

## Laboratory investigation of the effect of mid-channel bars on the velocity distribution and flow energy loss

Razieh Karimidemneh<sup>1</sup>, Mehdi Meftah Halaghi<sup>\*2</sup>, Amir Ahmad Dehghani<sup>3</sup>,  
Abdolreza Zahiri<sup>4</sup>, Esmail Kordi<sup>5</sup>

1. Ph.D. Student in Hydraulic Structures, Dept. of Water Engineering, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, Iran. E-mail: [r.karimi1017@yahoo.com](mailto:r.karimi1017@yahoo.com)
2. Corresponding Author, Associate Prof., Dept. of Water Engineering, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, Iran. E-mail: [meftah@gau.ac.ir](mailto:meftah@gau.ac.ir)
3. Professor, Dept. of Water Engineering, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, Iran. E-mail: [a.dehghani@gau.ac.ir](mailto:a.dehghani@gau.ac.ir)
4. Associate Prof., Dept. of Water Engineering, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, Iran. E-mail: [zahiri@gau.ac.ir](mailto:zahiri@gau.ac.ir)
5. Assistant Prof., Dept. of Civil Engineering, Mirdamad High Educational Institute, Gorgan, Iran, Iran. E-mail: [esmaeilkordi@gmail.com](mailto:esmaeilkordi@gmail.com)

### Article Info

**Article type:**  
Research Full Paper

**Article history:**  
Received: 12.18.2023  
Revised: 01.15.2024  
Accepted: 01.22.2024

**Keywords:**  
Energy Loss,  
Flow Resistance,  
Mid Channel Bar,  
Sedimentation,  
Velocity Distribution

### ABSTRACT

**Background and Objectives:** One of the natural structures in rivers is mid-channel bar that is created due to shear stress decreasing and sediment deposition in the central part of river. Bifurcation and erosion are seen in rivers because of mid-channel bar existence. Also, energy loss is the other impact of mid bars that would intensify the deposition in rivers. Mid-channel bar is known as one of the most important aquatic habitats, so there is necessity to find more information on flow structures around it in operation processes and river restoration. In this research, the flow structures around mid-channel bars are assessed as laboratory study.

**Materials and Methods:** Three mid-channel bars were made in the shape of rhombic, ellipse and lemniscate in this research. These shapes are common in natural alluvial rivers. This study was established in a laboratory flume by length of 9 meter, and width and height of 0.4 meter. The bed slope was fixed of 0.0007. This flume was located in the water and sediment research laboratory in Gorgan University of agricultural sciences and natural resources. Three-dimensional velocity of flow was collected using an electromagnetic current velocity sensor with a frequency of 30 Hz in 39 data points. The flow discharge was fixed as 4.5 liter per seconds using a frequency flow meter. The flow regime was subcritical and turbulent in all examinations.

**Results:** Findings showed that bar shapes have different impacts on flow structures and amounts of energy losses. Comparison between plots implied that there are similar conditions in elliptical and lemniscate shapes but a little different in rhombic case. The variation range of transverse velocity was between 0.4 to 1.6 times of average value for all shapes. According to the results, the existence of elliptical bar led to significant tolerance in longitudinal velocity in all axes (between 0.5 to 1.6 times the average in left and right axes and 0.2 to 1.4 times the average value in central line), but these tolerances were not significant for lemniscate and rhombic bars (between 0.8 to 1.2 times the average value in left and right axes and between 0.8 to 1.4 times the average value for central axis). The

---

variation of vertical velocity in middle axis presented the maximum decrease before facing elliptical bar and similar conditions for this axis in facing with lemniscate bar, except that this decrease is started exactly at facing point here. In addition to the values of the velocity components, the direct effect of encountering bars should also be sought on the values of the flow energy as a cumulative indicator of the erosive power of the flow. A more detailed analysis of the graphs shows left that in the and right axes, encountering the elliptical bar has led to an increase in the relative energy of the current by 1.4 times the average, and after passing through the bar, the energy load has decreased to less than the average value. But in the middle axis, the presence of the bar reduced the relative energy of the flow to 0.6 average value and after passing through the bar, this component has an increasing trend.

**Conclusion:** Exposure to the elliptical bar led to the greatest changes in the relative values of the triple velocity components, compared to the rhombic and lemniscate bars. Also, the changes in the total energy load caused by the presence of two rhombic and lemniscate bars are insignificant, but similar to the changes in all three velocity components, transverse, longitudinal, and vertical, the elliptical bar led to significant changes in the relative values of the total energy load along the channel.

---

Cite this article: Karimidemneh, Razieh, Meftah Halaghi, Mehdi, Dehghani, Amir Ahmad, Zahiri, Abdolreza, Kordi, Esmaeil. 2024. Laboratory investigation of the effect of mid-channel bars on the velocity distribution and flow energy loss. *Journal of Water and Soil Conservation*, 31 (1), 93-112.



© The Author(s).

DOI: 10.22069/jwsc.2024.22010.3700

Publisher: Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources

---

## بررسی آزمایشگاهی تأثیر پشته‌های رسوبی میانی بر توزیع سرعت و افت انرژی جریان

راضیه کریمی دمنه<sup>۱</sup>، مهدی مفتاح هلقی<sup>۲\*</sup>، امیراحمد دهقانی<sup>۳</sup>، عبدالرضا ظهیری<sup>۴</sup>، اسماعیل کردی<sup>۵</sup>

۱. دانشجوی دکتری سازه‌های آبی، گروه مهندسی آب، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران. رایانامه: [r.karimi1017@yahoo.com](mailto:r.karimi1017@yahoo.com)
۲. نویسنده مسئول، دانشیار گروه مهندسی آب، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران. رایانامه: [mefthah@gau.ac.ir](mailto:mefthah@gau.ac.ir)
۳. استاد گروه مهندسی آب، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران. رایانامه: [a.dehghani@gau.ac.ir](mailto:a.dehghani@gau.ac.ir)
۴. دانشیار گروه مهندسی آب، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران. رایانامه: [zahiri@gau.ac.ir](mailto:zahiri@gau.ac.ir)
۵. استادیار گروه مهندسی عمران، مؤسسه آموزش عالی میرداماد گرگان، گرگان، ایران. رایانامه: [esmaeilkordi@gmail.com](mailto:esmaeilkordi@gmail.com)

اطلاعات مقاله	چکیده
نوع مقاله: مقاله کامل علمی-پژوهشی	سابقه و هدف: پشته‌های رسوبی میانی از جمله ساختارهای طبیعی در آبراهه‌ها و رودخانه‌ها هستند که در اثر کاهش تنش برشی و رسوب‌گذاری در مرکز رودخانه ایجاد شده و موجب دوشاخه شدن آبراهه‌ها و افزایش فرسایش جانبی در دو ساحل راست و چپ رودخانه خواهد شد. هم‌چنین، افت انرژی ناشی از وجود پشته‌ها، از دیگر عواملی است که موجب تشدید رسوب‌گذاری در رودخانه می‌شود. این پشته‌ها، به‌عنوان زیستگاه آبزیان در رودخانه، از اهمیت به‌سزایی برخوردارند و شناخت دقیق سازوکار جریان پیرامون آن‌ها، از موارد مهم در فرایندهای بهره‌برداری و احیای رودخانه‌هاست. در این پژوهش، الگوی جریان پیرامون پشته‌های رسوبی به‌صورت آزمایشگاهی موردبررسی و ارزیابی قرار گرفته است.
واژه‌های کلیدی: افت انرژی، پشته‌های رسوبی میانی، توزیع سرعت، رسوب‌گذاری، مقاومت جریان	مواد و روش‌ها: در این پژوهش، سه پشته به شکل‌های لوزی، بیضی و گوه‌ای که از نمونه‌های متداول پشته‌ها در رودخانه‌های آبرفتی طبیعی هستند، در یک کانال آزمایشگاهی به طول ۹ و عرض و ارتفاع ۰/۴ متر، با شیب کف ۰/۰۰۰۷ در آزمایشگاه تحقیقات آب و رسوب دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، ساخته و استفاده شد. سرعت در سه راستای عرضی، طولی و قائم با استفاده از دستگاه سرعت‌سنج الکترومغناطیس با فرکانس ۳۰ هرتز، در ۳۹ نقطه برداشت شد. دبی به کمک دستگاه دبی‌سنج فرکانسی در تمام آزمایش‌ها، ۴/۵ لیتر بر ثانیه تنظیم شد و رژیم جریان در تمامی آزمایشات، زیربحرانی و آشفته بود.
	یافته‌ها: یافته‌ها نشان داد شکل پشته‌ها در سازوکار جریان و میزان افت انرژی، تأثیرات متفاوتی دارد. بررسی و مقایسه نمودارها نشان‌دهنده شرایط تقریباً مشابه برای پشته‌های بیضی و گوه‌ای

