای همه نسبت‌های شعاع به عرض ۲ تا ۵، بیشینه سرعت در نزدیکی دیواره داخلی رخ می‌دهد. با نزدیک شدن به انتهای قوس، برای نسبت شعاع به عرض برابر با ۲ (تندترین قوس)، بیشینه سرعت همچنان در نزدیکی دیواره داخلی مشاهده می‌شود؛ اما برای سایر نسبت‌های شعاع به عرض، محل بیشینه سرعت به نواحی نزدیک به دیواره خارجی انتقال می‌یابد. در صورتی که در مطالعه حاضر برای قوس‌های ملایم، در نزدیکی دیواره خارجی بیشینه سرعت رخ داده است و در بخش‌های انتهایی به نزدیکی میانه عرض کانال منتقل می‌شود. همچنین در مقطع ورودی قوس (زاویه صفر درجه)، برای تمامی نسبت‌های شعاع ۲ تا ۵، از مطالعات (2014) Elyasi et al. در بستر افقی (بدون شیب) یک جریان عرضی به سمت دیواره خارجی قوس شکل می‌گیرد. در طول قوس، جریان‌های ثانویه به طور کامل تشکیل می‌شوند. در ملایم‌ترین قوس (با نسبت شعاع به عرض برابر با ۵)، یک جریان چرخشی دیگر نیز با جهت چرخش مخالف جریان ثانویه اصلی و ابعادی بسیار کوچک‌تر از آن به وجود می‌آید. در حالی که نتایج آزمایشگاهی اخیر



نشان می‌دهد در قوس ملایم صرفاً یک جریان ثانویه نزدیکی دیواره قوس داخلی رخ داده که با طی مسیر کانال توسعه یافته است.

سپاس‌گزاری

در پایان، از حمایت‌های مالی شورای پژوهشی دانشگاه شهید چمران اهواز کمال تشکر را داریم (GN: SCU.WH1403.43525).

"هیچ‌گونه تعارض منافع بین نویسندگان وجود ندارد"

References

- Abad, J. D., & Garcia, M. H. (2009). Experiments in a high-amplitude Kinoshita meandering channel: 2. Implications of bend orientation on bed morphodynamics. *Water Resources Research*, 45(2), 2008WR007017. <https://doi.org/10.1029/2008WR007017>
- Abhari, M. N., Ghodsian, M., Vaghefi, M., & Panahpur, N. (2010). Experimental and numerical simulation of flow in a 90 bend. *Flow Measurement and Instrumentation*, 21(3), 292–298. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0955598610000336>
- Akbari, M., & Vaghefi, M. (2017). Experimental investigation on streamlines in a 180° sharp bend. *Acta Scientiarum - Technology*, 39(4), 425–432. Scopus. <https://doi.org/10.4025/actascitechnol.v39i4.29032>
- Anwar, H. O. (1986). Turbulent structure in a river bend. *Journal of Hydraulic Engineering*, 112(8), 657–669. [https://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/\(ASCE\)0733-9429\(1986\)112:8\(657\)](https://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/(ASCE)0733-9429(1986)112:8(657))
- Blanckaert, K. (2011). Hydrodynamic processes in sharp meander bends and their morphological implications: PROCESSES IN SHARP MEANDER BENDS. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 116(F1), n/a-n/a. <https://doi.org/10.1029/2010JF001806>
- Blanckaert, K., & De Vriend, H. J. (2010). Meander dynamics: A nonlinear model without curvature restrictions for flow in open-channel bends. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 115(F4), 2009JF001301. <https://doi.org/10.1029/2009JF001301>
- Chooplou, A., & Vaghefi, M. (2019). Experimental study of the effect of displacement of vanes submerged at channel width on distribution of velocity and shear stress in a 180 degree bend. *Journal of Applied Fluid Mechanics*, 12(5), 1417–1428. https://www.jafmonline.net/article_847.html
- Deng, S., Xia, J., Zhou, M., Li, Z., Duan, G., Shen, J., & Blanckaert, K. (2021). Secondary Flow and Flow Redistribution in Two Sharp Bends on the Middle Yangtze River. *Water Resources Research*, 57(10). Scopus. <https://doi.org/10.1029/2020WR028534>
- Elyasi, S., Eghbalzadeh, A., Vaghefi, M., & Javan, M. (2014).» Research Note «Numerical Study of the Effect of Ratio of Radius to Width on Flow Pattern in a 90 Degree Bend. *Journal of Hydraulics*, 9(1), 59–68. <https://doi.org/10.30482/jhyd.2014.7915>
- Farag Boghdady, A., Tawfik Ahmed, M., El Sersawy, H., & Ghanem, A. (2023). Assessment of flow patterns and morphological changes in Nile river bends (Damietta branch). *ISH Journal of Hydraulic Engineering*, 29(1), 89–99. <https://doi.org/10.1080/09715010.2021.1985640>
- Gleason, C. J. (2015). Hydraulic geometry of natural rivers: A review and future directions. *Progress in Physical Geography: Earth and Environment*, 39(3), 337–360. <https://doi.org/10.1177/0309133314567584>
- Hu, P., & Yu, M. (2023). Numerical Investigation of Bed Shear Stress and Roughness Coefficient Distribution in a Sharp Open Channel Bend. *Journal of Applied Fluid Mechanics*, 16(8), 1560–1573. https://www.jafmonline.net/article_2243.html
- Kassem, A. A., & Chaudhry, M. H. (2002). Numerical Modeling of Bed Evolution in Channel Bends. *Journal of Hydraulic Engineering*, 128(5), 507–514. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9429\(2002\)128:5\(507\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(2002)128:5(507))
- Keevil, G. M., Peakall, J., & Best, J. L. (2007). The influence of scale, slope and channel geometry on the flow dynamics of submarine channels. *Marine and Petroleum Geology*, 24(6–9), 487–503. <https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2007.01.009>
- Knight, D. W., Omran, M., & Tang, X. (2007). Modeling Depth-Averaged Velocity and Boundary Shear in

