

تغییرات اختلاط عرضی ردیاب در کانال مستقیم با و بدون صفحه مستغرق

نیلوفر کیان‌ارثی^{۱*}، محمود شفاعی بجمستان^۲

۱ و ۲- به ترتیب: دانشجوی کارشناسی ارشد سازه‌های آبی؛ و استاد گروه سازه‌های آبی، دانشگاه شهید چمران، اهواز، ایران
تاریخ دریافت: ۹۶/۶/۲۸؛ تاریخ پذیرش: ۹۶/۱۱/۲۸

چکیده

با ورود مواد به داخل کانال‌ها و رودخانه‌ها و طی فاصله طولی مشخص، که به آن طول اختلاط گفته می‌شود، این مواد بر اثر عواملی چون حرکت مولکولی، تلاطم و توزیع غیر یکنواختی سرعت، در کل مقطع جریان توزیع می‌شوند. در طرح‌های متعدد کاهش این طول یکی از اهداف است که برای رسیدن به آن روش‌هایی مختلف وجود دارد که یکی از آنها افزایش ضریب اختلاط عرضی است. در این مطالعه، اثر کاربرد صفحات مستغرق، سازه‌هایی مستطیلی در بستر کانال با زاویه‌ای مشخص نسبت به جریان، در افزایش ضریب اختلاط عرضی در فلوم مستطیلی مستقیم بررسی شده است. آزمایش‌ها در چهار دبی متفاوت در حالت با و بدون سازه اجرا شده است. محلول نمکی، به‌عنوان ماده ردیاب، از مرکز کانال با دبی ثابت وارد شد و میزان شوری جریان در چهار ایستگاه در پایین‌دست محل ردیاب به کمک سنسورهای EC سنج برداشت گردید. نتایج بررسی نشان داد که صفحات مستغرق نصب شده، ضریب اختلاط عرضی را در دبی‌های مختلف از ۱/۵ تا ۱/۷ برابر افزایش می‌دهند. بررسی‌ها همچنین نشان می‌دهد افزایش دبی در حالت شاهد ضریب اختلاط عرضی را ۲/۴ برابر و افزایش دبی در حالت با سازه ضریب اختلاط عرضی را تا ۲/۵ برابر افزایش می‌دهد. به‌طور کلی نتایج نشان‌دهنده تأثیر قابل توجه صفحات مستغرق بر ضریب اختلاط عرضی است.

واژه‌های کلیدی

تلاطم جریان، صفحات مستغرق، ضریب اختلاط عرضی

مقدمه

ورودی به‌طور کامل در عرض کانال اختلاط پیدا کردند، جریان‌های برشی طولی باعث محو کامل تغییرات طولی غلظت در مجاری روباز می‌شوند، غلظت در تمام سطح مقطع به مقدار ثابت می‌رسد و اختلاط کامل خواهد شد (Fischer, 1979). تعیین فاصله بین نقطه ورود آلاینده به رودخانه تا نقطه‌ای که غلظت آلاینده کم شود و به حد قابل قبولی برسد، اهمیت دارد. در خصوص اختلاط عرضی، تا کنون تحقیقات زیادی شده است از جمله می‌توان به بررسی اثر پوشش گیاهی مستغرق و غیرمستغرق بر ضریب اختلاط عرضی اشاره کرد که حمیدی‌فر و همکاران (Hamidifar et al., 2015) به‌انجام رسانده‌اند. آنها در

بحران آب ناشی از آلودگی که معمولاً به‌دلیل رهاسازی آلاینده‌ها در آب‌های سطحی است، استفاده از فرایندهای اختلاط و رقیق‌سازی آلودگی را به‌منظور بازیابی آب‌های آلوده و امکان استفاده مجدد از آنها ضروری ساخته است. وقتی آلاینده به‌صورت نقطه‌ای وارد جریان می‌شود در مرحله اول دو عامل، یکی مومنتم اولیه و دیگری شناوری جریان باعث رقیق‌سازی اولیه می‌شوند؛ در مرحله بعد وقتی آلاینده در حال پخش شدن در عرض مقطع است، آشفتگی و جریان‌های ثانویه ناشی از آن باعث اختلاط می‌شود؛ و در مرحله پایانی وقتی آلاینده‌های

در فلوم مستطیلی به عرض ۱ و طول ۱۹ متر و با قرار دادن یک تا چهار ردیف ۹ تایی از صفحاتی با زاویه ۳۰ درجه، تأثیر تعداد ردیف صفحات مستغرق را بر ضریب اختلاط عرضی بررسی کردند، آنها آزمایش‌ها را در عمق ثابت ۱۰/۳۳ سانتی‌متر و با سازه‌هایی با ابعاد ۴×۱۰ سانتی‌متر دنبال و از ماده رودامین به‌عنوان ماده ردیاب استفاده کردند و با محاسبه تغییرات غلظت به روش عکس‌برداری و دیجیتالیز کردن آن متوجه افزایش ۲ تا ۱۱ برابری اختلاط عرضی در حضور صفحات، نسبت به حالت بدون صفحات، شدند.