اما قدری متفاوت برای پشته لوزی است. با وجود اختلاف ساختار تغییرات مؤلفه عرضی سرعت در مواجهه با پشته‌های بیضی، گوه‌ای و لوزی، در تمامی موارد، دامنه تغییرات بین ۰/۴ تا ۱/۶ برابر مقدار میانگین است. مطابق نتایج به دست آمده، حضور پشته بیضی منجر به نوسانات قابل توجه مؤلفه طولی سرعت در هر سه محور (بین حدود ۰/۵ تا ۱/۶ برابر مقدار میانگین در محورهای چپ و راست و بین ۰/۲ تا ۱/۴ برابر مقدار میانگین در محور وسط) می‌شود؛ اما برای پشته‌های گوه‌ای و لوزی، این نوسانات در تمامی محورها چندان چشمگیر نیست (بین ۰/۸ تا ۱/۲ برابر مقدار میانگین در محورهای چپ و راست و بین ۰/۸ تا ۱/۴ برابر مقدار میانگین برای محور وسط). اما تغییرات این مؤلفه در مواجهه با پشته‌های گوه‌ای و بیضی بیش‌تر و در هر سه محور قابل توجه (بین ۰/۵ تا ۲/۳ برابر مقدار میانگین) است. تغییرات مؤلفه قائم سرعت در محور وسط نشان‌دهنده بیش‌ترین کاهش قبل از مواجهه با پشته بیضی و شرایطی مشابه برای همین محور در مواجهه با پشته گوه‌ای است با این تفاوت که آغاز این کاهش منطبق بر نقطه برخورد پشته گوه‌ای است. تأثیر مستقیم مواجهه با پشته‌های رسوبی را علاوه بر مقادیر مؤلفه‌های سرعت، باید بر مقادیر انرژی جریان به‌عنوان معرف تجمیعی قدرت فرساینده‌گی جریان نیز جستجو نمود. بررسی جزئی‌تر نمودارها نشان می‌دهد که در محورهای چپ و راست، مواجهه با پشته بیضی منجر به افزایش انرژی نسبی جریان به‌اندازه ۱/۴ برابر میانگین شده و پس از عبور از پشته، بار انرژی به کم‌تر از مقدار میانگین کاهش یافته است. اما در محور وسط، وجود پشته، انرژی نسبی جریان را به ۰/۶ مقدار میانگین کاهش داده و پس از عبور از پشته، این مؤلفه روند افزایشی داشته است.

**نتیجه‌گیری:** مواجهه با پشته بیضی منجر به بیش‌ترین تغییرات در مقادیر نسبی مؤلفه‌های سه‌گانه سرعت، در مقایسه با دوپشته لوزی و گوه‌ای شد. هم‌چنین، تغییرات بار انرژی کل ناشی از حضور دوپشته لوزی و گوه‌ای ناچیز بوده ولی مشابه با تغییرات سرعت در هر سه مؤلفه عرضی، طولی و قائم، پشته بیضی منجر به تغییرات قابل توجه در مقادیر نسبی بار کل انرژی در طول کانال شد.

**استناد:** کریمی دمنه، راضیه، مفتاح هلقی، مهدی، دهقانی، امیراحمد، ظهیری، عبدالرضا، کردی، اسماعیل (۱۴۰۳). بررسی آزمایشگاهی تأثیر پشته‌های رسوبی میانی بر توزیع سرعت و افت انرژی جریان. پژوهش‌های حفاظت آب و خاک، ۳۱ (۱)، ۹۳-۱۱۲.

DOI: 10.22069/jwsc.2024.22010.3700



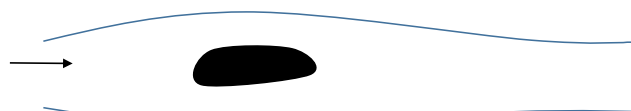
© نویسندگان.

ناشر: دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان

### مقدمه

فرسایش و رسوب‌گذاری در رودخانه‌ها، علاوه بر ایجاد تغییرات در بستر رودخانه، موجب تغییر در عرض رودخانه نیز می‌شود (۱). فرسایش در ساحل خارجی رودخانه، موجبات افزایش عرض بستر رودخانه را فراهم نموده، منجر به کاهش تنش برشی و در نهایت رسوب‌گذاری در مرکز رودخانه خواهد شد (۲) و این امر خود، تشکیل پشته‌های رسوبی میانی<sup>۱</sup> را به دنبال خواهد داشت. تشکیل پشته‌های رسوبی میانی را می‌توان حاصل برهم‌کنش بین جریان و بار رسوب در هر دو فاز بار بستر و بار معلق

به حساب آورد (۱). پشته‌ها، سازندهایی یکپارچه در آبراهه و بستر رودخانه محسوب می‌شوند (۳) که با گذشت زمان، باعث تشدید فرسایش در دو ساحل چپ و راست رودخانه خواهند شد. این فرایند، حاصل جدایی جریان در مواجهه با پشته و در نتیجه، دوشاخه شدن آبراهه در طرفین آن است که خود موجب افزایش عرض رودخانه می‌گردد. حاصل این امر، مشهود شدن تغییرات عرضی ناشی از توسعه پشته‌های رسوبی میانی است (۴، ۵).



شکل ۱- طرح شماتیک یک پشته رسوبی میانی.








Figure 1. Schematic sketch of a mid-channel bar.

از نظر ساختار هندسی، پشته‌ها به تلماسه‌ها شباهت دارند اما از نظر مقیاس، بزرگ‌ترند. پشته‌های رسوبی میانی، معمولاً در قسمت میانی کانال تشکیل شده و در عین حال، امکان جابه‌جایی دارند (۶)، هر چند ممکن است تا دهه‌ها در مکان اولیه خود باقی‌مانده و ماندگار فرض شوند (۷). این پشته‌ها، در تمامی رودخانه‌ها وجود داشته و از هر دو منظر زیستی و هیدرولیکی مهم و شاخصی برای تعیین سلامت و انرژی سیستم هستند (۸). یافته‌ها نشان می‌دهد بیش‌ترین تنوع زیستی گونه‌های آبی، پیرامون جزایر در رودخانه‌های

شاخه‌ای شکل می‌گیرد (۸)، از این رو، هرگونه اقدام مدیریتی در ساماندهی رودخانه‌ها که موجب کاهش شکل‌گیری پشته‌های رسوبی و جزایر آبرفتی باشد، اکوسیستم و حیات‌وحش منطقه را به مخاطره خواهد انداخت (۷). بنابراین، حفاظت از پشته‌های رسوبی به دلیل حفاظت از زیست‌بوم گونه‌های آبی، مورد توجه قرار گرفته است (۹). مطابق جدول ۱، پشته‌های رسوبی دارای شکل‌های مختلفی هستند که در سه دسته ساده، زاویه‌ای و نامنظم تقسیم‌بندی می‌شوند (۷).

جدول ۱- طبقه‌بندی شکل‌های متداول پشته‌های رسوبی.

Table 1. Classification of common shapes of mid-channel bars.

شکل Shape	نام Name	طبقه‌بندی Class
	گوه‌ای Lemniscate	ساده Streamlined
	بیضی Elliptical	
	عدسی Lenticular	
	نیمکره Semi-Circular	
	مثلثی Triangular	زاویه‌ای Angular
	لوزی Rhombic	نامنظم Irregular
		

و کاهش آن در پایین‌دست خواهد شد. هم‌چنین، با افزایش تعداد لوله‌ها، عدد رینولدز جریان نیز کاهش می‌یابد اما تغییرات ضریب درگ از نظم خاصی پیروی نمی‌کند. نتایج کار وی هم‌چنین نشان داد بیش‌ترین میزان افت انرژی در نسبت طول به عرض برابر ۳ در هندسه پشته‌ها مشاهده می‌شود (۱۱). رودخانه‌های شریانی و پشته‌های رسوبی، از متداول‌ترین الگوهای رودخانه‌ای در طبیعت می‌باشند، بنابراین شناخت جامع و یکپارچه خصوصیات و ساختار سه‌بعدی جریان پیرامون پشته‌های رسوبی در رودخانه‌های شریانی، از مسائل مهم در مهندسی رودخانه، مطالعات رسوب و محیط‌زیست است. اما با توجه به ساختار پیچیده رودخانه‌های شاخه‌ای، تاکنون مطالعات کمی در این زمینه صورت گرفته است که بیانگر لزوم مطالعه بیش‌تر در این راستا می‌باشد (۱۲، ۱۳). ازجمله مطالعات موجود می‌توان به یافته‌های ریک (۲۰۰۵) و

براساس پژوهش وارد و همکاران (۱۹۹۹)، پشته‌ها و جزایر رسوبی، عنصر کلیدی بهره‌وری بهینه از اکوسیستم رودخانه‌ها هستند (۱۰) و از آن‌جا که رودخانه‌ها و پشته‌های رسوبی بر یکدیگر تأثیر دارند، هرگونه فرایند احیای رودخانه‌ها، باید دربرگیرنده شناخت پشته‌های رسوبی و جزایر آبرفتی باشد (۷).

