



## Experimental Study of the Effect of Rectangular Weir and U-weir on Contaminants' Transverse Mixing Coefficient and Mixing Length

S. Mansouri Kargar<sup>1\*</sup>, M. Shafai Bejestan<sup>2</sup>,  
and M. R. Zayeri<sup>3</sup>

### Abstract

In the last decade, pollution and degradation of aquatic ecosystems has raised the need to develop and improve methods to enhance the transverse mixing coefficient resulting in a shorter mixing length, especially in straight open channels. In this regard, this study experimentally investigated the performance of the construction of rectangular weir and U-weir in improving water quality in a straight open channel. The experiments were performed in a 12-meter flume with a width of 80 cm. Tracer material was injected at constant rate at the upstream of weir and at different time intervals its concentration was measured simultaneously in 5 cross sections downstream of the weir at 175 nodes. In order to make the necessary calculations, the three-dimensional components of velocity were also measured. By analyzing the results and examining the transverse and longitudinal distribution of the concentration as well as the flow pattern downstream of the U-weir, it was determined that it can intensify the transverse mixing coefficient up to 12.2 times and reduce the mixing length up to 91.9% compared to the case of no weir. This is while the rectangular weir increased the transverse mixing coefficient up to 1.53 times and decreased the length of complete mixing up to 34.7% times compared to the case of no weir.

**Keywords:** River, Water Quality, Secondary Flow, Transverse Mixing Coefficient, U-Weir.

Received: February 16, 2020

Accepted: June 8, 2021

## بررسی آزمایشگاهی اثر سرریزهای مستطیلی و U-شکل بر ضریب اختلاط عرضی و طول اختلاط آلاینده‌ها

سمیه منصوری کارگر<sup>۱\*</sup>، محمود شفاعی بجستان<sup>۲</sup>  
و محمدرضا زایری<sup>۳</sup>

### چکیده

در دهه اخیر، آلودگی و تخریب اکوسیستم‌های آبی نیاز به ابداع و ارتقای روش‌های افزایش ضریب اختلاط عرضی و در نتیجه کاهش طول اختلاط، بخصوص در مجاری باز را افزایش داده است. در همین راستا این مطالعه به بررسی عملکرد احداث سرریزهای مستطیلی و U-شکل در بهبود کیفیت آب در مجاری باز مستقیم به صورت آزمایشگاهی می‌پردازد. آزمایش‌ها در فلوم ۱۲ متری با عرض ۸۰ سانتی‌متر انجام گرفت. به منظور مقایسه، سرریز مستطیلی نیز مورد آزمایش قرار گرفت. ماده ردیاب در بالادست سرریز، تزریق و غلظت آن در ۵ مقطع عرضی به‌طور همزمان در ۱۷۵ گره و در زمان‌های مختلف اندازه‌گیری شد. به منظور محاسبات لازم، مؤلفه‌های سه‌بعدی سرعت نیز برداشت شد. با تحلیل نتایج و بررسی توزیع عرضی و طولی غلظت و نیز الگوی جریان در پایین‌دست سرریز U-شکل مشخص گردید که این سرریز می‌تواند با ایجاد جریان‌های ثانویه عرضی، موجب تشدید ضریب اختلاط عرضی تا ۱۲/۲ برابر و کاهش طول اختلاط تا ۹۱/۹٪ نسبت به حالت بدون سرریز شود. این در حالی است که سرریز مستطیلی باعث افزایش ضریب اختلاط عرضی تا ۱/۵۳ برابر و کاهش طول اختلاط کامل تا ۳۴/۷٪ نسبت به حالت بدون سرریز گردید.

**کلمات کلیدی:** رودخانه، کیفیت آب، جریان ثانویه، ضریب اختلاط عرضی، سرریز U-شکل.

تاریخ دریافت مقاله: ۹۸/۱۱/۲۷

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۰/۳/۱۸

1- M.Sc. Graduate of Hydraulic Structure Engineering, Department of Water Science Engineering, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran. E-mail: somayah.mansouri.k@gmail.com

2- Professor of Hydraulic Structure Department, College of Water Science Engineering, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran.

3- Assistant Professor of Hydraulic Structure Department, College of Water Science Engineering, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran.

\*- Corresponding Author

Dor: [20.1001.1.17352347.1400.17.1.18.9](https://doi.org/10.1001.1.17352347.1400.17.1.18.9)

۱- دانش‌آموخته کارشناسی ارشد مهندسی آب و سازه‌های هیدرولیکی، گروه سازه‌های آبی، دانشکده مهندسی علوم آب، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران.

۲- استاد گروه سازه‌های آبی، دانشکده مهندسی علوم آب، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران.

۳- استادیار گروه سازه‌های آبی، دانشکده مهندسی علوم آب، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران.

\*- نویسنده مسئول

بحث و مناظره (Discussion) در مورد این مقاله تا پایان تابستان ۱۴۰۰ امکانپذیر است.

علاوه بر این، تحقیقات بسیاری در رابطه با جریان‌های ثانویه به‌عنوان یک عامل تأثیرگذار بر ضریب اختلاط عرضی نیز انجام شده است (Lau and Krishnappan, 1981; Boxall and Guymer, 2003; Boxall et al., 2003, etc.). نتایج پژوهش‌ها نشان می‌دهد که اختلاط عرضی با تقویت جریان‌های ثانویه، افزایش می‌یابد. Lau and Krishnappan (1977, 1981) نشان دادند که ضریب اختلاط عرضی متأثر از پدیده جریان‌های ثانویه است و از انحنا در مسیر جریان می‌توان به‌عنوان عاملی برای تقویت جریان‌های ثانویه اشاره کرد. مطالعات گذشته نشان می‌دهد که جریان‌های ثانویه در کانال‌های مستقیم در مقایسه با کانال‌های قوسی شکل ضعیف‌تر هستند (Lau and Krishnappan, 1977; Lau and Krishnappan, 1981; Holley and Nerat, 1983; Boxall et al., 2003; Boxall and Guymer, 2003, etc.). بنابراین میزان اختلاط عرضی در کانال‌های قوسی شکل از کانال‌های مستقیم بیشتر است (Sharma and Ahmad, 2012; Lee and Seo, 2013; Baek and Seo, 2011, etc.). Rutherford (1994) محدوده تغییرات ضریب بی‌بعد اختلاط عرضی  $(e_y/hu_*)$  را برای کانال‌های مستقیم از ۰/۱۵ تا ۰/۳۰، کانال‌های مماندری ملایم از ۰/۳۰ تا ۰/۹۰، کانال‌های قوسی شکل از ۱/۰ تا ۳/۰ به دست آورد. به نظر می‌رسد افزایش میزان اختلاط عرضی آلودگی‌ها در کانال‌های مستقیم با ایجاد گردابه‌ها و جریان‌های ثانویه امری ضروری و مهم محسوب شود. اخیراً محققین به بررسی اثر برخی سازه‌ها که معمولاً برای مدیریت رسوب رودخانه و حفاظت محیط‌زیست به کار گرفته می‌شوند، باهدف ایجاد جریان‌های ثانویه در کانال‌های مستقیم و افزایش ضریب اختلاط عرضی پرداخته‌اند. از جمله آن‌ها می‌توان به (Sharma and Ahmad (2012) که تأثیر تعداد ردیف صفحات مستغرق بر ضریب اختلاط عرضی را مورد مطالعه قرار دادند، اشاره کرد. آن‌ها از روش پردازش تصاویر برای تعیین غلظت ردیاب در پایین‌دست محل تزریق استفاده کردند و نتیجه گرفتند که افزایش تعداد ردیف‌های صفحات مستغرق در طول کانال، باعث افزایش ۲ تا ۱۱ برابری ضریب اختلاط عرضی نسبت به حالت بدون صفحات می‌شود. (Beladi and Shafai Bejestan (2018) تأثیر تعداد صفحات مستغرق در عرض کانال و هم‌چنین Kianersi and Shafai Bejestan (2018) تأثیر زوایای مختلف قرارگیری صفحات نسبت به جریان را بر ضریب اختلاط عرضی به‌صورت آزمایشگاهی مطالعه کردند. در این مطالعات مناسب‌ترین فاصله و زاویه که منجر به کوتاه‌ترین طول اختلاط می‌شود، معرفی شدند. در مطالعه دیگری (Yabbarehpour et al. (2019) تأثیر نصب صفحه مثلثی، که به‌عنوان راهکار محیط زیستی برای مدیریت رسوب در رودخانه‌ها معرفی شده است را بر کاهش طول اختلاط بررسی کردند و نشان دادند که وجود این صفحه باعث افزایش ۱/۴۳ برابری ضریب اختلاط