- Trapezoidal Channels with Secondary Flows. *Journal of Hydraulic Engineering*, 133(1), 39–47. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9429\(2007\)133:1\(39\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(2007)133:1(39))
- Koch, C., & Chanson, H. (2005). *An experimental study of tidal bores and positive surges: Hydrodynamics and turbulence of the bore front*. <https://citeseerx.ist.psu.edu/document?repid=rep1&type=pdf&doi=29565abd73470b0a87b21399ced621cac863873f>
- Lazzarin, T., & Viero, D. P. (2023). Curvature-induced secondary flow in 2D depth-averaged hydro-morphodynamic models: An assessment of different approaches and key factors. *Advances in Water Resources*, 171. Scopus. <https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2022.104355>
- Li, Q., Ma, L., Yu, M., Wu, D., & Gong, L. (2023). Numerical simulation of effect of outer bank slope types on the hydraulic characteristics in sharp bends. *Shuikexue Jinzhan/Advances in Water Science*, 34(4), 599–609. Scopus. <https://doi.org/10.14042/j.cnki.32.1309.2023.04.012>
- Lin, J. T.-Y., Lacunza, E., Fernández, R., García, M. H., Rhoads, B. L., Best, J. L., LeRoy, J. Z., & Parker, G. (2024). Hydrodynamic processes of incipient meander chute cutoffs-implications for morphodynamics and depth-averaged modeling. *Authorea Preprints*. <https://essopenarchive.org/doi/full/10.22541/essoar.172286675.52992591>
- Liu, X., Xia, J., Deng, S., Zhou, M., Mao, B., & Blanckaert, K. (2024). Hydrodynamic and Morphological Adaptation of Two Consecutive Sharp Bends of the Middle Yangtze River to Upstream Damming. *Water Resources Research*, 60(1). Scopus. <https://doi.org/10.1029/2023WR034990>
- Mehraein, M., Ghodsian, M., & Najibi, S. A. (2014). Experimental investigation on the flow field around a spur dike in a 90° sharp bend. *Proc. Int. Conf. Fluv. Hydraul., RIVER FLOW*, 743–749. Scopus. <https://doi.org/10.1201/b17133-101>
- Nortek, A. (2001). Monitoring sediment concentration with acoustic backscattering instruments. *Nortek Technical Note*, 3, 1–5. <https://www.nortekgroup.com/assets/documents/Monitoring-sediment-concentration-with-acoustic-backscattering-instruments.pdf>
- Pradhan, B., Pradhan, S., & Khatua, K. K. (2024). Experimental investigation of three-dimensional flow dynamics in a laboratory-scale meandering channel under subcritical flow condition. *Ocean Engineering*, 302, 117557. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0029801824008941>
- Qudsian, Massoud., Waghefi, Mohammad., & Panahpour, Nima. (2008). Laboratory investigation of flow pattern in 90 degree arc. Fourth National Congress of Civil Engineering. <https://en.ivilica.com/doc/37656/>
- Safaripour, N., Vaghefi, M., & Mahmoudi, A. (2024). An experimental comparison of 3D velocity components around single and twin piers installed in a sharp bend under the influence of upstream implemented vanes. *Applied Water Science*, 14(5). Scopus. <https://doi.org/10.1007/s13201-024-02177-4>
- Safarzadeh, A., & Salehi Neyshabouri, S. a. A. (2005). Hydrodynamic Study of Turbulent Flow Pattern in River Bend Using 3D Numerical Model. *Iran-Water Resources Research*, 1(3), 65–77. https://www.iwrr.ir/article_15169_en.html
- Salajgheh, A., Salehi Neishabouri, A., Ahmadi, H., Mahdavi, M., & Qudsian, M. (2005). An Experimental Investigation of Three Dimensional Flow Pattern In River Bend. *Iranian Journal of Natural Resources*, 58(2). https://ijnr.ut.ac.ir/article_25490_en.html
- Salehi, M., & Strom, K. (2011). Using velocimeter signal to noise ratio as a surrogate measure of suspended mud concentration. *Continental Shelf Research*, 31(9), 1020–1032. <https://doi.org/10.1016/j.csr.2011.03.008>
- Shaheed, R., Mohammadian, A., & Yan, X. (2021). A review of numerical simulations of secondary flows in river bends. *Water*, 13(7), 884. <https://www.mdpi.com/2073-4441/13/7/884>
- Shaker, E., & Kashefipour, M. (2015). Experimental Investigation on the Effect of Length and Angle of Groynes on Velocity and Shear Stress Distribution in a 90 Degree Bend. *Irrigation Sciences and Engineering*, 38(3), 1–12. <https://doi.org/10.22055/jise.2015.11470>
- Sharma, A., Lakkaraju, R., & Atta, A. (2023). Influence of channel bend angle on the turbulent statistics in