پشته‌های رسوبی در کاهش انرژی جریان نیز نقش دارند. یک جریان سیلابی حاوی آب و رسوب، در مواجهه با پشته، بخشی از انرژی خود را از دست خواهد داد. در پژوهشی که توسط ریک (۲۰۰۵) انجام شد، تأثیرات ابعاد پشته رسوبی بر خصوصیات جریان آب زلال، مورد مطالعه قرار گرفت. مشاهدات نشان‌دهنده تأثیر شکل پشته رسوبی تشکیل شده، بر خصوصیات جریان بود. براساس یافته‌ها، افزایش تعداد لوله‌ها موجب افزایش تنش برشی در بالادست

هونا و همکاران (۲۰۰۹) اشاره نمود که تأثیر پشته‌های رسوبی بر کاهش انرژی جریان و تغییر ساختار جریان بر اثر تغییرات شکل پشته رسوبی را تأیید می‌نماید (۱۱ و ۱۳). در این پژوهش، الگوی توزیع سرعت سه‌بعدی و افت انرژی پیرامون سه‌پشته رسوبی به شکل‌های لوزی، بیضی و گوه‌ای که از نمونه‌های معمول در رودخانه‌های آبرفتی طبیعی می‌باشند، مورد بررسی و ارزیابی قرار گرفته است.

### مواد و روش‌ها

آزمایش‌های این پژوهش در یک کانال آزمایشگاهی به طول ۹ متر و عرض و ارتفاع ۴۰ سانتی‌متر و با شیب کف ۰/۰۰۰۷، در آزمایشگاه تحقیقات آب و رسوب دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، انجام شد. جنس دیواره‌ها از پلکسی‌گلاس و بستر و بدنه کانال، فلزی بود. در قسمت ورودی کانال، مخزنی به طول یک متر

به‌منظور جلوگیری از آشفتگی جریان وجود داشت. اندازه‌گیری عمق جریان توسط یک ترازسنج دیجیتال با دقت ۰/۰۱ میلی‌متر انجام شد. دبی جریان به کمک دستگاه دیجیتال تغییر فرکانس پمپ تنظیم شد و در تمامی آزمایش‌ها، معادل ۴/۵ لیتر بر ثانیه تنظیم گردید. عملکرد این دستگاه به‌گونه‌ای است که تغییر فرکانس جریان ورودی به پمپ منجر به تغییر سرعت گردش پروانه شده و این امر موجب تغییر دبی خروجی از پمپ می‌شود. بر این اساس تنظیم دبی با استفاده از تنظیم فرکانس جریان الکتریکی ورودی به پمپ به کمک یک پتانسیومتر، صورت می‌گیرد. سرعت جریان سطحی نیز در سه محور  $x$  در راستای عرض کانال،  $y$  در راستای جریان و  $z$  در راستای قائم، با استفاده از دستگاه سرعت‌سنج الکترومغناطیس<sup>۱</sup> JFE Advantech Co. Ltd. با فرکانس ۳۰ هرتز، اندازه‌گیری شد. محدوده مشخصات جریان در جدول ۲ ارائه شده است.

جدول ۲- محدوده مشخصات جریان.

Table 2. The range of flow characteristics.

محدوده Range	واحد Unit	مشخصه Characteristic
19-21	سانتی‌متر cm	عمق جریان Flow Depth
< 0.1	-	عدد فرود Froud Number
25000 - 45000	-	عدد رینولدز Reynolds Number

شد (۱۱ و ۱۴). بنابراین پشته‌ها با ابعاد  $۷ \times ۱۳ \times ۴۰$  سانتی‌متر، به‌ترتیب معادل با ضلع بزرگ، ضلع کوچک و ارتفاع، از جنس بتن ساخته شدند و در آزمایش‌ها مورد استفاده قرار گرفتند (شکل ۲).

پشته‌های رسوبی در این پژوهش، به شکل‌های لوزی، بیضی و گوه ساخته شدند که متداول‌ترین شکل‌های موجود در طبیعت می‌باشند (۷ و ۹). محدوده تغییرات طول به عرض پشته‌های رسوبی با توجه به نتایج پژوهش‌های پیشین، ۳ در نظر گرفته

1- Electromagnetic Current Velocity Sensor



شکل ۲- هندسه پشته‌های مورد استفاده شامل بیضی (بالا)، گوه‌ای (وسط) و لوزی (پایین).

Figure 2. The geometry of used bars including elliptical (up), lemniscate (middle), and rhombic (down).

و  $Fr$  عدد فرود جریان می‌باشد (۱۵، ۱۶، ۱۷). این اندازه‌گیری‌ها در ۱۳ مقطع عرضی با فواصل ۱۰ سانتی‌متر از هم (در راستای طولی و عرضی) و در سه محور چپ، وسط و راست جریان انجام شد، بر این اساس در ۳۹ نقطه، اندازه‌گیری مؤلفه‌های سرعت و عمق صورت گرفت. در پایاب کانال نیز، یک سرریز متحرک تعبیه شده بود که در تمام آزمایش‌ها ثابت نگاه داشته شد.

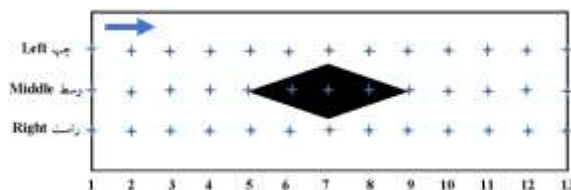
### نتایج و بحث

شکل ۳ موقعیت نقاط اندازه‌گیری عمق و سرعت را به صورت شماتیک ارائه می‌دهد. اندازه‌گیری مقادیر سرعت در فاصله ۰/۶ عمق از سطح جریان انجام شد که بیانگر سرعت متوسط جریان است (۱۸).

به منظور حصول اطمینان از تأمین شرایط هیدرولیکی جریان روباز و توسعه یافتگی جریان، با توجه به مشخصات جریان در کانال، براساس رابطه ۱، پشته در فاصله ۴ متری از ابتدای کانال قرار داده شد و پس از تنظیم دبی و گذشت مدت زمان لازم برای تثبیت شرایط و ماندگار شدن جریان، محدوده انجام آزمایش‌ها و اندازه‌گیری سه بعدی سرعت (شامل مؤلفه‌های عرضی  $V_x$ ، طولی  $V_x$  و قائم  $V_z$ ) و عمق جریان، در فاصله ۴۰ سانتی‌متر از بالادست و پایین دست پشته، انتخاب گردید.

$$L_e/h = 76 - 0.0001 Re/Fr \quad (1)$$

که در آن،  $L_e$  فاصله توسعه یافتگی از ابتدای کانال (متر)،  $h$  عمق جریان (متر)،  $Re$  عدد رینولدز جریان



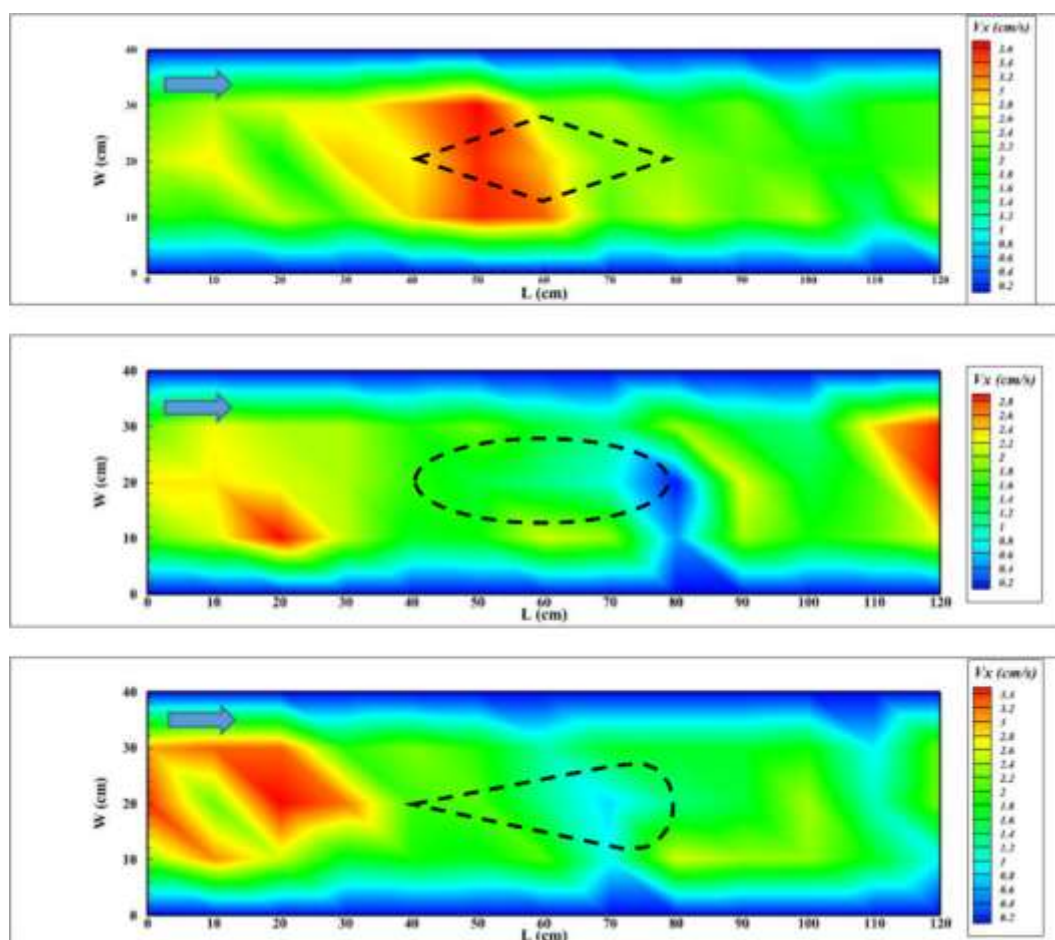
شکل ۳- نقاط اندازه‌گیری سرعت سه بعدی و عمق جریان.