قاسمی و همکاران (Ghasemi *et al.*, 2012) اثر ارتفاع تاج تلماسه بر ضریب اختلاط عرضی را روی ۱۰ تلماسه با شیب بالادست ۲۸ درجه آزمایش کردند و متوجه افزایش اختلاط ۳/۱۹ برابر با وجود تلماسه‌ها شدند. بیک و سئو (Baek & Seo, 2011) اختلاط عرضی را در کانال قوسی بررسی کردند و نشان دادند که به‌دلیل وجود جریان‌های ثانویه، اختلاط عرضی به‌میزان زیادی افزایش می‌یابد. در همین زمینه، بکزال و همکاران (Boxall *et al.*, 2003) با مطالعه روی انحنای کانال‌های طبیعی نتیجه گرفتند که اختلاط عرضی رابطه‌ای مستقیم با انحنای کانال‌ها دارد و پراکندگی ارتباطی به‌صورت چرخشی با هندسه انحنای کانال دارد.

برای تعیین طول اختلاط کامل در مجاری روباز فیشر و همکاران (Fischer *et al.*, 1979) رابطه ۱ را در شرایط تزریق ماده ردیاب در مرکز کانال ارائه کردند:

$$L = 0.1 \frac{U W^2}{e_z} \quad (1)$$

که در آن،

L = طول اختلاط کامل (متر)؛ U = سرعت متوسط جریان (متر بر ثانیه)؛ w = عرض کانال روباز (متر)؛ و e_z = ضریب اختلاط عرضی جریان.

فلومی به پهنای ۴۵ سانتی‌متر و طول ۱۸ متر برای سه تراکم پوشش گیاهی و سه عمق نسبی به آزمایش‌هایی دست زدند و به‌منظور تشخیص اولین مقطع اندازه‌گیری غلظت، محدوده‌ای را به‌صورت چشمی مشاهده کردند که اختلاط کامل در عمق صورت گرفته است؛ این محققان، کمی پایین‌تر از این نقطه را مقطع اول تعیین کردند و غلظت آلاینده را در سه مقطع در طول فلوم اندازه گرفتند. نتایج بررسی‌های این محققان نشان می‌دهد که با افزایش عمق نسبی از ۰/۱۵ به ۰/۲۵، ضریب اختلاط عرضی در پوشش گیاهی مستغرق تا ۹۷ و ۴۵ درصد و در غیرمستغرق تا ۹۱ و ۴۲ درصد به‌ترتیب در سیلاب‌دشت و کانال اصلی افزایش می‌یابد. پورآبادی (Pour-Abadei, 2008) به تأثیر زبری موضعی بر اختلاط عرضی آلاینده در کانالی مستطیلی پرداخت و نشان داد که حضور بلوک می‌تواند تا ۲۴ درصد طول اختلاط را کاهش دهد. سعادت‌پور و همکاران (Saadatpour *et al.*, 2011) نشان دادند که افزایش نسبت عرض به عمق از ۲/۹ به ۵/۶۹ انتقال از طریق جریان‌های ثانویه را افزایش می‌دهد. اووکوی (Okoye, 1970) اختلاط عرضی بر اثر یک منبع نقطه‌ای را در کانال باز یکنواخت بررسی کرد. او با تزریق پیوسته ردیاب مورد استفاده، سدیم کلراید، غلظت‌ها را اندازه‌گیری و ضریب‌های اختلاط عرضی را محاسبه کرد. این محقق نشان داد که ضریب‌های اختلاط عرضی با عمق تغییر می‌کنند و این مقادیر نزدیک سطح آب بزرگ‌تر هستند، همچنین نسبت بی‌بعد اختلاط عرضی ثابت نیست و به نسبت عمق به عرض کانال وابسته است و با افزایش عمق به عرض کانال از ۰/۱۵ به ۰/۰۲، ضریب بی‌بعد اختلاط عرضی از ۰/۲۴ به ۰/۰۹۳ کاهش پیدا می‌کند. پریچ (Prych, 1970) تأثیر فاکتور اصطکاک (پارامتر بی‌بعد زبری بستر) را بر ضریب اختلاط عرضی بررسی کرد و به این نتیجه رسید که این ضریب تأثیری بر ضریب اختلاط عرضی ندارد. شارما و احمد (Sharma & Ahmad, 2012)