آلودگی آب وقتی اتفاق می‌افتد که یک بدنه آبی در اثر اضافه شدن مقداری مواد، تحت تأثیر قرار گیرد و هنگامی که این آب برای مصرف موردنظر کیفیت مطلوبی نداشته باشد، به‌عنوان آب آلوده لحاظ می‌شود. فرایند انتشار مواد شیمیایی را می‌توان به سه مرحله تقسیم کرد (Fischer et al., 1979). هنگامی که تزریق انجام می‌گیرد، از ابتدای آن تا محلی که غلظت در عمق یکنواخت گردد را پخشیدگی اولیه گویند که علت آن نیروی مومنتم اولیه و نیروی شناوری می‌باشد. در مرحله دوم درحالی که آلاینده‌ها در حال پخش و رقیق‌سازی در مقطع عرضی هستند، مومنتم اولیه و نیروی شناوری به‌تدریج محو می‌شود و پخش و اختلاط مواد بر اثر آشفتگی و جریان‌های ثانویه انجام می‌پذیرد. در مرحله پایانی، هنگامی که آلاینده‌های ورودی در عرض کانال به‌طور یکنواخت پخش شدند، برش‌های طولی جریان باعث انتشار مواد در طول رودخانه می‌شوند تا غلظت در تمام سطح مقطع به مقدار ثابت برسد و اختلاط کامل شود. از نظر محیط‌زیست، هر راهکاری که باعث پخش سریع‌تر و یکنواخت‌تر آلودگی در طول کم‌تری از رودخانه و در واقع کاهش طول اختلاط کامل بشود، مطلوب محسوب می‌شود. طول اختلاط کامل به فاصله میان محل تزریق آلودگی تا محلی که آلاینده به‌طور یکنواخت در عرض مجرا پراکنده شود به‌طوری‌که تمام نقاط در هر سطح مقطع غلظتی کم‌تر یا برابر پنج درصد مقدار غلظت کل تزریق شده را دارا باشند، گفته می‌شود (Saadatpour et al., 2011). این طول را در حالتی که تزریق از مرکز مجرا باشد می‌توان با استفاده از رابطه (۱) محاسبه کرد (Fischer et al., 1979):

$$L = 0.1 \frac{uw^2}{e_y} \quad (1)$$

که در آن  $u$  سرعت متوسط جریان (cm/s)،  $w$  عرض مجرا (cm) و  $e_y$  ضریب اختلاط عرضی (cm<sup>2</sup>/s) است. تا به امروز راهکارهای زیادی برای کاهش طول اختلاط کامل ارائه شده‌اند که با توجه به رابطه (۱)، می‌توان به افزایش ضریب اختلاط عرضی اشاره کرد. در مبحث مدیریت کیفیت آب، ضریب اختلاط عرضی به‌عنوان تأثیرگذارترین پارامتر در بین پارامترهای اختلاط و پخشیدگی شناخته شده است (Rutherford, 1994). برای افزایش این ضریب تلاش‌های زیادی از جمله استفاده از پوشش گیاهی (Perucca et al., 2009)، افزایش عمق (Saadatpour et al., 2011) افزایش دبی و افزایش زبری (Zebardast et al., 2015)، پوشش گیاهی مستغرق و غیر مستغرق (Hamidifar et al., 2015) و پژوهش‌های دیگر انجام شده است.

عرضی و کاهش ۳۰ درصدی طول اختلاط نسبت به حالت بدون صفحه می‌شود.

$$\frac{e_y}{hu_*} = f_2 \left( \frac{u}{u_*}, \frac{B}{h}, \frac{Z}{h}, \frac{\rho hu}{u_*}, \frac{u}{\sqrt{gh}}, \theta \right) \quad (3)$$

با توجه به اینکه تمام آزمایش‌ها در کانال مستطیلی با مقطع یکنواخت انجام گرفته است، عمق هیدرولیکی با عمق آب در هر نقطه از کانال برابر است. بنابراین  $\frac{\rho hu}{u_*}$ ، عدد رینولدز و  $\frac{u}{\sqrt{gh}}$  عدد فرود می‌باشد. از آنجاکه آزمایش‌ها تحت شرایط کاملاً آشفته کنترل می‌شود می‌توان گفت اثر عدد رینولدز ناچیز است. (Webel and schatzman, 1984). Aghababaei et al. (2017) و Alizadeh et al. (2017) نشان دادند که در جریان‌های زیر بحرانی و در کانال‌های با شیب ملایم، اثر عدد فرود بر ضریب اختلاط عرضی ناچیز است. همچنین اثر عدد فرود به‌طور غیرمستقیم در پارامترهایی مثل سرعت برشی، سرعت جریان و عمق آب وجود دارد و در شرایط یادشده می‌توان از آن، در آنالیز ابعادی صرف‌نظر کرد (Alizadeh et al., 2017). در این تحقیق از پارامترهای بی‌بعد  $\frac{B}{h}$  (به دلیل ثابت بودن هر دو پارامتر B و h)،  $\frac{Z}{h}$  (در تمامی آزمایش‌ها،  $\frac{Z}{h} = 1$  و ثابت بوده است) و  $\theta$  (هندسه سرریز U- شکل در آزمایش‌ها ثابت است) نیز صرف‌نظر شد. بدین ترتیب پارامترهای نهایی به‌صورت رابطه (۴) خواهد بود:

$$\frac{e_y}{hu_*} = f_3 \left( \frac{u}{u_*} \right) \quad (4)$$

## ۲-۲- تجهیزات آزمایشگاهی

آزمایش‌های پژوهش حاضر در یک کانال با عرض و ارتفاع ۰/۸ متر در آزمایشگاه هیدرولیک دانشکده مهندسی علوم آب، دانشگاه شهید چمران اهواز انجام گرفت. دیواره‌های این کانال از جنس پلکسی گلاس و طول آن ۱۲ متر است که شامل قسمت‌های مختلف از جمله سیستم پمپاژ آب ورودی، ورودی مشبک فلزی به‌منظور آرام کردن جریان و دریچه‌ی انتهایی هم‌عرض فلوم می‌باشد. دبی عبوری از فلوم نیز به‌وسیله یک دستگاه فلومتر آلتراسونیک اندازه‌گیری شد. اندازه‌گیری عمق جریان با استفاده از یک عمق سنج با دقت  $\pm 0/1$  میلی‌متر انجام شد. این عمق سنج بر روی یک ارايه متحرک نصب شده است که قابلیت جابجایی در سه راستای طولی، عرضی و عمقی را داشت.

