

## بررسی اثرات صفحه مثلثی بر توزیع غلظت آلاینده و الگوی جریان در کانال‌های مستقیم\*

الهام یبارة پور<sup>(۱)</sup> محمود شفاعی بجهستان<sup>(۲)</sup> سید محمود کاشفی پور<sup>(۳)</sup>

**چکیده** در این مقاله تأثیر نصب صفحه مثلثی چسبیده به ساحل بر اختلاط عرضی ردیاب و کاهش غلظت آلاینده بررسی شده است. صفحات مثلثی از جمله سازه‌های دوستدار محیط‌زیست هستند که به منظور مدیریت رسوب در رودخانه‌ها استفاده می‌شوند. این صفحات با ایجاد جریان‌های ثانویه عرضی می‌توانند در فاصله کوتاه‌تری سبب اختلاط عرضی شوند و به خودپالایی رودخانه کمک نمایند. آزمایش‌های این مطالعه در یک فلوم به عرض ۸۰ سانتیمتر و طول ۱۰ متر انجام گرفت. صفحه مثلثی با طول مؤثر ۳۰٪ عرض فلوم و زاویه ۴۵ درجه نسبت به جریان اصلی، در فاصله ۵۰ سانتیمتری از منبع ردیاب نصب شد. از محلول آب و نمک به عنوان ردیاب استفاده شد و میزان شوری به وسیله ۹۶ حسگر شوری سنج در هر مقطع عرضی و در چهار مقطع پائین دست محل ردیاب برداشت شد. علاوه بر این در محدوده قبل و بعد از صفحه، الگوی سه‌بعدی سرعت نیز ثبت شد. نتایج نشان داد که وجود صفحه باعث افزایش مقدار سرعت عرضی و تغییر جهت آن‌ها شده که نشان از وجود جریان‌های ثانویه دارد و باعث شده که واریانس توزیع غلظت را نسبت به حالت بدون سازه، به میزان ۳۰٪ افزایش یابد. همچنین وجود این سازه باعث یکنواختی توزیع غلظت و کاهش ۸۰٪ مقدار غلظت در نقطه اوج منحنی میانگین توزیع غلظت در مرکز کانال نسبت به حالت بدون سازه شده است.

**واژه‌های کلیدی** غلظت آلاینده، جریان‌های ثانویه، رودخانه، مسیر مستقیم.

## Investigation of Transverse Distribution of Pollutant and Flow Pattern in the Present of Triangular Vane in the Straight Channels

Elham Yabbarepour

Mahmood Shafai Bajestan

Seyed Mahmood Kashefipour

**Abstract** In this paper, the effect of installation of a triangular vane attached to the bank on the transverse mixing and reduction of pollutant concentrations has been investigated. Triangular vanes are environment friendly structures and used for river sediment management. By generating secondary currents, these vanes can create transverse mixing in a shorter distance and help the river self-purification. The experiments were conducted in a flume 80 cm wide and 10 m long. A triangular vane with an effective length of 30 % of the channel width and an angle of 45 ° relative to the mainstream was installed at 50 cm downstream of the source of the tracer. Water and salt solution was used as a tracer. The concentration was measured by 96 sensors at each transverse section and in the four downstream sections of the tracer. In addition, around the vane, the 3D velocity pattern was also recorded. The results showed that the presence of the vane causes an increase in the amount of transverse velocity and their direction indicating the presence of secondary currents which resulted in a 30% increase in the variance of the concentration distribution. Also, the existence of this structure has led to the uniformity of concentration distribution and decrease of concentration of 80 % of the concentration at the maximum point of the concentration distribution at the center of the channel relative to the no vane condition.

**Key Words** Pollutant concentration, Secondary currents, River, Straight path.

\* تاریخ دریافت مقاله ۹۶/۱۰/۲۷ و تاریخ پذیرش آن ۹۷/۸/۵ می‌باشد.

(۱) نویسنده مسئول: دانشجوی دکتری گروه سازه‌های آبی، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز.

Email: e.yabarepour14@gmail.com

(۲) استاد، گروه سازه‌های آبی، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز.

(۳) استاد گروه سازه‌های آبی، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز.

## مقدمه

در مرکز کانال و در محل داده برداری غلظت که جریان ثانویه به آن وابسته است، نشان دادند که سرعت عمودی در بستر صاف به جز نقاط نزدیک بستر و سطح آب، کم تر از بستر تلماسه ای است. قاسمی و همکاران (۱۳۹۰) به بررسی اثر ارتفاع تاج تلماسه بر ضریب اختلاط عرضی در کانال مستطیلی پرداختند. نتایج به دست آمده نشان داد که وجود تلماسه، باعث افزایش سرعت برشی و جریان های ثانویه نسبت به حالت بستر صاف شده است که به میزان زیادی به اختلاط عرضی آلاینده کمک کرده و سرعت اختلاط را افزایش داده است. طباطبایی و همکاران (۲۰۱۳) افزایش اختلاط عرضی را در حالت وجود پوشش گیاهی کناره ها و تلماسه ها در کف مورد بررسی قرار دادند. نتایج آن ها نشان داد که وجود تلماسه و پوشش گیاهی در کناره ها به افزایش اختلاط عرضی، شدت تلاطم، تنش برشی و جریان های ثانویه که از فاکتورهای مؤثر بر افزایش خودپالایی رودخانه است کمک می کنند. در مسیرهای قوسی نیز می توان به مطالعات یوسوکورا و همکاران (۱۹۷۰)، چانگ (۱۹۷۱)، هالی و همکاران (۱۹۷۲)، وارد (۱۹۷۴)، کریشناپان و لو (۱۹۷۷)، انگامان (۱۹۸۶)، دمورون و رودی (۱۹۸۶) و بیک و سئو (۲۰۱۰) اشاره کرد که پراکندگی عرضی را در مسیرهای قوسی بررسی کردند و به این نتیجه رسیدند که وجود خم و مسیرهای قوسی باعث افزایش جریان های ثانویه و در نتیجه افزایش اختلاط عرضی نسبت به کانال های مستقیم می شود و به این ترتیب به خودپالایی رودخانه کمک می کنند. شارما و احمد (۲۰۱۴) اختلاط عرضی آلودگی را در رودخانه ها مطالعه کردند. در این مطالعه عوامل مهم، نسبت بی بعد عرض کانال به عمق جریان، اثر زبری کف و جریان های ثانویه بودند که در بین آن ها جریان های ثانویه مهم ترین فاکتور معرفی شد. مرور مطالعات فوق نشان می دهد که وجود جریان های ثانویه و هرگونه تغییر در الگوی سه بعدی جریان می تواند در افزایش اختلاط عرضی مؤثر باشد. البته بیشتر مطالعات

رودخانه ها فاضلاب ناشی از فعالیت های انسانی را دریافت کرده و آلودگی را در مسیر خود پخش کرده و غلظت آن را کاهش می دهند. امروزه استفاده بیش از حد از رودخانه ها به عنوان مجرای برای تخلیه انواع فاضلاب ها، باعث کاهش توان خودپالایی رودخانه و بحران آب ناشی از آلودگی شده است؛ بنابراین استفاده از فرایندهای اختلاط و رقیق سازی آلودگی به منظور بازیابی و امکان استفاده مجدد از آب های آلوده ضروری است. همچنین استفاده از روش هایی برای افزایش توان خودپالایی رودخانه ها حائز اهمیت است. افزایش اختلاط عرضی و در نتیجه خودپالایی رودخانه معمولاً با استفاده از سیستم های مکانیکی و طبیعی انجام می شود. از آنجاکه اختلاط به وسیله سیستم های مکانیکی هزینه بر است معمولاً بهتر است به روش طبیعی در آب اختلاط ایجاد شود تا به تبع آن خودپالایی رودخانه افزایش یابد (مددیان و عابدینی، ۱۳۹۱). از عوامل مؤثر بر افزایش خودپالایی رودخانه ها در روش های طبیعی، افزایش اختلاط عرضی با ایجاد تغییراتی در هیدرولیک جریان و افزایش آشفتگی است. از مهم ترین عوامل هیدرولیکی که بر افزایش اختلاط عرضی تأثیر گذار هستند سرعت برشی، شدت آشفتگی و جریان های ثانویه می باشند. بعضی از این عوامل هیدرولیکی به طور طبیعی در رودخانه ها آبرفتی و قوسی دیده می شود که می توان به مطالعات خداشناس و همکاران (۱۳۹۴) اشاره کرد که به مطالعه اثر تلماسه بر افزایش اختلاط عرضی در یک کانال مستطیلی پرداختند. نتایج آن ها نشان داد که برای حالت ثابت نسبت عرض به عمق برابر با  $2/14$ ، سرعت برشی برای حالتی که تلماسه وجود دارد به میزان  $23$  درصد نسبت به حالت بستر صاف افزایش یافته است. افزایش سرعت برشی و در نتیجه جریان های ثانویه ناشی از وجود تلماسه، باعث افزایش اختلاط عرضی و خودپالایی رودخانه نسبت به حالت بستر صاف شده است. آن ها همچنین با رسم نیمرخ قائم سرعت عمودی