ردیف این صفحات بر اختلاط عرضی را بررسی کرده‌اند. از این رو، هدف این مطالعه نیز بررسی کاربرد صفحات مستغرق در شدت جریان‌های متفاوت است. در این مطالعه تأثیر یک ردیف پنج‌تایی از صفحات با زاویه ۲۰ درجه بر ضریب اختلاط عرضی در ۴ دبی بررسی شده است.

مواد و روش‌ها

تمامی آزمایش‌ها روی فلوم به طول ۱۵ متر، عرض ۸۰ سانتی‌متر و ارتفاع ۸۰ سانتی‌متر در آزمایشگاه هیدرولیک دانشگاه شهید چمران اجرا شده است (شکل ۱). آب از طریق سیستم پمپاژ به فلوم وارد و در همان ابتدا به وسیله ورودی توری جریان آرام می‌شود. عمق جریان با دریچه انتهایی فلوم کنترل و با استفاده از متر در دیواره فلوم با دقت ± 1 میلی‌متر اندازه‌گیری می‌شود. به جهت تنظیم دبی جریان نیز از دبی‌سنج در ابتدای ورودی فلوم استفاده می‌شود.

ضریب اختلاط عرضی از رابطه ۲ فیشر و همکاران (Fischer *et al.*, 1979) با استفاده از داده‌های توزیع غلظت محاسبه گردید.

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

که در آن،

σ_y^2 = واریانس توزیع غلظت در عرض مقطع؛
 U_{ave} = سرعت متوسط جریان در مقطع؛ و dx = فاصله از محل تزریق (متر).

مرور مطالعات نشان می‌دهد که برای افزایش اختلاط عرضی مواد ورودی به کانال‌ها و کاهش طول اختلاط می‌توان از سازه‌های مختلفی استفاده کرد که توانایی ایجاد جریان ثانویه را دارند و به مدیریت رسوب در رودخانه‌ها کمک می‌کنند ضمن آنکه دوست‌دار محیط زیست نیز هستند. از جمله این سازه‌ها صفحات مستغرق هستند که شارما و احمد (Sharma & Ahmad, 2012) تأثیر تعداد



شکل ۱- نمایی از فلوم ۸۰ سانتی‌متری

متغیر نبوده است از این رو عمق در تمامی آزمایش‌ها ثابت قرار داده شده است. در آزمایش‌های با سازه، ۵ صفحه مستغرق (شکل ۲) از جنس پلکسی‌گلاس به ابعاد ۵ در ۱۰ سانتی‌متر (ارتفاع سازه یک سوم عمق آب و طول سازه $\frac{2}{3}$ عمق آب) و زاویه ۲۰ درجه در یک ردیف در فاصله

آزمایش‌ها در ۴ دبی ۲۴، ۳۰، ۳۶ و ۴۲ لیتر بر ثانیه و عمق ثابت ۱۵ سانتی‌متر در دو حالت شاهد (بدون صفحه مستغرق) و با صفحات مستغرق اجرا شدند. طراحی صفحات مستغرق همواره وابسته به عمق جریان است و باتوجه به این مسئله که ابعاد صفحات در این پژوهش

۲/۵ متری از ابتدای فلوم، یعنی جایی قرار داده شد که جریان توسعه یافته است. ابعاد و زاویه نصب صفحات مطابق معیارهای توصیه شده اوگارد است، شفاعی بجهستان (Shafai-Bejestan, 2012). به منظور نصب آسان صفحات در کف فلوم، از صفحات پی‌وی‌سی با برش‌هایی به ابعاد سازه‌ها در طول فلوم استفاده گردید.



شکل ۲- نمایی از صفحات مستغرق در کف فلوم

برقی کاملاً یکنواخت می‌شد و با تنظیم شیر روی ورودی L شکل با سرعت دلخواه به درون جریان تزریق می‌گردید. اندازه‌گیری سرعت ردیاب و تنظیم آن به روش حجمی قبل از هر آزمایش صورت می‌گرفت. در آزمایش‌های اختلاط عرضی، دو شیر کناری کاملاً بسته نگه‌داشته شدند و فقط از شیر وسط استفاده می‌شد.