## ۲-۳- طراحی و نصب سازه‌ها

در این پژوهش برای طراحی ابعاد سرریز U-شکل، توصیه‌های Rosgen (2001) به کار گرفته شد. بدین ترتیب سرریز U-شکل از یک ورق فولاد گالوانیزه با ضخامت ۱ میلی‌متر که متشکل از صفحه افقی قائم (گلوگاه) بر جریان است، در مرکز جریان و به طول یک‌سوم عرض کانال نصب شد. این سرریز با زاویه بازشدگی ۱۲۰ درجه، ارتفاع گلوگاه ۱۱/۳ سانتی‌متر و ارتفاع انتهایی بازو ۱۴ سانتی‌متر (که با عمق

علی‌رغم تحقیقات زیاد انجام شده برای افزایش ضریب اختلاط عرضی، تأثیر سازه‌های حفاظت ساحل بر این ضریب، کمتر مورد مطالعه قرار گرفته است. از دیگر سازه‌های دوست‌دار محیط‌زیست در رودخانه‌ها می‌توان به سرریز U-شکل اشاره کرد که مطالعات Kurdistani and Pagliara (2017) نشان داد که نصب این سازه باعث هدایت جریان اصلی و حفرة آبشستگی به سمت مرکز کانال شده در نتیجه از تخریب ساحل جلوگیری کرده ضمن این که وجود گردابه‌های متعددی در این ناحیه منجر به افزایش میزان اکسیژن محلول شده و محیط مناسبی را برای آبریان فراهم می‌کند. همچنین مطالعات اولیه نویسندگان مقاله حاضر، نشان داد که نصب سرریز U-شکل در مسیرهای مستقیم نیز می‌تواند گردابه‌های متعددی را ایجاد کند که منجر به اختلاط آلاینده در عرض فلوم و در فاصله طولی کوتاه‌تری نسبت به حالت بدون سرریز شود (Mansouri Kargar and Shafai Bejestan, 2018). از این رو هدف از پژوهش حاضر بررسی اثر سرریز U-شکل بر تغییرات ضریب اختلاط عرضی و طول اختلاط آلاینده‌ها به‌صورت آزمایشگاهی است. همچنین به‌منظور بررسی و تحلیل الگوی جریان ناشی از سرریز U-شکل از نرم‌افزار تک پلات که از جامع‌ترین ابزار تجسمی و رسم نمودار داده‌ها در زمینه دینامیک سیالات محاسباتی است، استفاده گردید.

## ۲- روش تحقیق

### ۲-۱- آنالیز ابعادی

پارامترهای مهم تأثیرگذار در رابطه با ضریب اختلاط عرضی، با توجه به تحقیقات گذشته (i.e. Beltaos, 1979; Holley and Abraham, 1973; Jeon et al., 2007; Krishnappan and Lau, 1977; Rutherford, 1994; Baek and Seo, 2008; Yotsukura et al., 1970, Lee and Seo, 2013) برای کانال‌های مستقیم تعیین گردید. این پارامترها شامل سه دسته خصوصیات جریان (u سرعت متوسط جریان، h عمق جریان در پایین دست،  $u_*$  سرعت برشی و g شتاب ثقل)، پارامترهای مربوط به شکل هندسی مقطع و سازه (B عرض سطح آب،  $\theta$  زاویه بازشدگی سرریز، Z ارتفاع لبه قائم سرریز از بستر فلوم) و خصوصیات فیزیکی جریان (جرم مخصوص سیال  $\rho$ ، لزجت دینامیکی سیال  $\mu$ ) مطابق با رابطه (۲) می‌باشند:

$$e_y = f_1(u, u_*, h, \rho, g, \mu, B, \theta, Z) \quad (2)$$

بر اساس مطالعات گذشته و با استفاده از آنالیز ابعادی رابطه (۲) می‌تواند به‌صورت رابطه بی‌بعد (۳) نوشته شود:

## ۲-۴- تزریق ماده ردیاب

برای محاسبه ضریب اختلاط عرضی، ماده ردیاب باید به صورت نقطه‌ای و دائمی تزریق شود (Hamidifar et al., 2015; Saadatpour et al., 2011, etc.). به این منظور از یک نازل L- شکل به قطر داخلی ۲ میلی‌متر که در مرکز جریان و در فاصله ۲/۵ متری در پایین دست آرام‌کننده جریان در ابتدای فلوم (جایی که جریان توسعه یافته باشد) قرار دارد، استفاده شد (شکل ۲). ماده‌ی ردیاب استفاده شده در این پژوهش، محلول آب-نمک و پودر پرمنگنات پتاسیم برای رنگی شدن آن (بنفش‌رنگ) انتخاب شد (Beladi and Shafai Bejestan, 2018; Hamidifar et al., 2015, etc.). برای ثابت نگه داشتن دبی تزریق ردیاب، از یک سامانه تزریق متشکل از یک مخزن پلاستیکی ۶۰ لیتری مدرج در تراز بالاتری از فلوم، همزن برقی، پمپ آکواریم، لوله‌های فلزی و پلاستیکی و شیرآلات استفاده گردید. همچنین بر روی لوله انتقال ردیاب از مخزن به نازل، یک عدد شیر قطع و وصل برای تنظیم دبی تزریق (که با روش حجمی تعیین شده) نصب شد. برای اندازه‌گیری غلظت ماده‌ی ردیاب در طول فلوم، از دستگاهی شامل ۵ ردیف در طول فلوم و هر ردیف دارای ۷ تیغه در عرض فلوم بافاصله‌های ۱۰ سانتی‌متری از یکدیگر و از دیواره کانال، که هر کدام از این تیغه‌ها، غلظت را در ۵ نقطه از عمق جریان (در مجموع در هر مقطع عرضی ۳۵ گره) اندازه‌گیری می‌کند، استفاده شد (شکل ۳). این دستگاه قادر بود غلظت را در ۱۷۵ گره (۵ مقطع عرضی \* ۳۵ گره) در طول اندازه‌گیری و با فرمت Excel در رایانه متصل به آن ذخیره کند.

بر اساس نظر Mugnier (1995) کامل شدن اختلاط عمقی برای بررسی اختلاط عرضی و انتشار طولی ضروری است. از این رو با انجام آزمایش‌های مقدماتی و اندازه‌گیری‌های اولیه مشاهده شد که اختلاط کامل عمقی برای همه آزمایش‌ها، در فاصله‌ی ۱ متری از محل تزریق اتفاق می‌افتد.

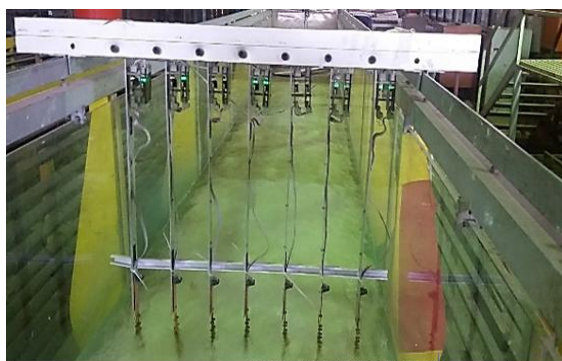


Fig. 3- Concentration measurement device  
شکل ۳- دستگاه غلظت سنج

پایاب جریان برابر است) در آزمایشگاه مطابق با شکل ۲، طراحی و در فاصله‌ی ۳ متری از آرام‌کننده‌ی ابتدایی فلوم نصب شد. همچنین شیب بازوها و زاویه آن‌ها با دیواره فلوم به ترتیب ۵٪ و ۳۰ درجه طراحی گردید.

برای مقایسه و بررسی عملکرد سرریز U-شکل، از یک سرریز لبه تیز مستطیلی شکل ساده نیز استفاده شد. ارتفاع سرریز مستطیلی شکل به گونه‌ای تعیین شد که میزان استغراق آن (اختلاف عمق آب قبل از سرریز و بعد از آن) با سرریز U-شکل تقریباً یکسان باشد. این موضوع بدین معنی است که در دبی‌های یکسان و حالت‌های مشابه جریان، هد آب تشکیل شده روی سرریز مستطیلی شکل حدوداً برابر با عمق آب عبوری از سرریز U-شکل است. بدین ترتیب با انجام آزمایش‌های اولیه و با آزمون و خطا ارتفاع سرریز مستطیلی شکل، ۱۲ سانتی‌متر تعیین شد. همچنین مشابه با سرریز U-شکل عرض سرریز مستطیلی شکل برابر با ۸۰ سانتی‌متر و ضخامت ۱ میلی‌متر انتخاب شد. این سازه در فاصله ۳ متری از آرام‌کننده (محل قرارگیری گلوگاه سرریز U-شکل) مطابق با شکل ۱، نصب شد.