اغلب برای مسائل مربوط به آب شستگی و ساحل سازی مورد بررسی قرار گرفته‌اند. در این مطالعه هدف اصلی بررسی اثر صفحه مثلثی بر افزایش اختلاط عرضی و نحوه توزیع ردیاب و کمک به خودپالایی رودخانه در مسیر مستقیم است.

### مواد و روش‌ها

آزمایش‌ها در یک فلوم با عرض ۸۰ سانتیمتر و طول ۱۰ متر در آزمایشگاه هیدرولیک دانشکده مهندسی علوم آب دانشگاه شهید چمران اهواز انجام شد (شکل ۱). در ورودی فلوم شیرفلکه‌ای برای تنظیم دبی ورودی به فلوم قرار داشت و به وسیله آن میزان دبی ورودی به فلوم کنترل می‌شد. میزان دبی ورودی توسط دبی سنج آلتراسونیک ترانزیت تایم ثابت مدل UF2000 ساخت انگلستان با دقت  $\pm 1\%$  درصد میزان قرائت شده، اندازه‌گیری شد. برای تنظیم عمق جریان، از دریچه کشویی انتهای فلوم استفاده شد. صفحه مثلثی از جنس پلاکسی گلاس و با ضخامت ۴ میلی‌متر انتخاب شد. طول مؤثر صفحه نیز به اندازه ۳۰ درصد عرض فلوم، یعنی ۲۴ سانتیمتر و زاویه قرارگیری نسبت به جهت جریان ۴۵ درجه در نظر گرفته شد. ارتفاع آن، هم‌اندازه عمق جریان، ۱۵ سانتیمتر و در کنار فلوم نصب شد. محل نصب صفحه در ۵۰ سانتیمتری محل ردیاب بود (شکل ۲). محلول آب و نمک به عنوان ماده ردیاب، در یک سرعت ثابت و نزدیک به سرعت متوسط جریان آب، در فاصله ۲/۵ متری ابتدای فلوم جایی که جریان کاملاً توسعه پیدا کرده بود تزریق می‌شد. یک شیر در بالای لوله تزریق نیز برای کنترل جریان محلول ردیاب وجود داشت. محلول ردیاب نیز توسط پمپ آکواریوم از مخزن کوچک کنار فلوم به مرکز جریان فلوم تزریق می‌شد. برای به دست آوردن توزیع غلظت در عرض فلوم از دستگاه شوری سنج که برای این مطالعه طراحی شده بود استفاده شد. این دستگاه شامل ۹۶ سنسور اندازه‌گیری غلظت بود که توسط دیتا لاگر به یک

انجام شده در رودخانه‌هایی انجام شده که با ویژگی‌های طبیعی خود می‌توانند باعث افزایش خودپالایی شوند. حال سؤال این مطالعه این است که در صورتی که مسیر رودخانه مستقیم یا بستر صاف باشد چگونه می‌توان با روش طبیعی به خودپالایی رودخانه کمک کرد به طوری که مشکلات زیست محیطی حداقل باشد؟ به همین منظور در این مطالعه از سازه‌های جدیدی که امروزه در رودخانه‌ها برای مدیریت رسوب معرفی شدند استفاده می‌شود. از جمله این سازه‌ها صفحات مثلثی متصل به ساحل هستند. این نوع سازه دوستدار زیست محیطی هستند و معمولاً از سنگ و الوار ساخته می‌شوند و از تراز دشت سیلابی در ساحل تا بستر رودخانه شیب‌دار هستند. به گونه‌ای که نوک آن‌ها حتی برای جریان‌های کم مستغرق می‌باشند. آن‌ها با زاویه کم نسبت به ساحل بالادست (۲۰-۳۰ درجه) نصب می‌شوند و طول مؤثر (فاصله نوک آن‌ها از ساحل بیرونی) آن‌ها یک سوم عرض مجرا است (بهرامی یاراحمدی و شفاعی بجستان، ۱۳۹۴). این سازه‌ها عمدتاً برای کنترل فرسایش سواحل، انحراف جریان از سواحل به طرف مرکز مجرا، بهتر شدن وضعیت انتقال رسوب، توسعه رودخانه جهت قایق‌رانی، ترمیم و توسعه زیستگاه آبزیان رودخانه استفاده می‌شوند. اولین مطالعه در این مورد توسط بویان و همکاران (۲۰۱۰) انجام شد. نتایج آن‌ها نشان داد صفحات یک سلول جریان ثانویه پادساعت‌گرد در ساحل بیرونی ایجاد می‌کنند که جریان حلزونی در قوس را خنثی می‌کند. همچنین بهرامی یاراحمدی و شفاعی بجستان (۱۳۹۴)، بدری و همکاران (۱۳۹۳) سری صفحات مثلثی متصل به ساحل را در قوس ملایم ۹۰ درجه مورد بررسی قرار دادند. در مسیر مستقیم هم می‌توان به مطالعه‌ای که توسط نجفی بیرگانی و همکاران (۱۳۹۳) انجام شد، اشاره کرد که سری صفحات مثلثی متصل به ساحل را در کانال مستطیلی مستقیم آزمایش کردند و نتایجی را در رابطه با حداکثر عمق آب شستگی ارائه کردند. صفحات مثلثی

موردنظر، محلول ردیاب با استفاده از همزن که در بالای مخزن آن قرار داشت به وسیله پمپ کوچک از داخل مخزن به نقطه‌ای که در محور مرکزی جریان و در فاصله ۲/۵ متری از ابتدای فلوم قرار داشت تزریق می‌شد. سپس غلظت در مقاطع مشخص شده شکل ۳ اندازه‌گیری می‌شد. با تفاضل غلظت نقاط قبل و بعد از تزریق ردیاب غلظت هر نقطه مشخص می‌شود سپس با استفاده از فرمول زیر (رابطه ۱) واریانس توزیع غلظت نسبت به خط مرکزی فلوم به دست می‌آید. (محمودیان شوشتری، ۱۳۸۹):

$$\sigma^2 = \frac{\sum_{i=1}^N C_i Z_i^2 \Delta Z_i}{\sum_{i=1}^N C_i \Delta Z_i} \quad (1)$$