- sharply bent channel flows. *Physics of Fluids*, 35(5).
<https://pubs.aip.org/aip/pof/article/35/5/055102/2887665>
- Smirnov, E., Panov, D., Ris, V., & Goryachev, V. (2020). Towards DES in CFD-based optimization: The case of a sharp U-bend with/without rotation. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 34(4), 1557–1566. Scopus. <https://doi.org/10.1007/s12206-020-0318-x>
- Sozopor, A., Shafai, M., & Sheikh Rezazadeh Nikou, N. (2015). Experimental Investigation of the Effects of Height of Bed Roughness on Shear stress and the Strength of Vortex in a 90 Degree Sharp Rectangular Bend. *Iranian Water Researches Journal*, 9(1), 81–88. https://iwrij.sku.ac.ir/article_11035_en.html
- You, R., Liu, Z., Li, H., Tao, Z., & Shi, J. (2023). Experimental and numerical study of flow field structure in U-shaped channels with different bend sections. *Physics of Fluids*, 35(4).
<https://pubs.aip.org/aip/pof/article/35/4/045115/2883390>
- You, R., Tao, Z., Liu, Z., Shi, J., & Li, H. (2023). Experimental and numerical study of flow field structure in U-shaped channels with different bend sections. *Physics of Fluids*, 35. <https://doi.org/10.1063/5.0142486>
- Wang, J., Chen, L., Zhang, W., & Chen, F. (2019). Experimental study of point bar erosion on a sand-bed sharp bend under sediment deficit conditions. *Sedimentary Geology*, 385, 15–25. Scopus. <https://doi.org/10.1016/j.sedgeo.2019.03.008>