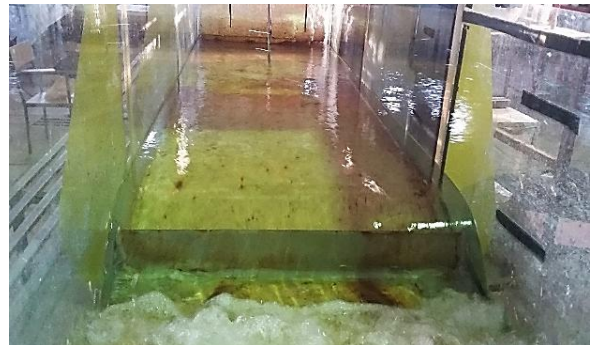


Fig. 1- Designed rectangular weir in the flume  
شکل ۱- سرریز مستطیلی شکل طراحی شده در فلوم



Fig. 2- Tracer injection in the upstream  
شکل ۲- تزریق ماده ردیاب در بالادست جریان

شده است) و R شعاع هیدرولیکی می‌باشد.

### ۳- نتایج و بحث

#### ۳-۱- الگوی توزیع عرضی ماده ردیاب

در شکل ۵، نمودار غلظت بی‌بعد ( $C_i/C_{max}$ ) ماده ردیاب، در برابر عرض بی‌بعد فلووم ( $Y:Y/B$ )، فاصله عرضی از دیواره فلووم و B، عرض فلووم) برای هر ۳ حالت و در دبی ۵۵ (lit/s) ترسیم گردید. توزیع غلظت در مقطع اول برای هر سه حالت که در فاصله طولی ۲ متری از محل تزریق است، به گونه‌ای است که نشان می‌دهد تمرکز غلظت در مرکز فلووم است و جریان در نزدیک دیواره‌های فلووم غلظت کمی دارد، در واقع هنوز غلظت به‌طور یکنواخت در عرض فلووم پخش نشده است. اما در مقطع ۲ تا مقطع ۵، مشاهده شد که اختلاف غلظت بین مرکز و کناره‌های فلووم به سمت کمتر شدن میل می‌کند و این به معنی یکنواخت‌تر شدن پخش عرضی در فلووم است.

با توجه به شکل ۵-الف که مربوط به حالت بدون سرریز است، مشاهده می‌شود علاوه بر اینکه پخش غلظت در مقاطع عرضی به‌خوبی انجام نشده است در تمامی مقاطع آن، تمرکز غلظت در میانه فلووم ( $Y/B=0.5$ ) به‌طور واضح دیده می‌شود، همچنین تقریباً میزان غلظت در میانه‌ی فلووم در مقطع ۵ کاهش چشمگیری نسبت به مقطع ۱، نداشته است که دلیل این امر می‌تواند جریان نسبتاً یکنواخت و بدون آشفته‌گی باشد. در شکل ۵-ب که مربوط به سرریز مستطیلی شکل است، اختلاف ماکزیمم منحنی در مرکز فلووم ( $Y/B=0.5$ ) و کناره‌های آن ( $Y/B=0.1, 0.7$ ) در مقطع ۵، نسبت به حالت بدون سرریز کمتر است که نشان‌دهنده یکنواختی بیشتر پخش غلظت در اثر وجود سرریز مستطیلی شکل می‌باشد.

بالین وجود برای حصول اطمینان بیشتر، اولین مقطع اندازه‌گیری غلظت در فاصله ۲ متری از محل تزریق و مقاطع بعدی در فواصل ۳، ۴، ۵ و ۶ متری از محل تزریق انتخاب شدند (شکل ۴). بدین ترتیب آزمایش‌ها در دبی‌های ۳۵ و ۵۵ (lit/s) و برای سه حالت ۱- بدون سرریز؛ ۲- سرریز مستطیلی شکل و ۳- سرریز U-شکل انجام گردید.

#### ۲-۵- اندازه‌گیری سرعت جریان

اندازه‌گیری مؤلفه‌های سه‌بعدی سرعت جریان به کمک یک دستگاه سرعت‌سنج الکترومغناطیسی در پایین دست جریان انجام شد. قسمت سخت‌افزاری این دستگاه شامل سنسور، مبدل، سیم تخلیه بار الکتریکی، سیم‌ها و کابل‌های رابط است. ذخیره و پردازش داده‌های اندازه‌گیری شده به‌وسیله نرم‌افزار اختصاصی دستگاه که بر روی یک دستگاه رایانه نصب گردیده بود، انجام پذیرفت. همچنین نصب سرریز در فلووم سبب افزایش تنش برشی و سرعت برشی می‌شود که مقادیر آن‌ها از فرمول‌های (۵) تا (۹) به دست می‌آید:

$$\tau_{bx} = \frac{\rho g}{c^2} U \sqrt{U^2 + V^2} \quad (5)$$

$$\tau_{by} = \frac{\rho g}{c^2} V \sqrt{U^2 + V^2} \quad (6)$$

$$\tau_b = \sqrt{\tau_{bx}^2 + \tau_{by}^2} \quad (7)$$

$$u_* = \sqrt{\frac{\tau_b}{\rho}} \quad (8)$$

$$C = \frac{1}{n} R^{\frac{1}{6}} \quad (9)$$

$\tau_{bx}$  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. g و  $\rho$  به ترتیب ضریب گرانش زمین و جرم مخصوص سیال، C ضریب شزی،  $n=0.011$  ضریب مانینگ (کف فلووم از صفحات جنس PVC پوشیده

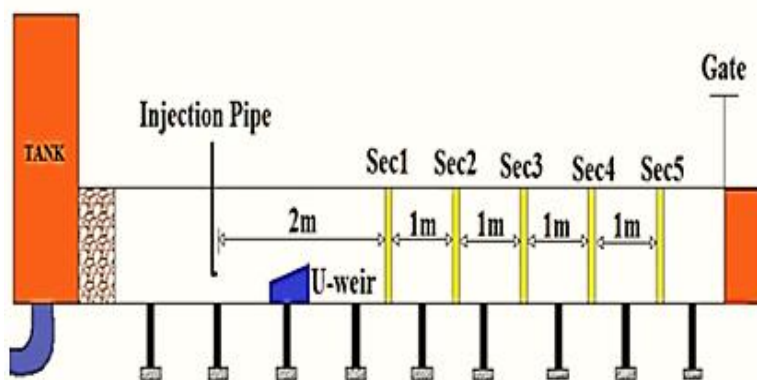


Fig. 4- Concentration measurement at 5 different sections in the downstream of the tracer injection