در این رابطه  $C_i$  غلظت هر نقطه و  $Z_i$  فاصله هر نقطه از محور مرکزی کانال است و  $\Delta Z_i$  فاصله هر دو نقطه متوالی است. برای این که مقایسه کمی بین توزیع غلظت در عرض کانال در عمق متوسط انجام شود، میانگین غلظت‌ها با استفاده از روش میانگین‌گیری دوزنقه‌ای برای مقطعی در مرکز کانال که به فاصله ۴/۵ متر از محل تزریق ردیاب قرار دارد، انجام شد. سرعت برشی نیز در طول کانال با استفاده از فرمول زیر به دست آمده است:

$$\tau_{bx} = \frac{\rho g}{C^2} U \sqrt{U^2 + V^2} \quad (2)$$

$$\tau_{by} = \frac{\rho g}{C^2} V \sqrt{U^2 + V^2} \quad (3)$$

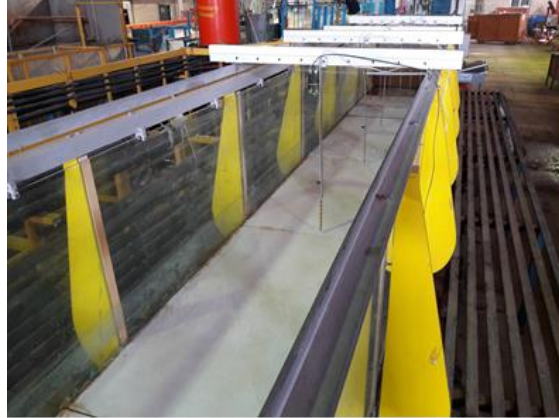
$$\tau_b = \sqrt{\tau_{bx}^2 + \tau_{by}^2} \quad (4)$$

$$u_* = \sqrt{\frac{\tau_b}{\rho}} \quad (5)$$

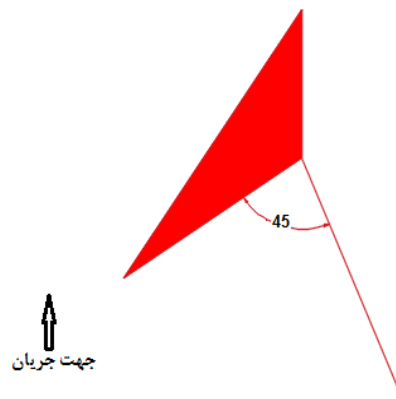
$\tau_{bx}$  و  $\tau_{by}$  به ترتیب تنش برشی بستر در جهت x و y، و U و V به ترتیب متوسط عمقی سرعت در جهت‌های x و y است.  $\rho$  و g به ترتیب جرم مخصوص سیال و ضریب گرانش زمین است همچنین C ضریب

سیستم رایانه‌ای متصل می‌شدند. غلظت‌ها در چهار مقطع عرضی که به فاصله ۱/۵ متر از هم قرار داشتند در شبکه‌ای با ۷ نقطه در عمق و عرض، قبل و بعد از تزریق ردیاب در مقاطع نشان داده شده در شکل (۲) اندازه‌گیری می‌شد. برای اندازه‌گیری مؤلفه‌های سه‌بعدی سرعت نیز از دستگاه سرعت‌سنج الکترومغناطیس JEF ALEC استفاده گردید. پروفیل‌های سرعت در طول فلوم در چهار مقطع، در همان محل داده‌برداری غلظت و در خط مرکزی کانال اندازه‌گیری شدند (شکل ۳). عمق جریان در تمام آزمایش‌ها ۰/۱۵ متر بود و پروفیل‌های سرعت شامل ۱۰ نقطه در هر مقطع بود. علاوه بر این، جهت بررسی الگوی جریان، تعداد ۱۹ مقطع جهت برداشت سرعت اطراف صفحه مثالی با زاویه ۴۵ درجه و طول مؤثر ۲۴ سانتیمتر انتخاب شد؛ که تعداد ۱۵ نقطه عرضی به ترتیب به فواصل ۰،۱۰، ۱۵، ۲۰، ۲۵، ۳۰، ۳۵، ۴۰، ۴۵، ۵۰، ۵۵، ۶۰، ۶۵، ۷۰ و ۷۵ سانتیمتر از دیواره فلوم (سمتی که سازه نصب است.) و ۴ لایه عمقی ۰،۳، ۰،۷، ۱،۱ و ۱،۴ سانتیمتری از کف انتخاب گردید. به منظور بررسی دقیق الگوی جریان، فاصله مقاطع در نزدیکی سازه نسبت به مقاطع دورتر از سازه نزدیک‌تر انتخاب شد. برای مقاطع نزدیک سازه و محل سازه فواصل ۰،۳ و ۰،۵ سانتیمتر و در مقاطع دورتر از سازه فواصل ۱،۰، ۲،۰ و ۳،۰ سانتیمتری انتخاب گردید. این آزمایش با دبی ۳۶ لیتر بر ثانیه انجام شد. در مجموع هشت سری آزمایش غلظت و یک آزمایش مربوط به الگوی جریان انجام شد. چهار آزمایش شاهد با چهار سرعت ۰،۲، ۰،۲۵، ۰،۳ و ۰،۳۵ متر بر ثانیه بدون صفحه و چهار آزمایش بعدی با همین سرعت‌ها ولی با نصب صفحه انجام شد. نحوه انجام آزمایش هم به این صورت بود که پس از نصب صفحه با زاویه ۴۵ درجه نسبت به جریان در فاصله ۳ متری از مقطع ورودی، آب در سیکل بسته از منبع اصلی به مخزن کوچک ابتدای فلوم پمپاژ شده و در آنجا با عبور از آرام‌کننده وارد فلوم می‌شود. پس از تنظیم هم‌زمان مقدار دبی و عمق جریان در حد

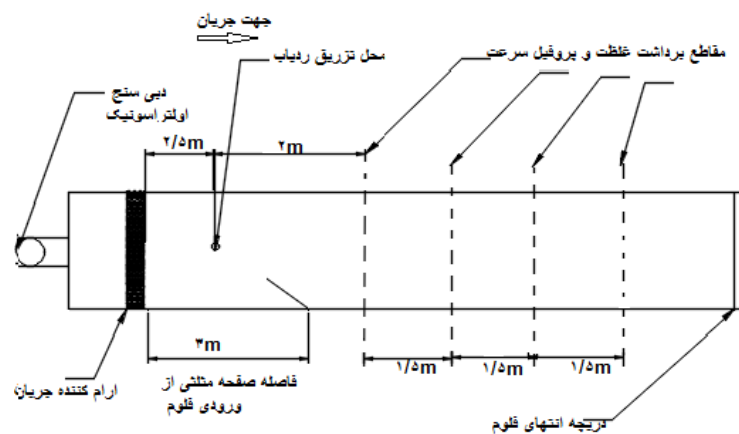
شزی است که با توجه به  $n$  ضریب مانینگ و  $R$  شعاع هیدرولیکی به دست می آید. با توجه به این که صفحات از جنس pvc بوده است ضریب مانینگ  $0/011$  در نظر گرفته شد.



شکل ۱ نمایی از فلوم آزمایشگاهی و محل حسگرهای اندازه گیری غلظت



شکل ۲ صفحه مثلی نصب شده در فلوم



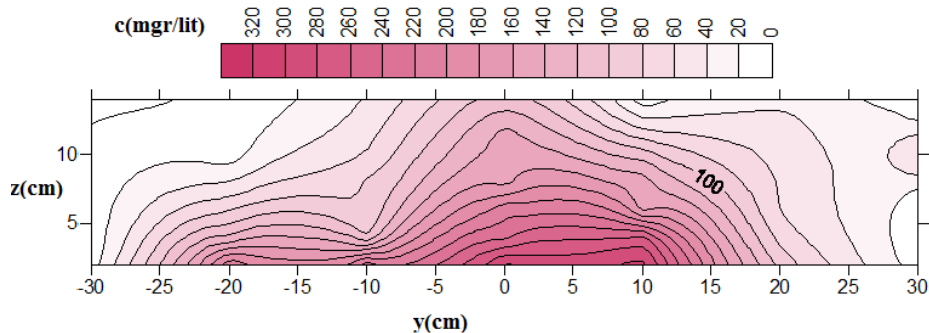
شکل ۳ پلان فلوم و تجهیزات

این جابجایی نشان‌دهنده وجود جریان‌های عرضی به دلیل حضور سازه است. شکل (۵-الف) که غلظت ردیاب را در مقطع دوم نشان می‌دهد در مقایسه با مقطع اول یعنی شکل (۴-الف) غلظت حداکثر به جای تمرکز در قسمت مرکزی فلوم در چند نقطه پخش شده است. در شکل (۶-الف) مشاهده می‌شود، نقاط حداکثر غلظت ردیاب در شکل (۵-ب)، به هم پیوسته شده‌اند و توزیع غلظت در مقطع سوم و چهارم یعنی شکل‌های (۶-الف) و (۷-الف) تا حدودی یکنواخت شده است. حال با مقایسه دو مقطع با سازه و بدون سازه، به‌طور مثال در شکل (۴-الف) و (۴-ب)، مشاهده می‌شود که علاوه بر جابجایی عرضی محل غلظت حداکثر، مقدار حداکثر غلظت در شکل (۴-ب) نسبت به شکل (۴-الف) به میزان حدود ۵۷٪ کاهش یافته است. در واقع کاهش حداکثر غلظت نشان‌دهنده توزیع یکنواخت‌تر غلظت در مقطع است. همچنین مشاهده شکل‌های (۴) تا (۷) نشان می‌دهند که در هر دو حالت با سازه و بدون سازه هر چه از منبع ردیاب فاصله گرفته شود غلظت در سطح بیشتری پخش شده ولی این افزایش در مورد حالت با سازه شدت بیشتری دارد.