در این مطالعه، از محلول آب و نمک به‌عنوان ماده ردیاب و از پرمنگنات به‌عنوان معرف رنگی استفاده شده است. ماده ردیاب به‌صورت نقطه‌ای در مرکز جریان با سرعتی برابر سرعت جریان به کمک سیستم پمپاژی شامل یک مخزن، پمپ آکواریوم و ورودی لوله L شکل تزریق شد (شکل ۳). محلول در هر آزمایش، با وزن کردن نمک و مقدار آب مشخص، در مخزن ریخته و با همزن



شکل ۳- نمایی از لوله تزریق ماده ردیاب

اندازه‌گیری غلظت قرار داده شد. به همین ترتیب مقاطع در فاصله ۱/۵، ۳، ۴/۵ و ۶ متری از محل تزریق قرار گرفتند.

در حالت شاهد بعد از تزریق ماده ردیاب، از دیواره فلوم به‌صورت چشمی جایی که اختلاط در عمق به‌صورت کامل صورت گرفته مشاهده و کمی بعد از آن اولین مقطع

کف فلوم نصب شده بودند این تغییر رنگ سریع تر و در فاصله‌ای کمتر اتفاق می‌افتاد.

توزیع ردیاب در مقاطع عرضی پایین دست

بعد از برداشت داده‌های غلظت در هر مقطع، اختلاف غلظت قبل و بعد از تزریق ماده ردیاب محاسبه شد، عدد حاصل در حقیقت غلظت ماده ردیاب را در هر نقطه نشان می‌دهد. با بررسی این اختلاف‌های غلظت در عمق و در عرض فلوم در چهار مقطع (حالت شاهد و حالت با سازه) و رسم منحنی‌های توزیع غلظت در نرم‌افزار سرفر^۱ نتایج در شکل ۴ ارائه شده است. مشاهده می‌شود که صفحات باعث شده‌اند تا غلظت ردیاب در عرض مقطع پراکنده شود. در این شکل‌ها، محور افقی عرض فلوم و محور عمودی عمق آب را بر حسب سانتی‌متر نشان می‌دهد.

برای نمونه، شکل ۴-الف و ۴-ب توزیع غلظت در مقطع اول یعنی فاصله ۱/۵ متری از محل تزریق را نشان می‌دهد. مقایسه دو حالت نشان می‌دهد که در شاهد و در مقطع اول تمرکز غلظت در مرکز فلوم (با توجه به اینکه ردیاب از مرکز فلوم تزریق شده است) بیشتر بوده است ولی در حالت با صفحات، با توزیع در کل عرض میزان غلظت در مرکز مقطع کاهش یافته است. همین نکته را می‌توان با مقایسه شکل ۴-ج و ۴-د، ۴-ه و ۴-و، ۴-ح و ۴-ط مشاهده کرد. مقایسه دو شکل (شاهد و با سازه) در مقطع چهارم، یعنی در فاصله ۶ متری از محل تزریق، نشان می‌دهد که ماده ردیاب در حالت با سازه به میزان زیادی در عرض اختلاط پیدا کرده است به گونه‌ای که شکل شاهد قرمز رنگ و شکل با سازه صورتی کم‌رنگ است. این یافته بدان معناست که صفحات توانسته‌اند اختلاط در عرض را افزایش و اختلاط در طول را کاهش دهند. این مسئله از لحاظ خودپالایی رودخانه بسیار اهمیت دارد و با این روش می‌توان آلاینده‌ها را در طول کمتری از رودخانه به غلظت مطلوب رساند.