Figure 3. 3D velocity and flow depth measurement points.



ارائه شده است. از آنجاکه تمامی پشته‌ها در جریان، حالت مستغرق داشته و جریان از روی آن‌ها در حال عبور است، موقعیت پشته‌ها در این شکل‌ها، به صورت خط‌چین نشان داده شده است. در این نمودارها، منظور از  $L$  بازه طولی انجام آزمایش‌ها و  $W$  عرض کانال می‌باشد.

در ابتدا، به منظور دستیابی به تصویر کلی تغییرات ساختار مؤلفه‌های سه‌گانه سرعت جریان در مواجهه با پشته‌های مختلف، از نمودارهای هم‌سرعت برای نمایش یکپارچه تغییرات مؤلفه‌ها، در مقاطع عرضی و طولی، استفاده شد. این نمودارها به همراه موقعیت مکانی پشته‌های مورد آزمایش در شکل‌های ۴ تا ۶



شکل ۴- نمودارهای هم‌سرعت مؤلفه عرضی سرعت برای پشته‌های لوزی (بالا)، بیضی (وسط) و گوه‌ای (پایین).

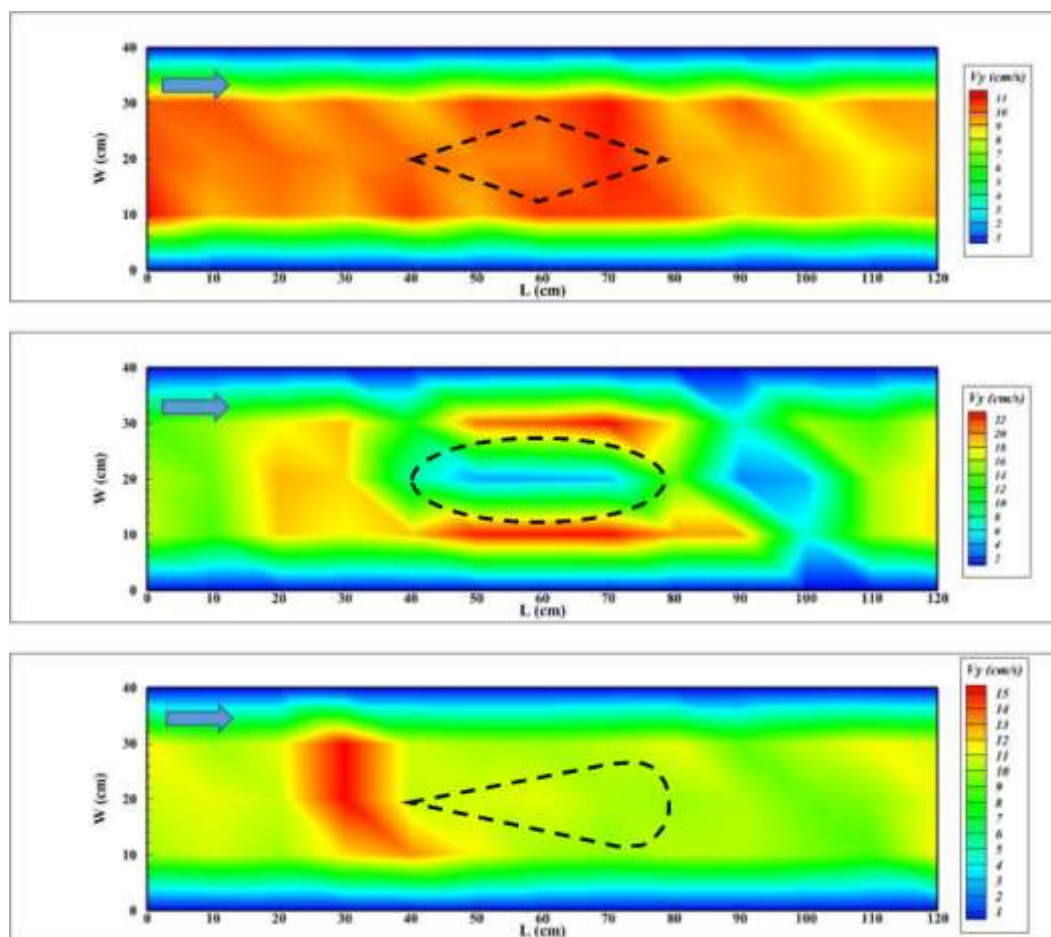
Figure 4. Contour plots of transverse component of the velocity for rhombic (top), elliptical (middle), and lemniscate (bottom) bars.

مقدار قبلی بازمی‌گردد. اما در مورد پشته‌های بیضی و گوه‌ای، نه تنها چنین افزایشی مشاهده نمی‌شود بلکه در مقطع انتهایی پشته بیضی، ناگهان کاهش چشمگیر سرعت نیز اتفاق می‌افتد که این خود می‌تواند به دلیل افت ایجادشده در اثر بازشدگی مسیر جریان باشد. در

تغییرات مؤلفه عرضی سرعت در مواجهه با پشته‌های مختلف در شکل ۴، ساختارهای متفاوتی را نشان می‌دهد. در پشته لوزی، در مقطع برخورد، مقدار مؤلفه عرضی سرعت از ۲ به ۳/۵ افزایش یافته و پس از مقطع شماره ۸ (وسط پشته) به سرعت به

بیضی و گوه‌ای را در خصوص تغییرات مؤلفه عرضی سرعت مشابه و متفاوت با رفتار پشته لوزی برآورد نمود.

مورد پشته گوه‌ای نیز از کناره‌های پشته به سمت مرکز، کاهش سرعت ناچیزی وجود دارد که پس از عبور از آن نقطه، مؤلفه عرضی سرعت مجدداً به همان مقدار قبل بازمی‌گردد. در مجموع می‌توان رفتار پشته‌های

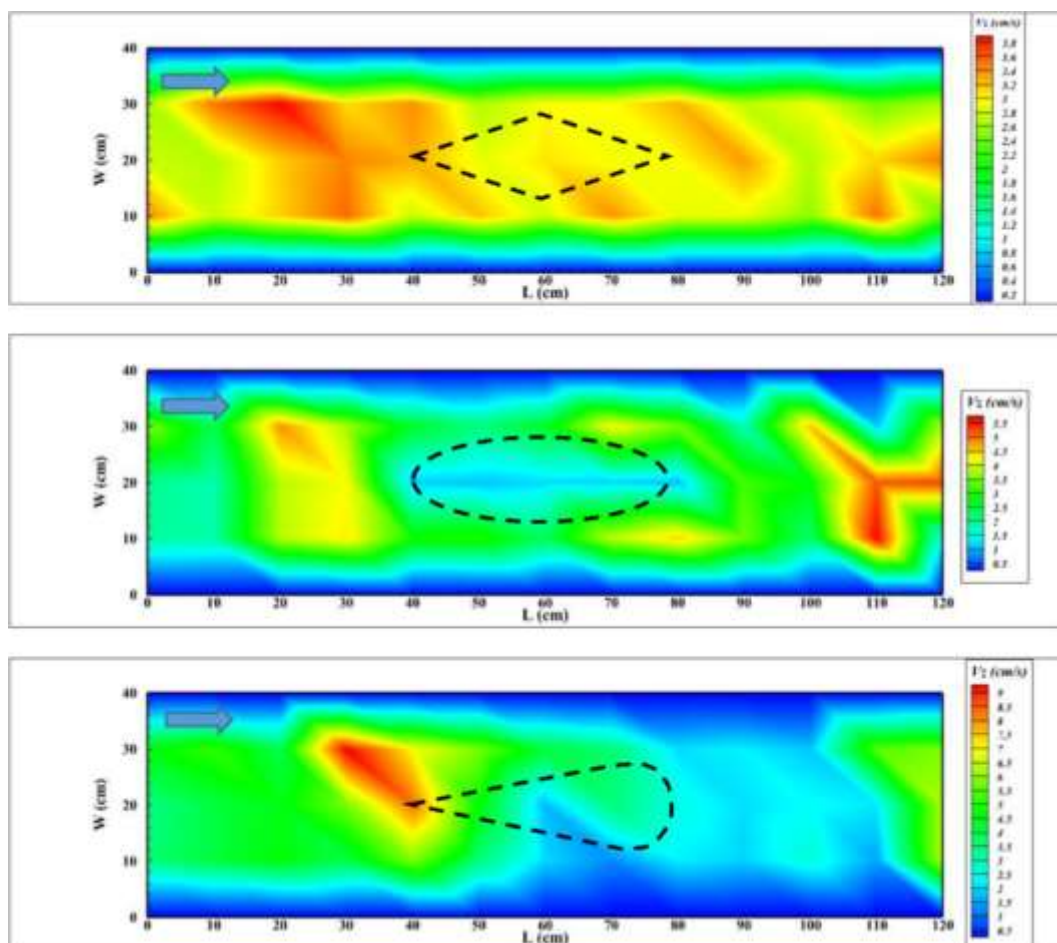


شکل ۵- نمودارهای هم‌سرعت مؤلفه طولی سرعت برای پشته‌های لوزی (بالا)، بیضی (وسط) و گوه‌ای (پایین).