شکل ۴- اندازه‌گیری غلظت در ۵ مقطع مختلف در پایین دست محل تزریق

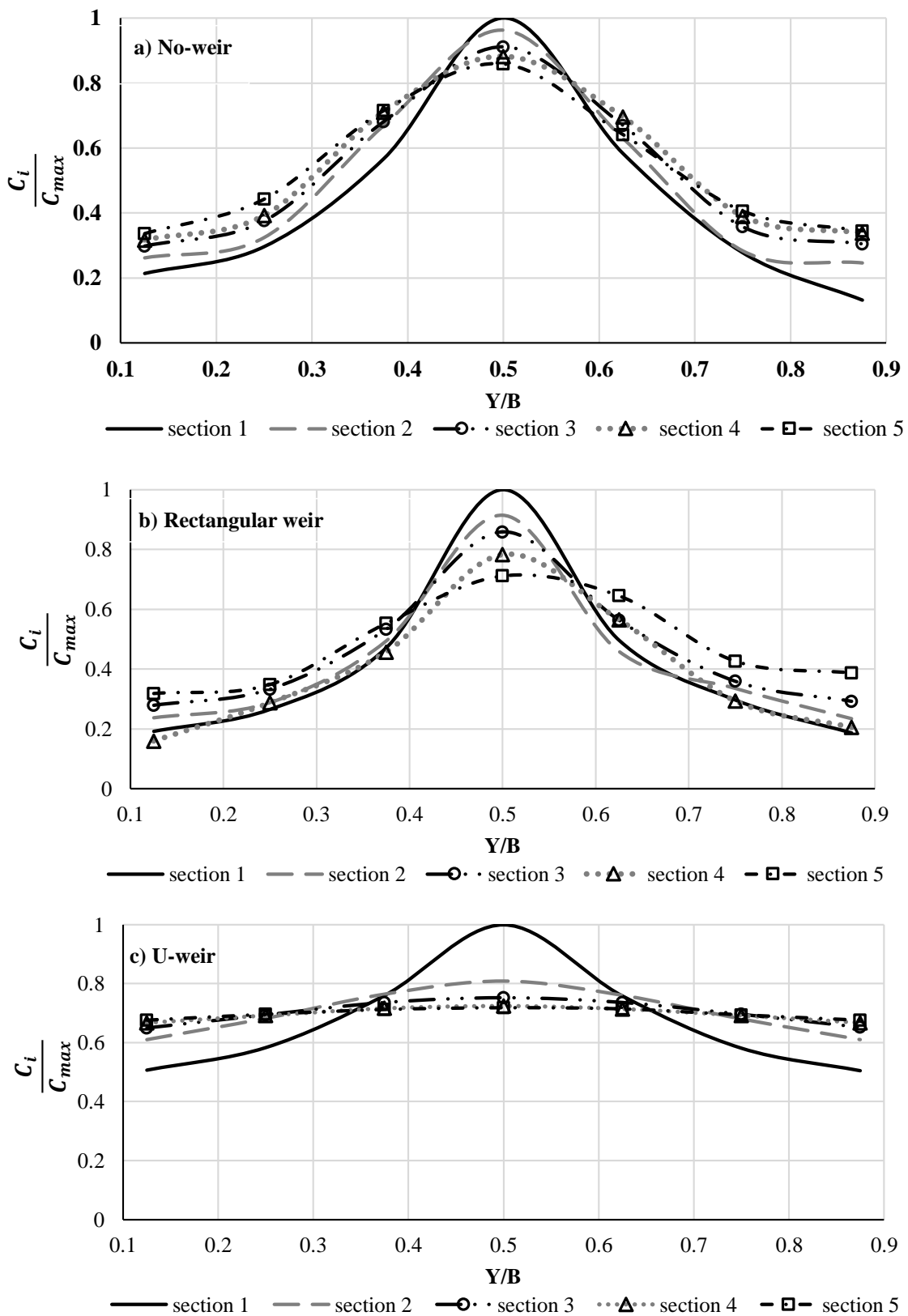


Fig. 5- Variation of dimensionless tracer concentration at the sections in the downstream of the tracer injection for discharge of 55 lit/s

شکل ۵- تغییرات غلظت بی بعد ردیاب در مقاطع عرضی در پایین دست محل تزریق در دبی ۵۵ (lit/s)

(۱۱) محاسبه شد (Mahmoodian Shooshtari, 2009):

$$\sigma = \frac{\sum c_i * z_i^2}{\sum c_i} \quad (11)$$

$c_i$  مقدار غلظت هر نقطه که حاصل اختلاف غلظت قبل و بعد از تزریق است،  $z_i$  فاصله‌ی عرضی هر نقطه نسبت به مرکز فلوم و  $\sigma$  واریانس توزیع غلظت در هر مقطع می‌باشد. مقادیر واریانس توزیع غلظت برای هر مقطع نسبت به فاصله طولی آن‌ها از محل تزریق در یک نمودار رسم شد، تا شیب خط برازش بر داده‌های واریانس برای هر آزمایش به دست آید. شکل ۶ نحوه تعیین شیب واریانس را برای آزمایش مربوط به سرریز مستطیلی در دبی جریان ۵۵ (lit/s) نشان می‌دهد. بدین ترتیب ضریب اختلاط عرضی از رابطه (۱۰) محاسبه شد و سپس با استفاده از رابطه (۱)، طول اختلاط محاسبه گردید. در جدول ۱ مقادیر ضریب اختلاط عرضی، برای آزمایش‌های شاهد، سرریز مستطیلی شکل و سرریز U-شکل، آورده شده است.

نتایج جدول ۱ نشان می‌دهد که در تمامی حالات، افزایش دبی جریان باعث افزایش ضریب اختلاط عرضی شده است. همچنین درصد تغییرات ضریب اختلاط عرضی در اثر وجود سرریز مستطیلی ۱۹/۵٪ تا ۵۳/۱٪ و در اثر سرریز U-شکل ۱۱۲٪ درصد تا ۷۷۷ درصد نسبت به حالت بدون سرریز است.

اما این سرریز در مقایسه با سرریز U-شکل میزان یکنواختی کمتری را در پخش غلظت نشان داد. شکل ۵-ج نشان می‌دهد که اثر سرریز U-شکل بر کاهش غلظت ماده ردیاب در مرکز فلوم ( $Y/B=0.5$ ) و افزایش غلظت در کناره‌های فلوم ( $Y/B=0.1, 0.7$ ) نسبت به حالت بدون سرریز و سرریز مستطیلی شکل بیشتر بوده است. همچنین نتایج نشان داد که در آزمایش‌های مربوط به سرریز U-شکل، غلظت در انتهای فلوم (مقطع ۵) به‌طور نسبتاً یکنواخت پخش شده و نمودار تغییر غلظت بی‌بعد آن، تقریباً به‌صورت خطی درآمده است.

### ۲-۳- محاسبه ضریب اختلاط عرضی

برای تعیین ضریب اختلاط عرضی از روش تبادل ممان ساده (استاندارد) استفاده شد (Sayre and Chang, 1968). بنابراین با محاسبه واریانس غلظت و سرعت متوسط جریان، ضریب اختلاط عرضی از رابطه (۱۰) قابل محاسبه است:

$$e_y = \frac{U_{ave}}{2} \frac{d\sigma_y^2}{dx} \quad (10)$$

در این رابطه  $U$  سرعت متوسط جریان (cm/s)،  $\frac{d\sigma_y^2}{dx}$  شیب خط برازش بر داده‌های واریانس غلظت در عرض فلوم،  $x$  نشان‌دهنده فاصله از محل تزریق و  $e_y$  ضریب اختلاط عرضی در جهت عرض فلوم ( $y$ ) است. واریانس توزیع غلظت با استفاده از داده‌های موجود، توسط رابطه

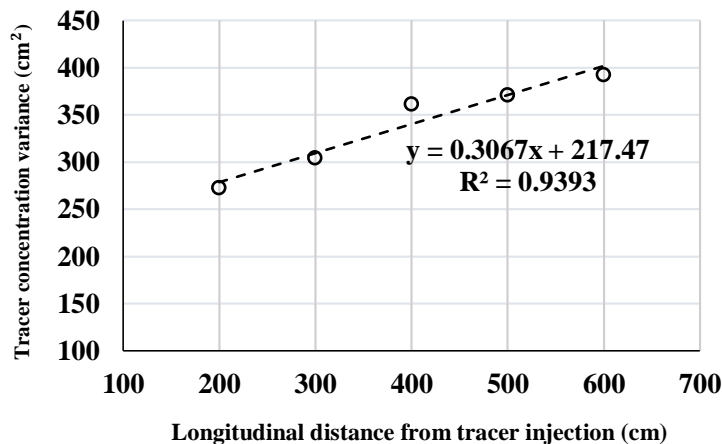


Fig. 6- Tracer concentration variance for Rectangular weir for discharge of 55 lit/s  
شکل ۶- واریانس غلظت ردیاب در سرریز مستطیلی شکل با دبی ۵۵ (lit/s)