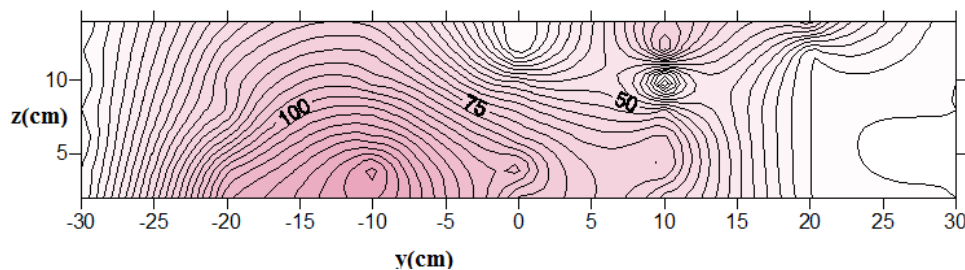
## نتایج و بحث

### بررسی الگوی توزیع غلظت ردیاب

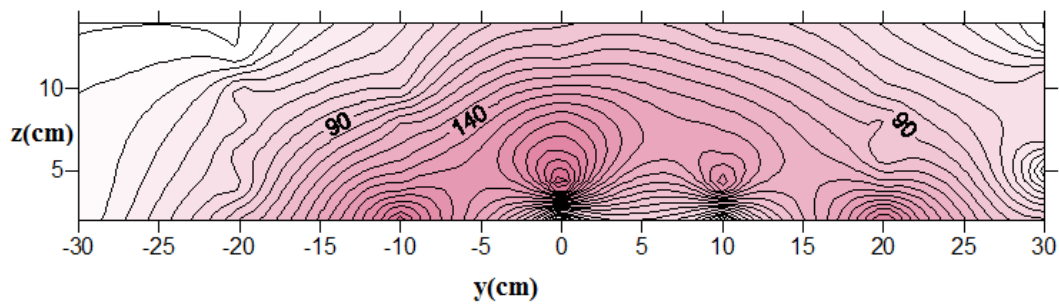
با استفاده از نرم‌افزار سورفر شکل دوبعدی توزیع غلظت برای هر چهار مقطع برای دو حالت با سازه و بدون سازه برای شرایطی که سرعت جریان ۰/۲ متر بر ثانیه است، در شکل‌های (۴) تا (۷) ترسیم گردید. مقایسه شکل‌های (۴) تا (۷) روند حرکت آلودگی در مقاطع و عمق‌های مختلف برای هر دو حالت با سازه و بدون سازه به صورت کیفی بیشتر مشخص می‌شود. در این شکل‌ها محور افقی  $y$  در راستای عرض فلوم و محور قائم  $z$  در راستای عمق جریان است. همان‌طور که در شکل (۴-الف) مشاهده می‌شود محل ماکزیمم غلظت تقریباً در قسمت وسط مقطع عرضی قرار گرفته است؛ زیرا همان‌طور که در آزمایش‌ها انگامان (۱۹۸۶) هم مشاهده شد به دلیل اینکه محل تزریق در مرکز قرار داشت میزان حداکثر غلظت نیز تقریباً وسط اتفاق افتاده است. با مقایسه شکل (۴-الف و ب) مشاهده می‌شود که پس از نصب سازه، محل ماکزیمم غلظت تغییر کرده و در شکل ۴ ب میزان حداکثر غلظت در فاصله ۱۰ سانتیمتری سمت راست مرکز کانال قرار گرفته است که



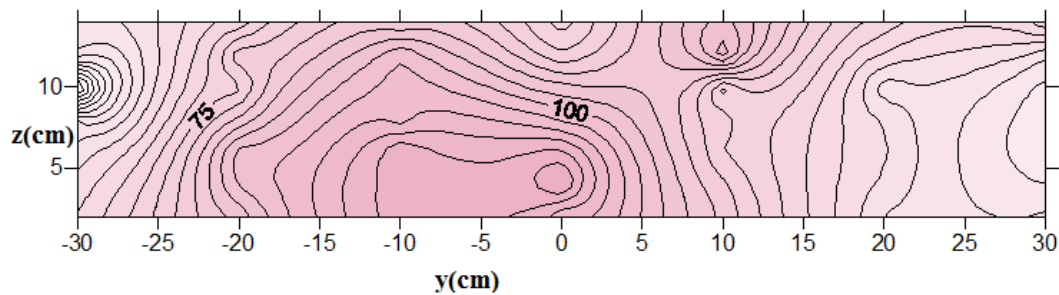
شکل ۴ الف) توزیع غلظت مقطع اول حالت بدون سازه در فاصله ۲ متری منبع ردیاب



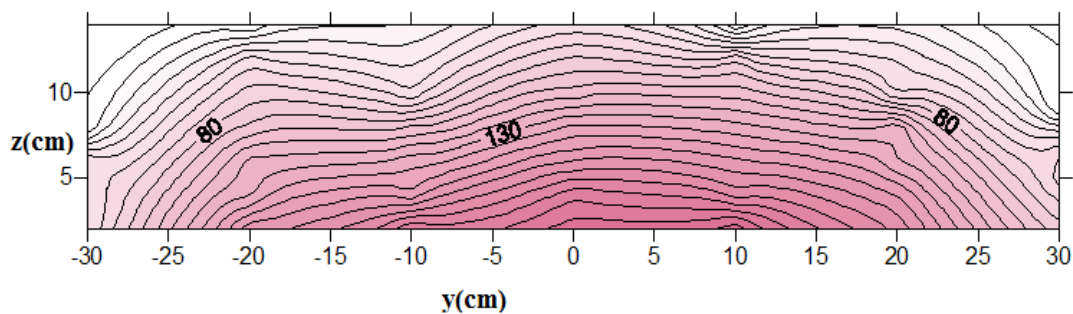
شکل ۴ ب) توزیع غلظت مقطع اول حالت با سازه در فاصله ۲ متری منبع ردیاب



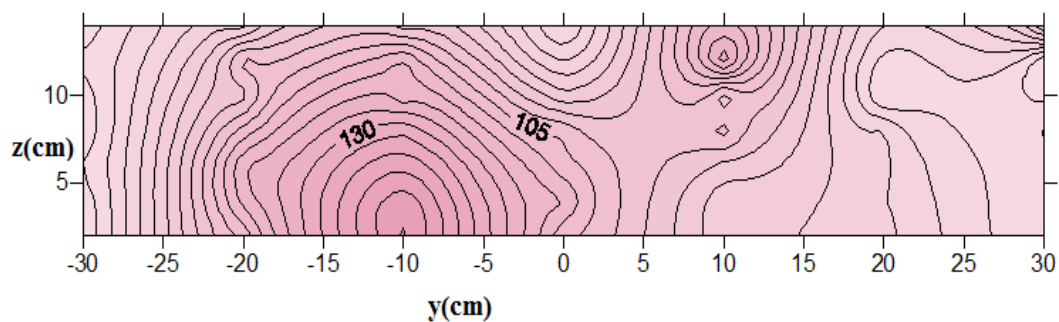
شکل ۵ الف) توزیع غلظت مقطع دوم حالت بدون سازه در فاصله ۳/۵ متری منبع ردياب