Figure 5. Contour plots of longitudinal component of the velocity for rhombic (top), elliptical (middle), and lemniscate (bottom) bars.

مجدداً روند کاهشی حاکم بوده و جریان به سرعت قبلی خود بازگشته است. حضور پشته گوه‌ای نیز باعث افزایش مؤلفه طولی سرعت در فاصله ۳۰ سانتی‌متری تا شروع پشته و سپس کاهش آن شده است. در مجموع می‌توان رفتار پشته‌های لوزی و گوه‌ای را در خصوص تغییرات مؤلفه طولی سرعت مشابه و متفاوت با رفتار پشته بیضی برآورد نمود.

مقدار کلی مؤلفه طولی سرعت در آزمایش مربوط به پشته لوزی کم‌تر از آزمایش‌های مربوط به بیضی و گوه‌ای است. اما بررسی تغییرات این مؤلفه در هر سه شکل، نشان از حفظ شرایط متعادل جریان با اندکی تغییرات جزئی دارد. تنها در جریان مواجه شده با پشته بیضی‌شکل، مقدار مؤلفه طولی سرعت در کناره‌های پشته افزایش یافته و پس از گذر از پشته،



شکل ۶- نمودارهای هم‌سرعت مؤلفه قائم سرعت برای پشته‌های لوزی (بالا)، بیضی (وسط) و گوه‌ای (پایین).

Figure 6. Contour plots of vertical component of the velocity for rhombic (top), elliptical (middle), and lemniscate (bottom) bars.

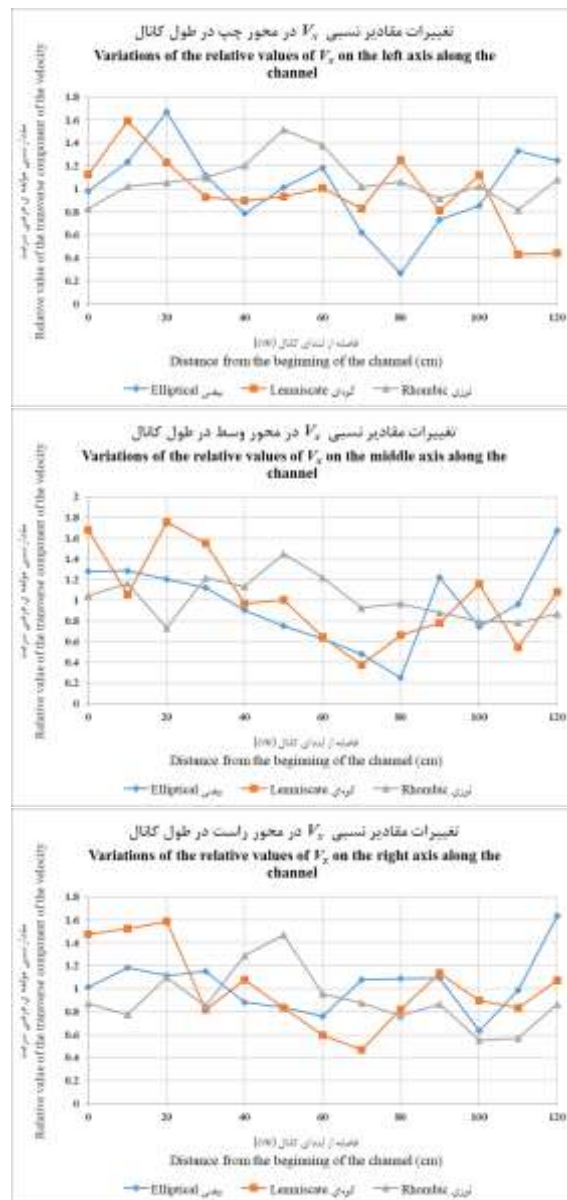
واضح در مواجهه با پشته‌های لوزی و گوه‌ای دچار تغییرات شده، ولی تأثیر پشته بیضی‌شکل بر روی آن زیاد نیست.

به‌منظور تحلیل بهتر تغییرات سرعت در طول جریان با تمرکز بر جزئیات بیشتر، می‌توان از ترسیم مقادیر مؤلفه‌های سه‌گانه عرضی، طولی و قائم سرعت در محورهای چپ، وسط و راست استفاده نمود. لازم به ذکر است آزمایش‌های مربوط به اندازه‌گیری این مقادیر به‌صورت مستقل برای پشته‌های مختلف انجام شده است و به‌منظور یکسان‌سازی شرایط و حذف اثر سایر عوامل که ممکن است بر مقادیر سرعت برداشت‌شده در نقاط یکسان اثرگذار باشند، از مقدار

نگاه کلی به مقادیر مؤلفه قائم سرعت باید با توجه به این نکته باشد که میانگین کلی این سرعت برای آزمایش پشته گوه‌ای بیش‌تر از آزمایش‌های دو پشته دیگر بوده است. اما با تمرکز بر جزئیات رفتاری این مؤلفه، نوسانات افزایشی و کاهشی در طی بازه برخورد با پشته لوزی مشهود است. این مؤلفه در برخورد با پشته بیضی، ثابت بیش‌تری دارد و مواجه‌شدن با پشته گوه‌ای منجر به افزایش ناگهانی سرعت در محور وسط شده است. در نقاط انتهایی و پس از عبور از پشته گوه‌ای نیز جریان دچار کاهش شدید مقدار مؤلفه قائم سرعت شده است. در مجموع، مشاهدات نشان می‌دهد که مؤلفه قائم سرعت به‌طور

نسبی سرعت به جای مقدار سرعت، استفاده شد. این مقدار از تقسیم مقدار مؤلفه سرعت در هر نقطه بر میانگین تمام مقادیر اندازه‌گیری شده در آن آزمایش به دست می‌آید. بدین ترتیب، تغییرات مؤلفه سرعت در آن نقطه نسبت به شرایط کلی حاکم بر مقادیر سرعت سنجیده شده و بنابراین، با حذف اثر سایر عوامل، امکان استخراج تأثیر حضور پشته‌ها بر تغییرات

سرعت در طول کانال فراهم می‌گردد. نحوه تغییرات مقادیر نسبی مؤلفه‌های سرعت در طول کانال در نمودارهای مجزا به ترتیب در شکل‌های ۷ تا ۹ ترسیم گردیده است. در هر نمودار، مقادیر مربوط به قرارگیری پشته‌های بیضی، گوه‌ای و لوزی به صورت خطوط مجزا ارائه شده است.



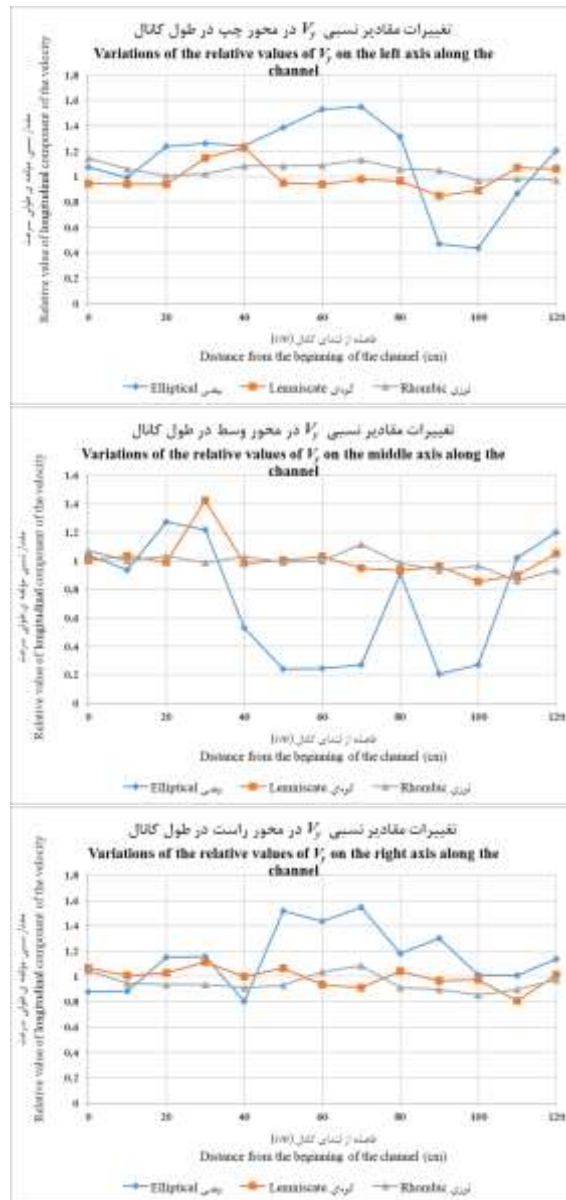
شکل ۷- تغییرات مقادیر نسبی مؤلفه عرضی سرعت در طول کانال در مواجهه با پشته‌های مختلف بیضی، گوه‌ای و لوزی.