Table 1- Transverse mixing coefficient for the experiments

جدول ۱- ضریب اختلاط عرضی در آزمایش‌ها

Discharge (lit/s)	Transverse mixing coefficient (cm²/s)			Variation of increasing the transvers mixing coefficient of the weirs compared to no-weir	
	No-weir	Rectangular weir	U- weir	Rectangular weir	U- weir
35	2.9	3.5	35.6	19.5%	1127%
55	4.9	7.5	43	53.1%	777%

Sharma & Ahmad (2012) نیز با قرار دادن چندین ردیف از صفحات مستغرق در کانال‌های مستقیم، ضریب  $e_y/hu_*$  را تا  $1/697$  به دست آوردند. نتایج به دست آمده نشان می‌دهد که سرریز U-شکل با ایجاد جریان‌های ثانویه به خوبی توانسته است در یک کانال مستقیم، الگوی جریانی مشابه با یک کانال مئاندری به وجود آورد که سبب افزایش ضریب اختلاط عرضی شده است.

### ۳-۳- طول اختلاط

نتایج مربوط به طول اختلاط که از رابطه (۱) محاسبه شد و همچنین مقایسه درصد تغییرات طول اختلاط در اثر وجود سرریزها نسبت به حالت بدون سرریز به شرح جدول ۳ می‌باشد. نتایج نشان می‌دهد که طول اختلاط در اثر سرریز مستطیلی شکل  $17/3\%$  تا  $34/7\%$  نسبت به حالت بدون سرریز کاهش یافته است، اما تأثیر آن بر کاهش طول اختلاط از سرریز U-شکل که به مقدار  $88/6\%$  تا  $91/1\%$  نسبت به حالت بدون سرریز برآورد شده، کمتر است.

مقایسه ضریب بی‌بعد اختلاط عرضی ( $e_y/hu_*$ ) در برابر  $u/u_*$  به دست آمده از آزمایش‌های شاهد و سرریز مستطیلی شکل با نتایج سایر محققین، در شکل ۷ آورده شده است.

تغییرات ضریب بی‌بعد اختلاط عرضی در آزمایش‌های ذکر شده از  $0/14$  تا  $0/16$  متغیر و مطابق با محدوده تغییرات به دست آمده توسط Rutherford (1994) در کانال‌های مستقیم است. نتایج نشان داد که در اثر سرریز مستطیلی شکل، سرعت برشی موضعی در فاصله کوتاهی پس از سرریز، ایجاد شده که تأثیر چندانی در پخش ردیاب تا انتهای فلوم نداشته است. به همین دلیل  $u/u_*$  در اثر سرریز مستطیلی شکل از آزمایش شاهد کمتر است ولی مقادیر  $e_y/hu_*$  در هر دو آزمایش به هم نزدیک است.

پس از محاسبه  $e_y/hu_*$  برای سرریز U-شکل، مشاهده شد که مقادیر به دست آمده در محدوده تغییرات  $e_y/hu_*$  مربوط به کانال‌های مئاندری شکل قرار دارد (جدول ۲). البته

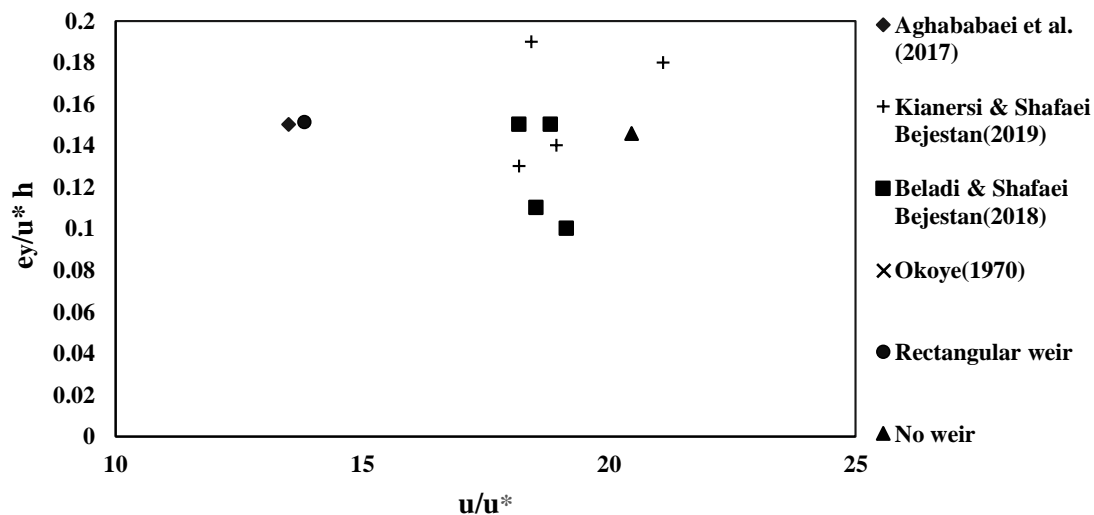


Fig. 7- Comparison of the  $e_y/hu_*$  with other researchers in straight channels

شکل ۷- مقایسه  $e_y/hu_*$  به دست آمده با دیگر محققین در کانال‌های مستقیم

Table 2- Comparison of the Transverse mixing coefficient obtained by different researchers

جدول ۲- مقایسه ضریب اختلاط عرضی به دست آمده توسط محققین مختلف

Experiment	Channel	$e_y/hu_*$
This study (U-weir)	Straight	0.73-0.77
Rutherford (1994)	Meandering	0.3-0.9
Baek & Seo (2008)	Meandering	0.11-1.13
Baek & Seo (2011)	Meandering	0.31-2.46
Sharma & Ahmad (2012)	Straight	0.143-1.697
Lee and Seo (2013)	Meandering	0.04-0.88
Aghababaei et al. (2017)	Meandering	0.12-2.14



(lit/s) مشاهده می‌شود، می‌توان گفت در دبی ۵۵ (lit/s) با افزایش قابل توجه سرعت جریان نزدیک شونده (عمق ثابت بوده)، گردابه‌های بیشتری شکل گرفته است. لیکن با دور شدن از سرریز در این دبی، تعداد گردابه‌های عرضی با دبی ۳۵ (lit/s) مساوی است. البته فشردگی خطوط هم‌سرعت در دبی ۵۵ (lit/s) نشان می‌دهد که از قدرت یا انرژی بیشتری برخوردار هستند که باعث افزایش ضریب انتشار عرضی در مقایسه با دبی ۳۵ لیتر بر ثانیه می‌شود و با اندازه‌گیری‌های غلظت ماده ردیاب نیز انطباق دارد.

سرریز U-شکل با سه عملکرد یعنی الف) متمرکز کردن جریان از کناره‌های کانال، ب) هدایت جریان نزدیک بستر از ساحل بیرونی به طرف میانه فلوم و ج) هدایت جریان سطح آب از میانه فلوم به طرف ساحل بیرونی، باعث ایجاد جریان‌های چرخشی در کل عرض فلوم می‌شود که اختلاط ماده آلاینده را بهبود می‌بخشد. شکل‌های مربوط به مقطع ۵ برای هر دو دبی نشان می‌دهد که خطوط جریان تا انتهای فلوم به صورت چرخشی بوده که این خود، نشان‌دهنده توانایی پخش مواد در عرض فلوم است. بنابراین با توجه به وجود مؤلفه‌های سرعت عرضی، پخش عمده‌ای از مواد به صورت جابه‌جایی و انتشار در عرض فلوم منتقل شده که این امر منجر به یکنواختی پخش ماده ردیاب در عرض کانال در فاصله نسبتاً کوتاهی از محل نصب سرریز می‌گردد.