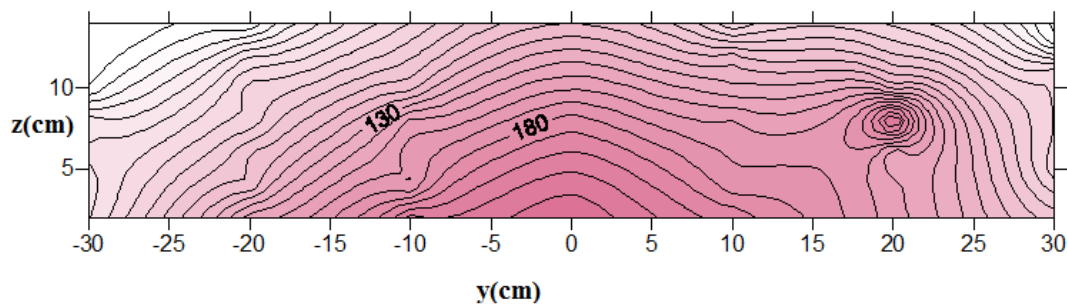
شکل ۵ ب) توزیع غلظت مقطع دوم حالت با سازه در فاصله ۳/۵ متری منبع ردياب



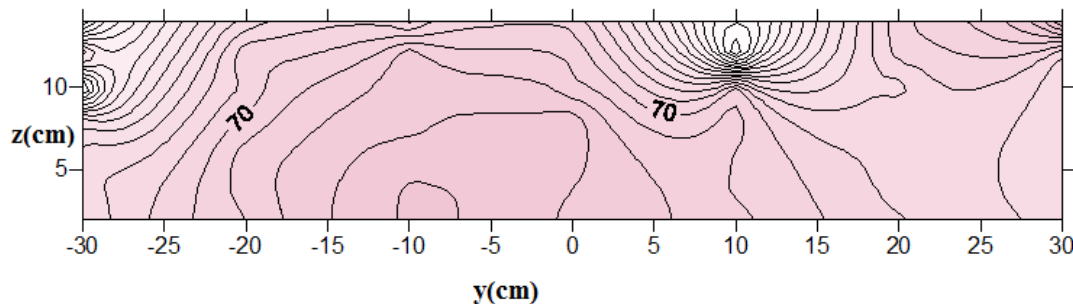
شکل ۶ الف) توزیع غلظت مقطع سوم حالت بدون سازه در فاصله ۵ متری منبع ردياب



شکل ۶ ب) توزیع غلظت مقطع سوم حالت با سازه در فاصله ۵ متری منبع ردياب



شکل ۷ الف) توزیع غلظت مقطع چهارم حالت بدون سازه در فاصله ۶/۵ متری منبع ردیاب



شکل ۷ ب) توزیع غلظت مقطع چهارم حالت با سازه در فاصله ۶/۵ متری منبع ردیاب

### تغییرات کمی غلظت عرضی

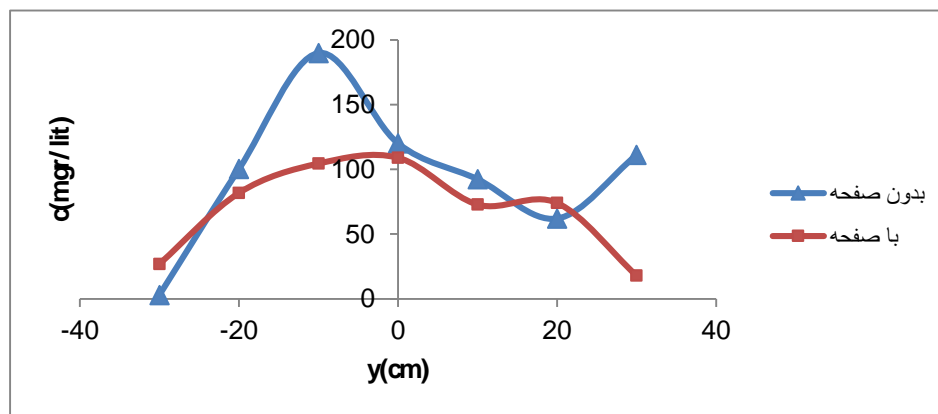
در شکل (۸) محور افقی، فاصله نقاط نمونه برداری از مرکز کانال برحسب سانتیمتر و محور قائم آن میزان غلظت را برحسب میلی گرم بر لیتر را نشان می دهد. همان طور که در شکل مشخص است نقطه اوج غلظت که تقریباً در مرکز کانال قرار دارد در حضور سازه به میزان ۸۰ درصد کاهش پیدا کرده است. کاهش نقطه اوج در حالت با سازه نسبت به حالت بدون سازه نشان دهنده افزایش یکنواختی توزیع غلظت به دلیل حضور سازه است که افزایش این یکنواختی در حضور سازه به خوبی در شکل (۸) قابل مشاهده است. همچنین در این شکل مشاهده می شود که مقادیر غلظت ردیاب از مرکز به سمت راست کمتر از مقادیر غلظت سمت چپ (جایی که صفحه مثلثی نصب است) است؛ زیرا با انحراف جریان به سمت راست توسط سازه به دلیل این که سرعت طولی جریان و همچنین سرعت برشی در این محل افزایش پیدا کرده است، باعث افزایش پراکندگی در این قسمت و کاهش غلظت ردیاب شده است.

همان طور که در شکل (۴-الف) و (۴-ب) مشخص است غلظت ردیاب پس از نصب سازه در قسمت های مرکزی فلوم که تقریباً تمرکز غلظت در آنجاست کاهش پیدا کرده است و به تدریج که به سمت جلو پیش می رود سازه اثر خود را بیشتر نمایان کرده است که در مقطع آخر یعنی شکل (۷-ب) غلظت به طور یکنواخت در کل مقطع توزیع شده است. می توان چنین استدلال کرد، چون در مقطع اول، غلظت با حضور سازه در فضای بیشتری پخش شده است بنابراین در مقاطع بعدی اندازه گیری غلظت، غلظت ردیاب نسبت به حالت بدون سازه در فضای بیشتری تحت تأثیر تلاطم جریان و کناره های فلوم که تنش برشی بالاتری دارند، قرار گرفته و اختلاط عرضی افزایش می یابد تا در نهایت در هیچ نقطه ای تمرکز غلظت دیده نمی شود. از طرف دیگر پس از نصب سازه تشکیل جریان های چرخشی در عرض فلوم باعث پخش هر چه بیشتر ماده ردیاب در عرض فلوم در مقایسه با حالت بدون نصب سازه می شود.

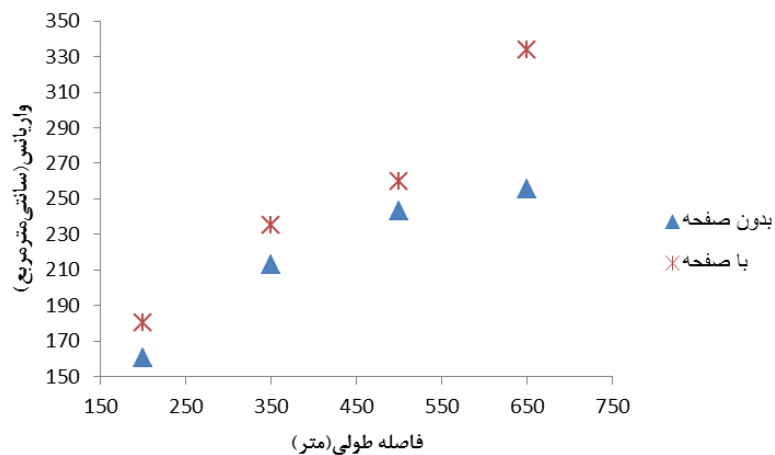


تزریق ردیاب به دلیل اینکه غلظت‌ها نسبت به محور مرکزی کانال دورتر می‌شوند، واریانس با افزایش فاصله، افزایش یافته است. همچنین با توجه به این شکل وجود سازه باعث افزایش واریانس توزیع غلظت نسبت به حالت بدون سازه در کلیه مقاطع است به طوری که در مقطع آخر واریانس‌ها به میزان ۳۰ درصد نسبت به حالت بدون سازه افزایش داشته است. از طرفی وجود سازه باعث شده است که روند تغییرات واریانس‌ها با شیب تندتری نسبت به حالت بدون سازه تغییر کند که نشان‌دهنده اثر هر چه بیشتر سازه بر الگوی توزیع غلظت با افزایش فاصله از منبع ردیاب است.