Figure 7. Variations in the relative values of the transverse component of the velocity along the channel in the face of different elliptical, lemniscate, and rhombic bars.

پشته‌های بیضی، گوه‌ای و لوزی، در تمامی موارد، دامنه تغییرات بین  $0/4$  تا  $1/6$  برابر مقدار میانگین است.

مؤلفه طولی سرعت از نظر اندازه دارای مقادیری در حدود  $10$  برابر مؤلفه عرضی است. بررسی تغییرات مقادیر نسبی مؤلفه طولی در راستای جریان (شکل ۸) شرایط کاملاً متفاوتی را به ازای شکل‌های مختلف پشته‌ها نشان می‌دهد. مطابق نتایج به‌دست آمده، حضور پشته بیضی‌شکل منجر به نوسانات قابل‌توجه مؤلفه طولی سرعت در هر سه محور (بین حدود  $0/5$  تا  $1/6$  برابر مقدار میانگین در محورهای چپ و راست و بین  $0/2$  تا  $1/4$  برابر مقدار میانگین در محور وسط) می‌شود؛ اما برای پشته‌های گوه‌ای و لوزی، این نوسانات در تمامی محورها چندان چشمگیر نیست (بین  $0/8$  تا  $1/2$  برابر مقدار میانگین در محورهای چپ و راست و بین  $0/8$  تا  $1/4$  برابر مقدار میانگین برای محور وسط). علت این امر را می‌توان به آشفتگی کم‌تر ایجادشده ناشی از جدایی جریان در پشته‌های لوزی و گوه‌ای مورد استفاده در این پژوهش نسبت داد.

مقدار مؤلفه عرضی سرعت در واقع معرف جریان ثانویه است که در فرایند فرسایش و رسوب‌گذاری در طبیعت مؤثر است، بنابراین تحلیل آن به‌ویژه در محورهای کناری چپ و راست می‌تواند مفید واقع شود. بررسی این مؤلفه سرعت در شکل ۷ حکایت از نوسانات مقادیر این مؤلفه در راستای طولی در هر سه محور چپ، وسط و راست دارد؛ به‌نحوی که در مواجهه با حضور پشته، مقادیر مؤلفه عرضی سرعت، قدری دچار کاهش شده و پس از عبور از پشته مجدداً افزایش می‌یابد. پرواضح است که کاهش سرعت جریان عرضی در ابتدای برخورد با پشته‌های رسوبی می‌تواند منجر به کاهش قدرت فرساینده‌گی جریان و برعکس مهیا شدن شرایط رسوب‌گذاری شده و پس‌از آن با افزایش سرعت، شرایط معکوس شده و قدرت فرساینده‌گی جریان افزایش خواهد یافت؛ و چنانچه تنش برشی در این نقاط فراتر از حد آستانه حرکت ذرات باشد، این فرسایش قابل‌توجه خواهد بود. بررسی و مقایسه دقیق‌تر نمودارها نشان‌دهنده شرایط تقریباً مشابه برای پشته‌های بیضی و گوه‌ای اما قدری متفاوت برای پشته لوزی است. با وجود اختلاف ساختار تغییرات مؤلفه عرضی سرعت در مواجهه با

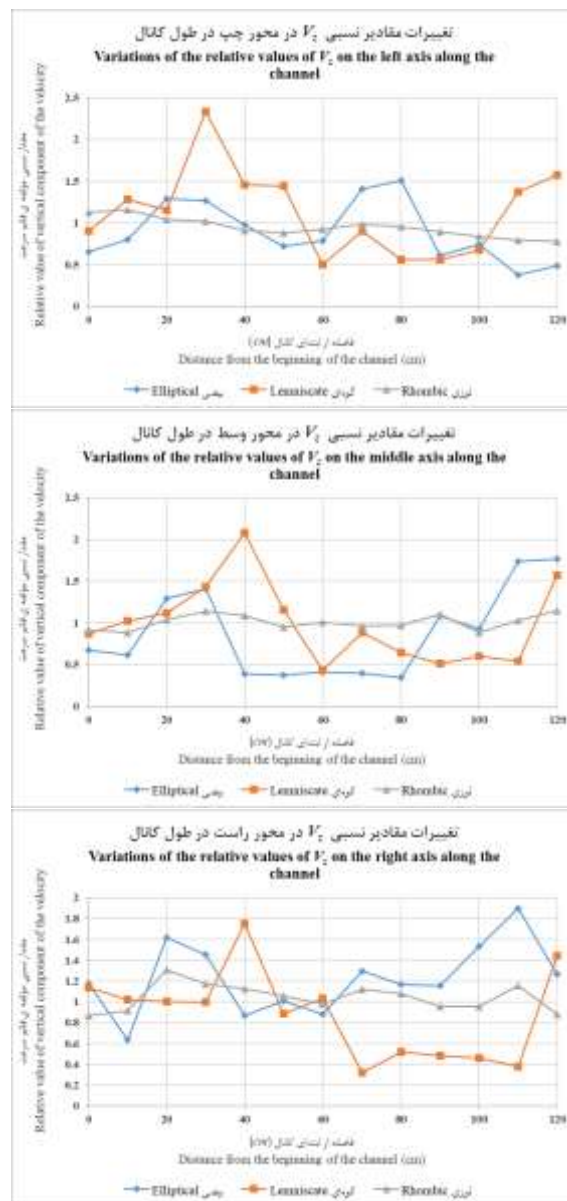


شکل ۸- تغییرات مقادیر نسبی مؤلفه طولی سرعت در طول کانال در مواجهه با پشته‌های مختلف بیضی، گوه‌ای و لوزی.

Figure 8. Variations in the relative values of the longitudinal component of the velocity along the channel in the face of different elliptical, lemniscate, and rhombic bars.

پشته گوه‌ای، در رأس تیز آن است که منجر به بروز تأثیری مشابه با نوک تیز لوزی بر ساختار جریان شده است.

علت مشابهت رفتار پشته گوه‌ای با پشته‌ی لوزی را می‌توان در نحوه قرارگیری گوه در مسیر جریان جستجو نمود که طبق آن، نقطه برخورد جریان با

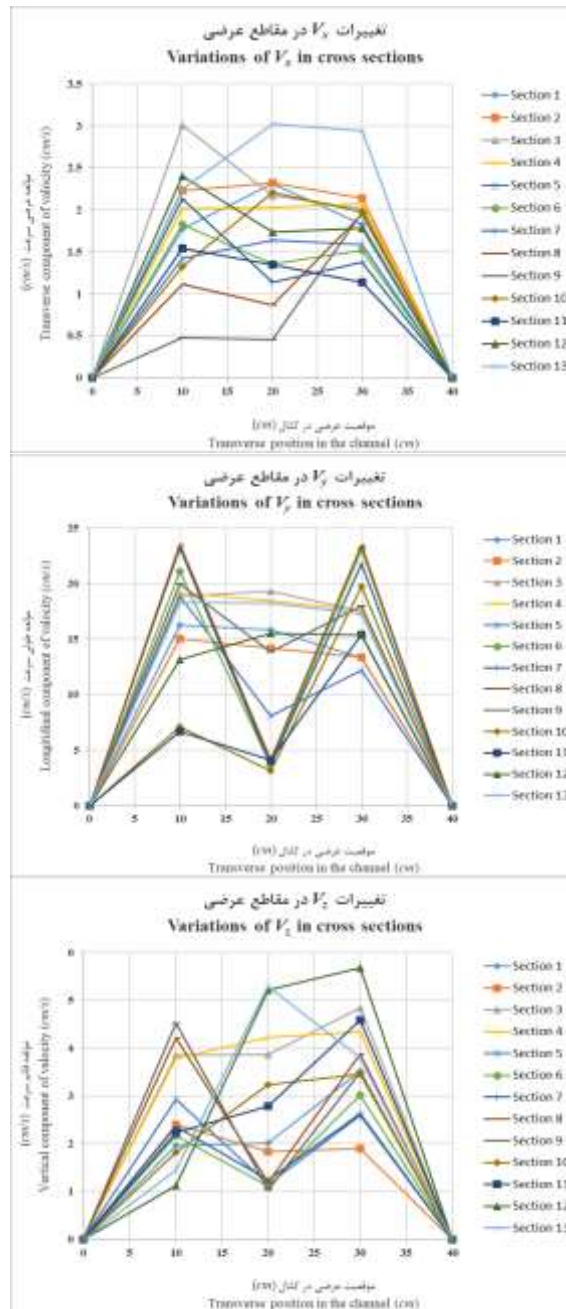


شکل ۹- تغییرات مقادیر نسبی مؤلفه قائم سرعت در طول کانال در مواجهه با پشته‌های مختلف بیضی، گوه‌ای و لوزی.