علت این امر می‌تواند ایجاد جریان‌های ثانویه و آشفتگی در پایین دست سرریز U-شکل باشد، در صورتی که در پایین دست سرریز مستطیلی شکل فقط آشفتگی و تلاطم وجود دارد. Albers and Steffler (2007) نشان دادند ایجاد جریان‌های ثانویه نسبت به وقتی که فقط آشفتگی در جریان وجود دارد، می‌تواند بر افزایش ضریب اختلاط عرضی و در نتیجه کاهش طول اختلاط تأثیر بیشتری داشته باشند که نتایج تحقیق حاضر در این موضوع، با مشاهدات آن‌ها مطابقت دارد.

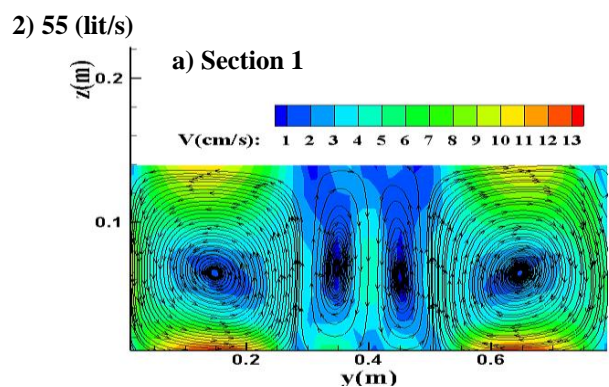
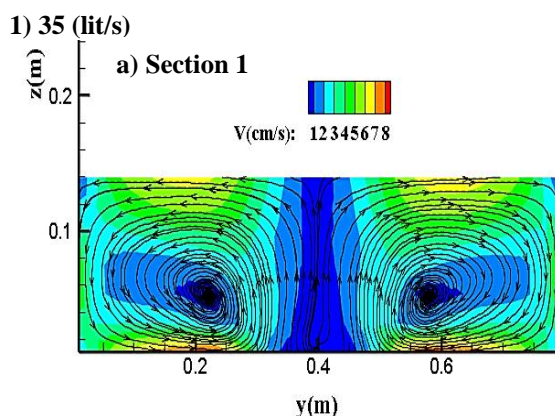
### ۳-۴- بررسی الگوی جریان

جهت بررسی تأثیر سرریز U-شکل در کاهش شدید طول اختلاط، الگوی سه‌بعدی جریان در مقاطع پائین دست سرریز بررسی گردید. همان‌گونه که قبلاً بیان شد، مؤلفه‌های سه‌بعدی سرعت با دستگاه سرعت‌سنج الکترومغناطیسی برداشت شد. اندازه‌گیری‌ها در پنج مقطع عرضی (مطابق با شکل ۴) که هر مقطع شامل پنج محور قائم است و در هر محور قائم، سه نقطه در عمق (به دلیل محدودیت‌های دستگاه) می‌باشد، انجام شد. شکل ۸ نشان‌دهنده الگوی جریان در ۵ مقطع پایین دست سرریز U-شکل در دبی‌های ۳۵ و ۵۵ (lit/s) است که در نرم‌افزار تک پلات ترسیم شده است. در این نمودارها خطوط هم‌سرعت در مقطع عرضی (اندازه بردار سرعت در جهت عرض و عمق جریان) نشان داده شده، که محور افقی عرض فلوم و محور عمودی عمق جریان است. با مقایسه آنچه که در مقاطع ۱ و ۲ در دبی‌های ۳۵ و ۵۵

Table 3- Comparison of the mixing lengths of the weirs

جدول ۳- مقایسه طول اختلاط سرریزها

Discharge (lit/s)	Mixing length (m)			Variation of decreasing the mixing length of the weirs compared to no-weir	
	No-weir	Rectangular weir	U- weir	Rectangular weir	U- weir
35	69.08	57.14	5.62	17.3%	91.9%
55	64.14	41.9	7.31	34.7%	88.6%



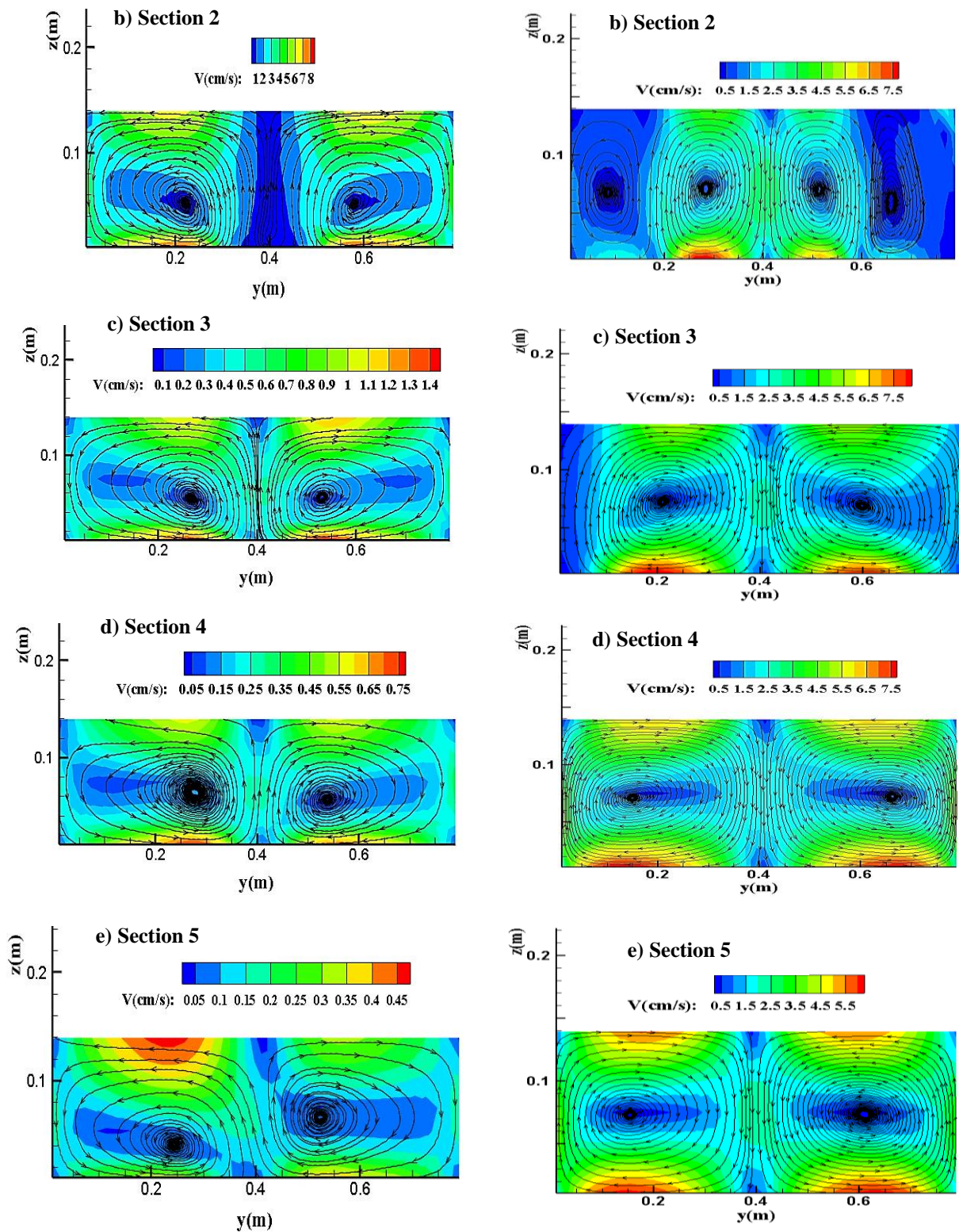


Fig. 8- Flow pattern in the U-weir's downstream for discharges of 35 and 55 lit/s  
 شکل ۸- الگوی جریان در پایین دست سرریز U-شکل در دبی ۳۵ و ۵۵ (lit/s)