پس از اندازه‌گیری توزیع عرضی غلظت برای دو حالت بدون سازه و با سازه، سپس واریانس مربوط به توزیع آن‌ها در مقاطع مختلف برای یک دبی با سرعت ۰/۳۵ متر بر ثانیه با استفاده از رابطه (۱) محاسبه و رسم گردید. همان‌طور که در شکل (۹) مشاهده می‌شود، هر چه ردیاب به سمت پائین دست پیش می‌رود، واریانس هر مقطع برای هر دو حالت با سازه و بدون سازه افزایشی است که این مشاهده با مشاهدات هالی و ابراهام (۱۹۷۲) که نشان داده بود واریانس به صورت خطی بافاصله از منبع ردیاب افزایش می‌یابد تطابق خوبی دارد. با توجه به این که بعد واریانس برحسب مربع طول است، بنابراین با افزایش فاصله از محل

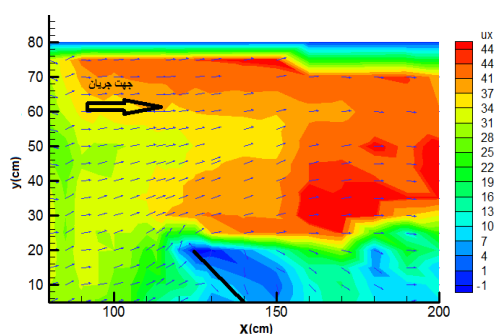


شکل ۸ نمودار توزیع غلظت در مقطع ۲ در فاصله ۴/۵ متری از محل تزریق ردیاب

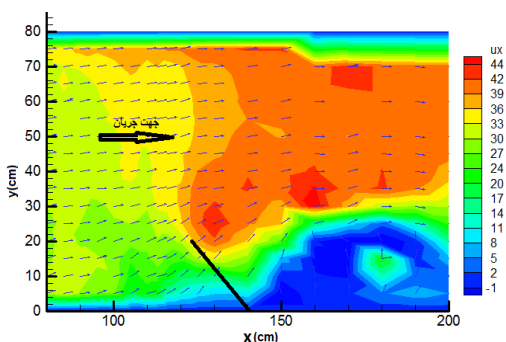


شکل ۹ روند تغییرات واریانس توزیع غلظت در مقاطع مختلف برای دو حالت با سازه و بدون سازه

اختلاط پیدا کرده و هر چه به سمت پایین دست سازه پیش می‌رود همان‌طور که در شکل (۹) هم مشاهده شد واریانس نسبت به حالت بدون سازه افزایش یافته است. به‌طور کلی از این دو شکل می‌توان این‌گونه نتیجه‌گیری کرد که سازه‌های مثلثی با انحراف جریان در جهت عرضی، افزایش سرعت طولی و در نتیجه افزایش سرعت برشی باعث افزایش اختلاط عرضی می‌شوند.



شکل ۱۰ الف) بردارهای سرعت و الگوی جریان اطراف سازه مثلثی در عمق ۳ سانتیمتری از کف

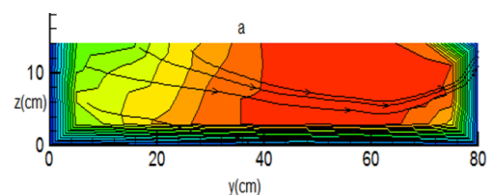


شکل ۱۰ ب) بردارهای سرعت و الگوی جریان اطراف سازه مثلثی در عمق ۱۴ سانتیمتری از کف

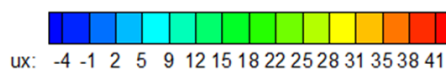
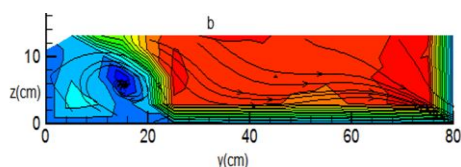
شکل (۱۱ الف) و (۱۱ ب) کنتورهای سرعت طولی و الگوی خطوط جریان را در مقاطع عرضی یکسان برای دو حالت بدون سازه و با سازه نشان داده است. اعداد صفر تا ۸۰ سانتی‌متر محور افقی، در راستای عرض فلوم و محور قائم این شکل‌ها در راستای عمق جریان می‌باشند. همان‌طور که از مقایسه این دو شکل می‌توان مشاهده کرد، خطوط جریان در حالتی که سازه

## الگوی جریان

الگوی جریان در عمق ۳ سانتیمتری (شکل ۱۰ الف) و ۱۴ سانتیمتری سطح آب (شکل ۱۰ ب) با استفاده از متوسط سرعت‌ها در دو جهت طولی ( $u_x$ ) سرعت در راستای جریان) و عرضی ( $u_y$ ) سرعت در راستای عرض فلوم) در پلان با استفاده از نرم‌افزار تک پلات ترسیم گردید. بردارهای سرعت نشان داده‌شده، در هر دو شکل (۱۰ الف) و (۱۰ ب)، برآیند سرعت در دو راستای عرضی و طولی است. همان‌طور که در شکل (۱۰ الف) مشاهده می‌شود، در فاصله حدود ۵۰ سانتیمتری بالادست سازه، بردارهای سرعت به‌صورت مستقیم هستند و در جهت جریان اصلی می‌باشند؛ اما از این مقطع به بعد بردارهای سرعت با زاویه حدود ۳۰ درجه منحرف شده است به‌طوری‌که در ۳۰ سانتیمتری سازه تا محل سازه میزان این انحراف به میزان حدود ۷۰ درجه نسبت به جهت اصلی جریان می‌رسد. این انحراف برای مقاطع پشت سازه تا فاصله حدود ۴۰ سانتیمتری ادامه دارد؛ بنابراین به دلیل انحراف بردارهای سرعت در بالادست و پایین دست سازه، سرعت طولی و در نتیجه سرعت برشی در مرکز و کناره‌های فلوم افزایش می‌یابد و باعث افزایش اختلاط عرضی می‌شود. در عمق‌های مختلف به دلیل شکل مثلثی سازه، از کف به سمت بالا سطح مقطع روبروی جریان کاهش می‌یابد در نتیجه، انحراف به سمت مرکز کاهش یافته و به همین دلیل فشردگی جریان و سرعت طولی با توجه به شکل‌های (۱۰ الف) و (۱۰ ب)، در عمق سه سانتیمتری نسبت به عمق ۱۴ سانتیمتری بیشتر است؛ و این عامل باعث می‌شود پخش ردياب در عمق‌های مختلف متفاوت باشد. افزایش سرعت طولی و در نتیجه تنش برشی در سه سانتیمتری و ۱۴ سانتیمتری کف از بالادست سازه تا فاصله‌ای بیش از ۴ برابر طول مؤثر صفحه ادامه دارد. در نتیجه غلظت ردياب در این فاصله نسبت به حالت بدون سازه در عرض بیشتری در فلوم



شکل ۱۱ الف) کنتورهای سرعت طولی و خطوط سرعت در مقطع مربوط به قبل از سازه



شکل ۱۱ ب) کنتورهای سرعت طولی و خطوط سرعت در مقطع مربوط به بعد از سازه

در شکل (۱۲) توزیع سرعت عرضی در برابر عمق جریان که در مرکز کانال و در محل برداشت توزیع غلظت برداشت شده، ترسیم شده است (محور افقی سرعت عرضی برحسب متر بر ثانیه و محور عمودی نشان دهنده عمق جریان برحسب متر است). همانطور که مشاهده می شود وجود سازه باعث شده است هم جهت سرعت و هم مقدار سرعت عرضی تغییر کند. با توجه به این که جریان های ثانویه دارای سه مؤلفه در سه جهت  $x$  و  $y$  و  $z$  هست، در حالتی که سازه وجود ندارد مؤلفه های سرعت عرضی معمولاً کوچک هستند ولی پس از نصب سازه به دلیل وجود جریان های ثانویه این جریان ها از نظر مقداری بزرگ شده و در جهت مشخصی قرار گرفته اند. از مقایسه این دو پروفیل سرعت عرضی مشاهده می شود که تفاوت مقدار سرعت های عرضی بین حالت شاهد و با سازه زیاد هست. در این مقطع مشاهده می شود برای حالت شاهد (شکل ۱۲) محدوده تغییرات سرعت عرضی از  $0.02$  متر بر ثانیه در  $2/5$  سانتیمتری کف به صفر در عمق  $6$  سانتیمتری کف می رسد و در نهایت به مقدار منفی  $0.04$  در نزدیکی