Figure 9. Variations in the relative values of the vertical component of the velocity along the channel in the face of different elliptical, lemniscate, and rhombic bars.

تغییرات مؤلفه قائم سرعت در محور وسط نشان‌دهنده بیش‌ترین کاهش سرعت آن قبل از بازه شروع مواجهه با پشته بیضی‌شکل و شرایطی مشابه برای همین محور در مواجهه با پشته گوه‌ای است با این تفاوت که آغاز این کاهش منطبق با بازه حضور پشته گوه‌ای است.

شکل ۹ ارائه‌دهنده تغییرات مقادیر نسبی مؤلفه قائم سرعت است. این تغییرات در هر سه محور برای پشته لوزی ناچیز (بین ۰/۸ تا ۱/۲ برابر مقدار میانگین) است. اما تغییرات این مؤلفه در مواجهه با پشته‌های گوه‌ای و بیضی بیش‌تر و در هر سه محور قابل توجه (بین ۰/۵ تا ۲/۳ برابر مقدار میانگین) است.



شکل ۱۰- مقایسه تغییرات مؤلفه‌های سرعت در مقاطع عرضی در مواجهه با پشته بیضی.

Figure 10. Comparison of variations in velocity components in cross-sections facing the elliptical bar.

در شکل ۱۰، روند تغییرات مؤلفه‌های عرضی، طولی و قائم سرعت جریان در مقاطع عرضی در مواجهه با پشته بیضی شکل به صورت تجمیع شده برای ۱۳ مقطع عرضی ارائه شده است. لازم به ذکر است مطابق شکل ۳، بازه مکانی حضور پشته در فاصله ۴۰ تا ۸۰ سانتی متری از ابتدای محل اندازه‌گیری‌هاست که همان مقاطع عرضی شماره ۶ تا ۱۰ می‌باشد.

بر پایه مشاهدات و بررسی‌های ارائه‌شده در بالا، مواجهه با پشته بیضی شکل منجر به بیش‌ترین تغییرات مقادیر نسبی مؤلفه‌های سه‌گانه سرعت شده است. بر این اساس، می‌توان با ملاحظه جزئیات بیش‌تر تغییرات در مقاطع عرضی (شکل ۱۰)، به تحلیل کامل‌تری دست یافت.



$$E = Z + \frac{P}{\gamma} + \alpha \frac{V^2}{2g} \quad (2)$$

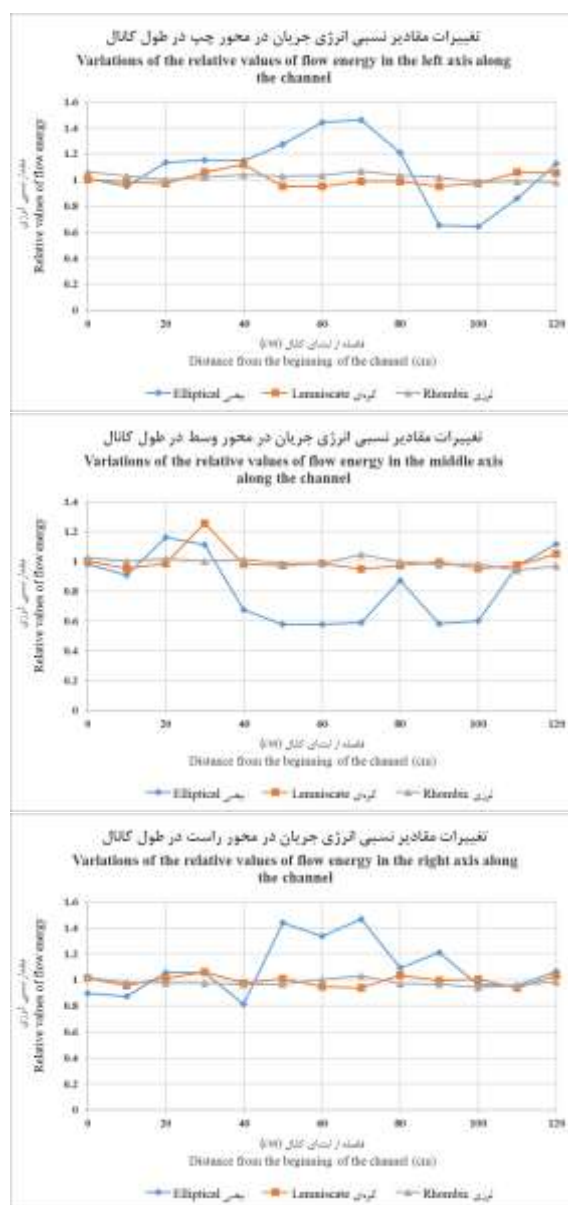
که در آن،  $E$  مقدار کل بار انرژی (متر)،  $Z$  بار هیدرواستاتیک (ارتفاع از سطح مبنا) (متر)،  $\frac{P}{\gamma}$  بار فشاری (متر) و  $\frac{V^2}{2g}$  بار جنبشی (متر) و  $\alpha$  ضریب تصحیح انرژی جنبشی (ناشی از غیریکنواختی جریان) است. هم‌چنین در جریان‌های مجاری روباز، مقدار بار فشاری ( $\frac{P}{\gamma}$ ) معادل با عمق جریان خواهد بود. بنابراین، بُعد تمامی جملات در رابطه فوق، طول می‌باشد.

در شکل ۱۱، تغییرات مقادیر نسبی انرژی جریان در محورهای چپ، وسط و راست در مواجهه با پشته‌های مختلف ارائه شده است.

مقایسه کلی خطوط ارائه شده، نشان‌دهنده اختلاف شرایط حاکم بر جریان در مواجهه با پشته بیضی‌شکل در قیاس با دوپشته دیگر است. تغییرات بار انرژی کل ناشی از حضور دوپشته لوزی و گوه‌ای ناچیز است درحالی‌که مشابه با تغییرات سرعت جریان در هر سه مؤلفه عرضی، طولی و قائم، پشته بیضی منجر به تغییرات قابل توجهی در مقادیر نسبی بار کل انرژی در طول کانال شده است. بررسی جزئی‌تر نمودارها نشان می‌دهد که در محورهای چپ و راست، مواجهه‌شدن با پشته بیضی منجر به افزایش انرژی نسبی جریان به اندازه ۱/۴ برابر میانگین شده و پس از عبور از پشته، بار انرژی به کم‌تر از مقدار میانگین کاهش یافته است. اما در محور وسط، وجود پشته، انرژی نسبی جریان را به ۰/۶ مقدار میانگین کاهش داده و پس از عبور از پشته، این مؤلفه روند افزایشی داشته است.

روند حاکم بر تغییرات مؤلفه عرضی سرعت در طی این بازه (شکل ۱۰)، نشان می‌دهد که در مقاطع ۶ و ۷، مقدار مؤلفه عرضی سرعت در محور سمت چپ (فاصله ۱۰ سانتی‌متری از دیواره سمت چپ) بیش‌تر از محورهای وسط و راست است؛ اما در مقاطع ۸ و ۹، این شرایط تغییر کرده و مقدار این مؤلفه در محور راست بیش‌تر از مقدار آن در دو محور دیگر است. بررسی تغییرات مؤلفه عرضی سرعت در طی بازه، نشان‌دهنده ساختاری است که در مقاطع ۶ تا ۱۰ حاکم بوده و طبق آن، مؤلفه طولی سرعت در دو محور کناری چپ و راست تقریباً یکسان و بیش‌تر از مقدار آن در محور وسط است. بررسی تغییرات مؤلفه قائم سرعت در طی بازه پشته نیز گویای ساختاری مشابه است به‌طوری‌که در دو محور کناری چپ و راست، مؤلفه قائم سرعت تقریباً یکسان بوده و از مقدار آن در محور وسط بیش‌تر است. این امر می‌تواند ناشی از تمرکز وجود پشته در محور وسط کانال باشد که منجر به کاهش جریان‌های قائم شده است.

تأثیر مستقیم مواجهه با پشته‌های رسوبی را علاوه بر مقادیر مؤلفه‌های سرعت، باید بر مقادیر انرژی جریان به‌عنوان معرف تجمیعی قدرت فرساینده‌گی جریان نیز جستجو نمود. بر این اساس، برای ۱۳ مقطع عرضی و با استفاده از مقادیر مؤلفه طولی سرعت، مقادیر اندازه‌گیری‌شده عمق جریان در سه محور چپ، وسط و راست کانال آزمایشگاهی و با در نظر گرفتن مقدار ارتفاع کف نسبت به سطح مبنا، بر اساس معادله انرژی (رابطه ۲)، محاسبه می‌شود:



شکل ۱۱- تغییرات انرژی جریان در طول کانال در مواجهه با پشته‌های مختلف بیضی، گوه‌ای و لوزی.