#### ۴- جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

امروزه توجه محققین محیط‌زیست به ارائه راهکارهایی برای پخش و انتشار سریع‌تر آلاینده‌ها در فاصله کوتاهی از منبع آلودگی جلب شده است. به همین سبب انجام تحقیقات مختلف در زمینه افزایش ضریب اختلاط عرضی آلاینده‌ها موردتوجه قرار گرفته است. براساس پژوهش‌های پیشین، انحنا و قوس در کانال‌ها سبب افزایش ضریب اختلاط عرضی نسبت به کانال‌های مستقیم به علت ایجاد جریان‌های ثانویه می‌شود. نویسندگان در پژوهش حاضر به بررسی آزمایشگاهی عملکرد سرریزهای مستطیلی و U-شکل و همچنین تأثیر آنها بر ضریب اختلاط عرضی و طول اختلاط در یک کانال مستقیم مستطیلی شکل پرداختند. در آزمایش‌ها غلظت ماده ردیاب در طول فلووم توسط یک دستگاه غلظت‌سنج، اندازه‌گیری و با استفاده از روش تبادل ممان استاندارد، ضریب اختلاط عرضی محاسبه گردید.

نتایج این پژوهش نشان داد که در همه حالت‌ها افزایش دبی و سرعت جریان بر افزایش ضریب اختلاط عرضی مؤثر است. در آزمایش‌های سرریز مستطیلی شکل با افزایش دبی از ۳۵ تا ۵۵ (lit/s)، ضریب اختلاط عرضی از ۱۹/۵٪ تا ۵۳/۱٪ نسبت به حالت بدون سرریز افزایش و طول اختلاط ۱۷/۳٪ تا ۳۴/۷٪ نسبت به حالت بدون سرریز کاهش یافته است. همچنین در حالت حضور سرریز U-شکل با تغییر دبی از ۳۵ تا ۵۵ (lit/s)، افزایش ضریب اختلاط عرضی از ۱۱۲۷ درصد تا ۷۷۷ درصد و کاهش طول اختلاط به مقدار ۹۱/۹٪ تا ۸۸/۶٪ نسبت به حالت بدون سرریز، مشاهده شد. ضریب اختلاط عرضی نیز در حضور سرریز U-شکل نسبت به سرریز مستطیلی شکل، افزایش ۵/۷ تا ۱۰/۱ برابری داشته و طول اختلاط در این حالت، تقریباً ۰/۱ برابر کاهش یافته است. محدوده تغییرات ضریب بی‌بعد اختلاط عرضی ( $e_p/hu_*$ ) در حضور سرریز U شکل در کانال مستقیم، ۰/۷۳ تا ۰/۷۷ به دست آمد که این نتایج مطابق با مقادیر ضریب بی‌بعد اختلاط عرضی برای کانال‌های مئاندری است که توسط Rutherford (1994) استخراج شده است. این نکته نشان می‌دهد که این سرریز می‌تواند در یک کانال مستقیم، الگوی جریانی به وجود آورد که مشابه با الگوی جریان در یک کانال مئاندری شکل باشد که نتیجه این امر افزایش ضریب اختلاط عرضی است. همچنین الگوی جریان در پایین‌دست سرریز U-شکل، اثر این سازه را بر ایجاد جریان‌های چرخشی قوی در عرض کانال تا مسافت قابل‌توجهی در پایین‌دست جریان، نشان می‌دهد. به‌طورکلی می‌توان نتیجه گرفت که جریان‌های ثانویه و تلاطم ایجادشده توسط سرریز U-شکل بر شدت بخشیدن فرآیند پخش و اختلاط مواد و همچنین تغییرات ضریب اختلاط عرضی تأثیر بسزایی داشته و در واقع هدف اصلی پژوهش حاضر را که ایجاد

گردابه‌ها و جریان‌های ثانویه در کانال مستقیم بوده را به واقعیت نزدیک می‌کند. به‌عنوان مثال به ازای دبی ۳۵ (lit/s)، ضریب اختلاط عرضی ۱۲/۲ برابر حالتی است که هیچ سازه‌ای در مسیر جریان وجود ندارد.

#### ۵- تشکر و قدردانی

این تحقیق با حمایت مالی از محل پژوهانه نویسنده دوم (شماره ۱۴۹۰۹/۰۵/۳/۹۸) انجام شده است که بدین‌وسیله از معاونت پژوهشی دانشگاه شهید چمران اهواز قدردانی می‌شود.

#### ۶- مراجع

- Albers C, Steffler P (2007) Estimating transverse mixing in open channels due to secondary current-induced shear dispersion. *Journal of Hydraulic Engineering* 133(2):186-196
- Beladi Y, Shafai Bejestan M (2018) Investigation of the effect of number of submerged vanes on transverse mixing coefficient in a rectangular channel. *Iranian Journal of Irrigation and Drainage* 11(6):999-1008 (In Persian)
- Fischer H B, List E J, Koh R C Y, Imberger J, Brooks N H (1979) *Mixing in inland and coastal waters*. Academic Press, 302p
- Hamidifar H, Omid M H, Keshavarzi A (2015) The effect of vegetation submerged and non-submerged flood zone on transverse mixing coefficient. *Hydraulic Journal* 10(1):13-23 (In Persian)
- Kianersi N, Shafai Bejestan M (2018) Variation of transverse mixing pollutants in a straight channel with and without submerged vanes. *Irrigation and Drainage Structures Engineering Research* 19(72):101-114 (In Persian)
- Kurdistani S M, Pagliara S (2017) Experimental study on cross-vane scour morphology in curved horizontal channels. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering* 143(7):04017013
- Mansouri Kargar S, Shafai Bejestan M (2018) Investigation of the distribution pattern of tracer concentration influenced by U-shaped Cross-Vane. In: 17th Iran National Hydraulic Conference, 4-6 Sep, Shahrekord, Iran (In Persian)
- Mugnier C (1995) Experimental study of the influence of vegetation on longitudinal dispersion. Master Dissertation, Massachusetts Institute of Technology, USA, 82p

- streams. International Conference on Environmental Research (ICER-2012). University of Terengganu, Kuala Terengganu, Malaysia
- Yabbarehpour E, Shafai Bejestan M, Kashefipour S M (2019) Effect of triangular vanes on mixing length and transverse mixing coefficient in straight Channel. *Journal of Water and Soil Science* 22(4):189-197 (In Persian)
- Zebardast S, Tabatabaei S H, Abbasi F, Heidarpour H and Hosseinipour E Z K (2015) Analysis of complete mixing length in a non-rectangular channel. P, (1998-2003). *World Environmental and Water Resources Congress Floods, Droughts, and Ecosystems*
- Perucca E, Camporeale C, Ridolfi L (2009) Estimation of dispersion coefficient in rivers with riparian vegetation. *Advance in Water Resource* 32(1):78-87
- Rosgen D L (2001) The cross-vane, W-weir and J-hook vane structures, their description, Design and Application for Stream Stabilization and River Restoration. *Wetlands Engineering & River Restoration*
- Saadatpour A, Heidarpour M, Pourabadei M (2011) Choosing the right method for reducing the mixing length in turbulent flow in a rectangular shape channel. *Iranian Water Researches Journal* 5(9):11-18 (In Persian)
- Sharma H, Ahmad Z (2012) A new technique for enhancing transverse mixing of pollutants in