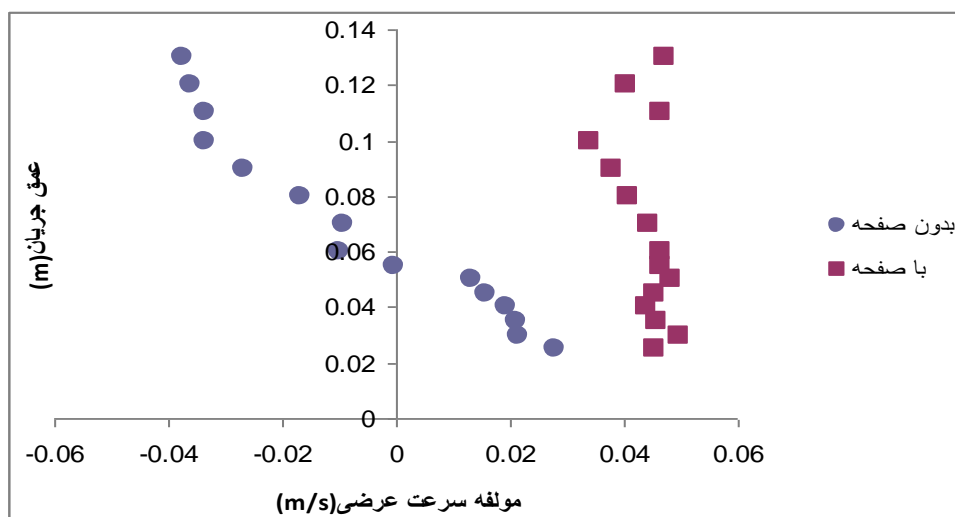
نصب شده است (شکل ۱۱ ب) با انحنای بیشتری نسبت به محور قائم کشیده شده اند. افزایش این انحنا به دلیل حضور جریان های ثانویه پشت سازه می باشند. در شکل (۱۱ الف) که حالت شاهد بدون سازه است خطوط جریان در راستای عرضی در مقایسه با حالت با سازه انحراف خطوط جریان کمتر است زیرا با نصب سازه، جریان در قسمت های بالایی سازه به طرف مرکز جریان و در کف به طرف ساحلی که سازه نصب است منحرف می شود در نتیجه باعث ایجاد جریان چرخشی در پشت سازه می شود و با فشردن شدن خطوط جریان در این ناحیه، سرعت طولی در مرکز جریان افزایش یافته که این تغییرات در الگوی جریان باعث افزایش تنش برشی در محل سازه و اطراف آن شده و در نتیجه می تواند باعث انتشار سریع تر مواد ردیاب در عرض و طول کانال گردد. در حالت بدون سازه (شکل ۱۱ الف) منحنی های تراز در مرکز جریان به سمت دیواره و گوشه های کانال به دلیل اثر جریان های ثانویه بیشتر کشیده شده اند اما پس از نصب سازه به دلیل تشکیل جریان چرخشی در پشت سازه منحنی های تراز نسبت به حالت قبلی به فاصله حدود  $20$  سانتیمتری نسبت به کناره ها جابجا شده است که همین جابجایی باعث جابجایی ردیاب به سمت مقابل سازه که سرعت طولی و برشی بالا است شده، در نتیجه غلظت ردیاب همانطور که در شکل (۸) نشان داده شد، در این ناحیه کمتر شده است.

عواملی مانند سرعت برشی شدت آشفتگی و جریان های ثانویه بر افزایش اختلاط عرضی مؤثرند؛ که یکی از این عوامل که نشان دهنده وجود جریان های ثانویه است افزایش سرعت عمودی و عرضی نسبت به حالت بدون سازه است. لذا برای بررسی اثر این عامل، نیمرخ سرعت عرضی برای هر دو حالت با سازه و بدون سازه برای یکی از مقاطع یعنی مقطع چهارم بررسی می شود.

و همکاران (۲۰۱۳) در حالت بستر با تلماسه، سرعت برشی به ترتیب به میزان ۱۷ درصد و ۲۳ درصد نسبت به حالت بستر صاف افزایش داشته است. در واقع این مقایسه نشان‌دهنده میزان تأثیر سازه بر اختلاط عرضی و خود پالایی رودخانه نسبت به حالتی که بستر تلماسه‌ای باشد را نشان می‌دهد. همچنین با توجه به جدول (۱) مشاهده می‌شود که در حالتی که مسیر قوسی باشد و شرایط هیدرولیکی تقریباً یکسان حاکم باشد، سرعت برشی به دست آمده در حالت با سازه تقریباً نزدیک به سرعت برشی‌های به دست آمده در مسیرهای قوسی برای مطالعات سئو و همکاران (۲۰۰۶) و لی و سئو (۲۰۱۲) است. در این جدول تنش برشی نیز محاسبه شده است که بر اساس آن، میزان افزایش تنش برشی در مطالعه حاضر به میزان ۶۰ درصد نسبت به حالت بدون سازه است و برای مطالعه خدشناس و همکاران (۱۳۹۴) و طباطبایی و همکاران (۲۰۱۳) میزان افزایش تنش برشی نسبت به حالت بستر صاف به ترتیب به میزان ۳۶/۲ و ۵۶/۲۵ درصد است و برای کانال قوسی شکل لی و سئو (۲۰۱۳) که شرایط هیدرولیکی مشابه مطالعه حاضر را دارد میزان تنش برشی تقریباً یکسان به دست آمده است.

عمق جریان می‌رسد علامت منفی و مثبت نشان‌دهنده سرعت عرضی جریان به سمت چپ و راست فلوم هست. پس از نصب سازه در تمام عمق‌ها سرعت عرضی به مقدار مثبت و تقریباً پروفیل یکنواخت می‌رسد که در محدوده ۰/۰۴ تا ۰/۰۵ متر بر ثانیه افزایش می‌یابد؛ که این نتیجه منطبق بر نتیجه شکل (۷ ب) هست که غلظت در تمام مقطع نسبت به شکل (۷ الف) کاهش و به مقدار یکنواخت در کل مقطع رسیده است.

همان‌طور که در قسمت مروری بر منابع اشاره شده است از عوامل مؤثر بر افزایش اختلاط عرضی، نسبت عرض به عمق جریان و سرعت برشی است. با توجه به این که نسبت عرض به عمق جریان در این مطالعه به میزان ثابت ۵/۳۳ هست، لذا در این بخش میزان سرعت برشی در حالت با سازه نسبت به حالت شاهد برای این مطالعه و مطالعات دیگر مقایسه شده‌اند. همان‌طور که در جدول (۱) مشاهده می‌شود، در مطالعه حاضر برای سرعت متوسط جریان ۰/۲۵ متر بر ثانیه، سرعت برشی برای حالت با سازه به میزان حدود ۱۹ درصد نسبت به حالت بدون سازه افزایش داشته است که این مقدار برای مطالعه خدشناس و همکاران (۱۳۹۴) و طباطبایی