Figure 11. Changes in flow energy along the channel in the face of different elliptical, lemnistic, and rhombic bars.

### نتیجه‌گیری کلی

در این پژوهش، ساختار تغییرات جریان در اثر حضور پشته‌های رسوبی با شکل‌های مختلف مورد مطالعه قرار گرفت. بررسی تغییرات مؤلفه‌های سه‌گانه سرعت بر پایه نمودارهای هم‌سرعت نشان داد که اثر پشته‌های بیضی و گوه‌ای بر روی مؤلفه عرضی سرعت، مشابه و متفاوت با اثر پشته لوزی است. از نظر تغییرات مؤلفه طولی سرعت، اثر پشته‌های

لوزی و گوه‌ای، مشابه و ناچیز بوده و متفاوت با اثر پشته بیضی، با تغییرات قابل توجه بود. بررسی تغییرات مؤلفه قائم سرعت نیز نشان می‌دهد که این مؤلفه، در مواجهه با پشته‌های لوزی و گوه‌ای دچار تغییرات قابل توجه شده، ولی تأثیر پشته بیضی‌شکل بر روی آن زیاد نبود.

بررسی تغییرات مقادیر نسبی مؤلفه عرضی سرعت در طول کانال در مواجهه با پشته‌های مختلف،

پژوهش حاضر در قالب رساله دکتری نویسنده اول در دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان صورت گرفته است و نویسندگان از دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان که موجبات تسهیل انجام این پژوهش و دسترسی به آزمایشگاه تحقیقات آب و رسوب را فراهم نموده‌اند تقدیر و تشکر می‌نمایند.

### داده‌ها و اطلاعات

داده‌های این پژوهش مربوط به رساله دکتری نویسنده اول می‌باشد که حاصل فعالیت‌های آزمایشگاهی وی در آزمایشگاه تحقیقات آب و رسوب دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان است.

### تعارض منافع

در این مقاله تعارض منافی وجود ندارد و این مسأله مورد تأیید همه نویسندگان است.

### مشارکت نویسندگان

مشارکت نویسندگان در این پژوهش به صورت زیر است:

- نویسنده اول: جمع‌آوری اطلاعات لازم و پیشینه پژوهش، آماده‌سازی کانال و مدل آزمایشگاهی، انجام آزمایش‌ها و جمع‌آوری اطلاعات آزمایشگاهی، تجزیه و تحلیل اطلاعات، نگارش و تدوین متن مقاله و انجام اصلاحات.

- نویسنده دوم: نویسنده مسئول، استاد راهنمای رساله، هدایت مسیر آزمایش‌ها.

- نویسنده سوم: استاد مشاور رساله، طرح اولیه موضوع پژوهش.

- نویسندگان چهارم و پنجم: استاد مشاور رساله.

### اصول اخلاقی

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

حکایت از نوسانات مقادیر این مؤلفه در هر سه محور چپ، وسط و راست داشت به نحوی که در محدوده حضور پشته، مقادیر سرعت، قدری دچار کاهش شده و پس از عبور از پشته مجدداً افزایش می‌یابند. این کاهش سرعت جریان عرضی در ابتدای برخورد با پشته‌های رسوبی می‌تواند منجر به کاهش قدرت فرساینده‌گری جریان و مهیا شدن شرایط رسوب‌گذاری شده و پس از آن با افزایش سرعت، قدرت فرساینده‌گری جریان افزایش خواهد یافت. با وجود اختلاف در چگونگی تغییرات مؤلفه عرضی سرعت در محورهای مختلف در مواجهه با پشته‌های بیضی، گوه‌ای و لوزی، در تمامی موارد، دامنه تغییرات بین  $0/4$  تا  $1/6$  برابر مقدار میانگین مشاهده شد. حضور پشته بیضی منجر به نوسانات قابل توجه مؤلفه طولی در راستای جریان در هر سه محور شد؛ اما برای پشته‌های گوه‌ای و لوزی این نوسانات چندان چشمگیر نبود. تغییرات مقادیر نسبی مؤلفه قائم سرعت در هر سه محور، برای پشته لوزی ناچیز، ولی برای پشته‌های گوه‌ای و بیضی قابل توجه بود. در مجموع، مواجهه با پشته بیضی شکل، بیش‌ترین تغییرات مقادیر نسبی مؤلفه‌های سه‌گانه سرعت را نشان داد.

بررسی تغییرات مقدار نسبی انرژی جریان به‌عنوان معرف قدرت فرساینده‌گری جریان، نشان‌دهنده اختلاف شرایط در مواجهه با پشته بیضی در قیاس با دوپشته دیگر است. تغییرات بار انرژی کل ناشی از حضور دو پشته لوزی و گوه‌ای ناچیز است در حالی که مشابه با تغییرات سرعت جریان در هر سه مؤلفه عرضی، طولی و قائم، پشته بیضی منجر به تغییرات قابل توجهی در مقادیر نسبی بار کل انرژی در طول کانال شده است.

### تقدیر و تشکر

نویسندگان از داوران این مقاله که با نظرات خود موجب بهبود متن حاضر شده‌اند تشکر می‌نمایند.

### حمایت مالی

حمایت مالی از این پژوهش در قالب پژوهانه دانشجویی نویسنده اول برای رساله دکتری بوده و در

این پژوهش از امکانات آزمایشگاه آب و رسوب دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان استفاده شده است.

### منابع

1. Mat Salleh, M., & Ariffin, J. (2013). Flow and sediment matrix in mid-channel bar formation. *Int. J. Sci. Eng. Res.*, 4 (5), 1757-1764.
2. Carling, P., Orr, H., & Kelsey, A. (2006). The dispersion of magnetite bedload tracer across a gravel point-bar and the development of heavy-mineral placers. *Ore Geology Reviews*, 28 (4), 402-416.
3. Wang, B., & Xu, Y. J. (2018). Dynamics of 30 large channel bars in the Lower Mississippi River in response to river engineering from 1985 to 2015. *Geomorphology*, 300, 31-44.
4. Cardenas, M. B. (2008). The effect of river bend morphology on flow and timescales of surface water-groundwater exchange across pointbars. *Journal of Hydrology*, 362 (1-2), 134-141.
5. Kim, Y. H., & Voulgaris, G. (2005). Effect of channel bifurcation on residual estuarine circulation: Winyah Bay, South Carolina. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 65 (4), 671-686.
6. Dey, S. (2014). *Fluvial hydrodynamics*. 687 Pages. Springer Berlin, Heidelberg.
7. Wyrick, J., & Klingeman, P. (2011). Proposed fluvial island classification scheme and its use for river restoration. *River research and applications*, 27 (7), 814-825.
8. Beechie, T. J., Liermann, M., Pollock, M. M., Baker, S., & Davies, J. (2006). Channel pattern and river-floodplain dynamics in forested mountain river systems. *Geomorphology*, 78 (1-2), 124-141.
9. Li, Z., Wang, Z., Pan, B., Zhu, H., & Li, W. (2014). The development mechanism of gravel bars in rivers. *Quaternary International*, 336, 73-79.
10. Ward, J. V., Tockner, K., Edwards, P. J., Kollmann, J., Bretschko, G., Gurnell, A. M., ... & Rossaro, B. (1999). A reference river system for the Alps: the 'Fiume Tagliamento'. *River research and applications*, 15 (1-3), 63-75.
11. Wyrick, J. R. (2005). *On the formation of fluvial islands*: Oregon State University.
12. Chen, Y., Lin, B., & Han, H. (2018). *Experimental study on mid-channel bar formation in alluvial river*. Paper presented at the EGU General Assembly Conference Abstracts.
13. Hua, Zu-lin, Gu, Li, & Chu, Ke-jian. (2009). Experiments of three-dimensional flow structure in braided rivers. *Journal of Hydrodynamics, Ser. B*, 21 (2), 228-237.
14. Komar, P. D. (1983). Shapes of streamlined islands on Earth and Mars: Experiments and analyses of the minimum-drag form. *Geology*, 11 (11), 651-654.
15. Bonakdari, H., Lipeme-Kouyi, G., & Lal Asawa, G. (2014). Developing turbulent flows in rectangular channels: A parametric study. *Journal of applied research in water and wastewater*, 1 (2), 51-56.
16. Kirkgöz, M. S., & Ardiçlioğlu, M. (1997). Velocity profiles of developing and developed open channel flow. *Journal of hydraulic engineering*, 123 (1), 1099-1105.
17. Nikora, V., Goring, D., & Biggs, B. (1998). Silverstream eco-hydraulics flume: Hydraulic design and tests. *New Zealand Journal of Marine and Freshwater Research*, 3 (4), 607-620.
18. Abdolhosseini, M., & Afzalimehr, H. (2005). Comparison of flow determination methods in natural streams using field measurement of flow velocity. *The second national conference on watershed management and water and soil resources management*. Kerman Shahid Bahonar University. [In Persian]