شکل ۱۲ پروفیل مؤلفه سرعت عرضی در مقطع چهارم

جدول ۱ مقایسه مطالعه حاضر با دیگر مطالعات انجام شده

نام محققین	عمق جریان (متر)	سرعت جریان (متر بر ثانیه)	نسبت عرض به عمق جریان	تنش برشی (نیوتن بر مترمربع)	سرعت برشی (سانتیمتر بر ثانیه)	شکل کانال
خدانشناس و همکاران (۱۳۹۴)	۰/۲۸	۰/۲۴۹	۲/۱۴	۰/۲۶۲	۱/۶۲	مستقیم- بستر صاف
	۰/۲۸	۰/۲۴۵۴	۲/۱۴	۰/۳۵۷	۱/۸۹	مستقیم- با حضور تلماسه (ارتفاع تلماسه ۴ سانتیمتر)
طباطبایی همکاران (۲۰۱۵)	۰/۲۸	۰/۲۴۷	۲/۱۴	۰/۲۵۶	۱/۶	مستقیم-بستر صاف
	۰/۲۸	۰/۲۴۹	۱/۸۹	۰/۴	۲	مستقیم-تلماسه (ارتفاع تلماسه ۸ سانتیمتر)
سنو و همکاران (۲۰۰۶)	۰/۱۵	۰/۲	۶/۶۷	۰/۱۸	۱/۳۳	قوسی
لی و سنو (۲۰۱۳)	۰/۱۵	۰/۲	۵	۰/۱۴	۱/۱۷	قوسی
مطالعه حاضر	۰/۱۵	۰/۲۵	۵/۳۳	۰/۱۶	۱/۲۸	مستقیم بدون سازه
	۰/۱۵	۰/۲	۵/۳۳	۰/۱۴۴	۱/۲	مستقیم با سازه
	۰/۱۵	۰/۲۵	۵/۳۳	۰/۲۳	۱/۵۲	مستقیم با سازه

### نتیجه گیری

عرضی ردیاب باشد. همچنین نتایج مربوط به تزریق ردیاب، میزان اثر سازه را نشان داد که واریانس توزیع غلظت به میزان ۳۰٪ افزایش داشته است و نقطه اوج منحنی میانگین غلظت ردیاب به میزان ۸۰٪ درصد کاهش نشان داد. همچنین نتایج مربوط به سرعت برشی برای حالت با سازه باعث افزایش ۱۹ درصدی سرعت برشی در حالت با سازه نسبت به حالت بدون سازه است این در حالی است که این افزایش برای حالت وجود فرم بستر به میزان ۱۷ درصد و ۲۳ درصد افزایش نسبت به حالت بستر صاف نشان داده است. در مسیرهای قوسی که شرایط هیدرولیکی مشابه باشد میزان تنش و سرعت برشی تقریباً یکسان به دست آمده است.

هدف از انجام این تحقیق بررسی اثر استفاده از صفحات مثلثی برای افزایش اختلاط عرضی و خود پالایی رودخانه بوده است. به این منظور آزمایش‌هایی با سرعت‌های مختلف بین ۰/۲ تا ۰/۳۵ و در دو حالت با سازه و بدون سازه و عمق ثابت ۱۵ سانتیمتر انجام شد. نتایج نشان داد که وجود صفحه باعث افزایش سرعت عرضی نسبت به حالت بدون سازه شده است که این تغییر در سرعت عرضی به دلیل وجود جریان‌های ثانویه است. از آنجاکه جریان‌های ثانویه و سرعت برشی از عوامل مهم و تأثیرگذار بر اختلاط عرضی و خود پالایی رودخانه است، بنابراین وجود صفحه می‌تواند روش مناسبی برای افزایش اختلاط

### مراجع

- بهرامی یاراحمدی، م. شفاعی بجنستان، م. «تأثیر سری صفحات مثلثی در قوس ملایم ۹۰ درجه بر الگوی توپوگرافی بستر». نشریه مهندسی عمران و محیط‌زیست دانشگاه تبریز، دوره ۴۵، شماره ۸۰، پاییز ۱۳۹۴، صفحات ۱۱-۱۱، (۱۳۹۴).
- مددیان، م. الف. ع. عابدینی، س. ف. ساغروانی. «بررسی تأثیر نسبت بازشدگی کانال به نحوه انتشار آلودگی حاصل از آلوده‌ساز نقطه‌ای».

- نهمین سمینار بین‌المللی مهندسی رودخانه، بهمن‌ماه دانشگاه شهید چمران اهواز، (۱۳۹۱).
۳. نجفی بیرگانی، ن، شفاعی بجستان، م، بهرامی یاراحمدی. م. «بررسی آزمایشگاهی تأثیر شرایط جریان بر توپوگرافی بستر در آبشکن مثلثی». هشتمین کنگره ملی مهندسی عمران، دانشکده مهندسی عمران بابل، ۱۷ و ۱۸ اردیبهشت‌ماه، (۱۳۹۳).
۴. بدری، پ، شفاعی بجستان، م، بهرامی یاراحمدی. م. «تأثیر شرایط جریان بر توپوگرافی بستر در قوس ۹۰ درجه تحت تأثیر صفحات مثلثی». هشتمین کنگره ملی مهندسی عمران، دانشکده مهندسی عمران بابل، ۱۷ و ۱۸ اردیبهشت‌ماه، (۱۳۹۳).
۵. قاسمی، م، حیدرپور، م، اسماعیل‌زاده، م. «اثر ارتفاع تاج تلماسه بر ضریب اختلاط عرضی در یک کانال مستطیلی». اولین کنفرانس بین‌المللی و سومین کنفرانس ملی سد و نیروگاه برق‌آبی، (۲۰۱۲).
۶. خداشناس، س. ر معارف دوست ر قاسمی، م. «مطالعه پتانسیل خودپالایی جریان روی تلماسه در یک کانال مستطیلی روباز». نشریه آبیاری و زهکشی ایران. شماره ۳، جلد ۹، صفحات ۵۳۹-۵۳۲، (۱۳۹۴).
۷. محمودیان شوشتری، م. هیدرولیک مجاری روباز. جلد دوم، چاپ سوم، اداره چاپ و انتشارات دانشگاه شهید چمران اهواز، (۱۳۸۹).
8. Ward, P., "Transverse dispersion in oscillatory channel flow". *Journal of the Hydraulics Division*, 100(Proc Paper 10589), (1974).
9. Baek, K.O. and I.W. Seo, "Routing procedures for observed dispersion coefficients in two-dimensional river mixing". *Advances in Water Resources*, Vol. 33, No. 12, pp. 1551–1559, (2010).
10. Bhuiyan, F., R.D. Hey, and P.R. Wormleaton, "Bank-attached vanes for bank erosion control and restoration of river meanders". *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 136, No. 9, pp. 583–596, (2010).
11. Chang, Y.-C. "Lateral mixing in meandering channels. in *River Meandering*". 1971. ASCE.
12. Demuren, A.O. and W. Rodi, "Calculation of flow and pollutant dispersion in meandering channels". *Journal of fluid mechanics*, Vol. 10, No. 1, pp. 63-92, (1986).
13. Engmann, E., "Effect of Channel Bends on Transverse Mixing". *Nigerian Journal of Technology*, Vol. 10, No. 1, pp. 57–72, (1986).
14. Holley, E., J. Siemons, and G. Abraham, "Some aspects of analyzing transverse diffusion in rivers". *Journal of Hydraulic Research* Vol. 10, No. 1, pp. 27–57, (1972).
15. Holley, E.R. and G. Abraham, "Laboratory studies on transverse mixing in rivers". *Journal of Hydraulic Research*, Vol. 11, No. 3, pp. 219-253, (1973).
16. Lee, M.E. and I.W. Seo, "Spatially variable dispersion coefficients in meandering channels". *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 139, No. 2, pp. 141-153, (2012).
17. Rishnappan, B. and Y.L. Lau, "Transverse mixing in meandering channels with varying bottom topography". *Journal of Hydraulic Research*, Vol. 15, No. 4, pp. 351-370, (1977).
18. Seo, I., K.O. Baek, and T.M. Jeon, "Analysis of transverse mixing in natural streams under slug tests". *Journal of Hydraulic Research*, Vol. 44, No. 3, pp. 350-362, (2006).
19. Yotsukura, N., H.B. Fischer, and W.W. Sayre, Measurement of mixing characteristics of the Missouri River between Sioux City, Iowa, and Plattsmouth, Nebraska. USGPO, (1970).

- 
20. Tabatabaei, S., et al. "Transverse Mixing Coefficient on Dunes with Vegetation on a Channel Wall". in World Environmental and Water Resources Congress: Showcasing the Future. (2013).
21. Sharma, H. and Z. Ahmad, "Transverse mixing of pollutants in streams: a review". *Canadian Journal of Civil Engineering*, Vol. 41, No. 5, pp. 472-482, (2014).