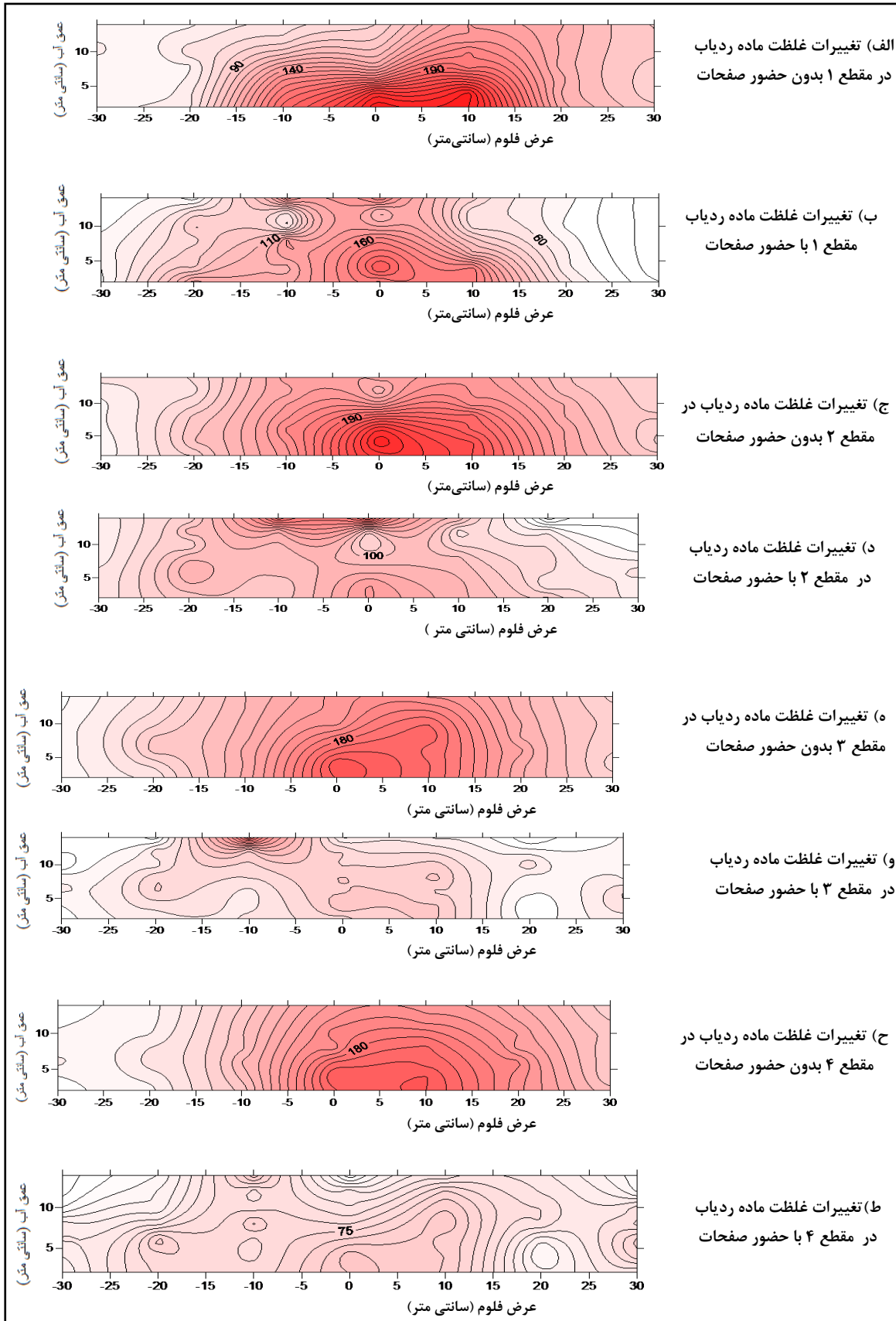
به‌منظور اندازه‌گیری غلظت ماده ردیاب، دستگاه ECسنجی طراحی شد. این دستگاه شامل هفت تیغه به ارتفاع فلوم بود که روی هر تیغه ۷ سنسور به فاصله ۲ سانتی‌متر از هم قرار گرفته بودند و کل عمق آب را پوشش می‌دادند. یکی از تیغه‌ها در مرکز فلوم و شش تیغه دیگر به فاصله ۱۰ سانتی‌متر از هم در دو طرف قرار گرفتند که در مجموع این امکان وجود داشت که غلظت ماده ردیاب در ۴۹ نقطه به‌طور همزمان در یک مقطع اندازه‌گیری شود. این روش، نسبت به تمامی روش‌های دستی قبلی، مزیتی خاص دارد. این دستگاه در ابتدا نیاز به کالیبره شدن با EC اولیه آب هر آزمایش داشت که با ECسنج دستی اندازه‌گیری و عدد قرائت شده به دستگاه داده می‌شد. بعد از واسنجی دستگاه، EC قبل و بعد از تزریق ماده ردیاب در هر مقطع اندازه‌گیری و پس از کم کردن اعداد از هم، میزان غلظت در هر نقطه مشخص می‌شد.

برای اندازه‌گیری مولفه‌های سه بعدی سرعت نیز از دستگاه سرعت‌سنج الکترومغناطیس JEF ALEC استفاده شد. پروفیل‌های سرعت در طول کانال در چهار مقطع، در همان محل داده‌برداری غلظت و در خط مرکزی کانال اندازه‌گیری شدند. به این صورت که در هر عمق از مرکز کانال ۱۰ داده سرعت در عمق‌های مختلف برداشت شد.

نتایج و بحث

مشاهدات

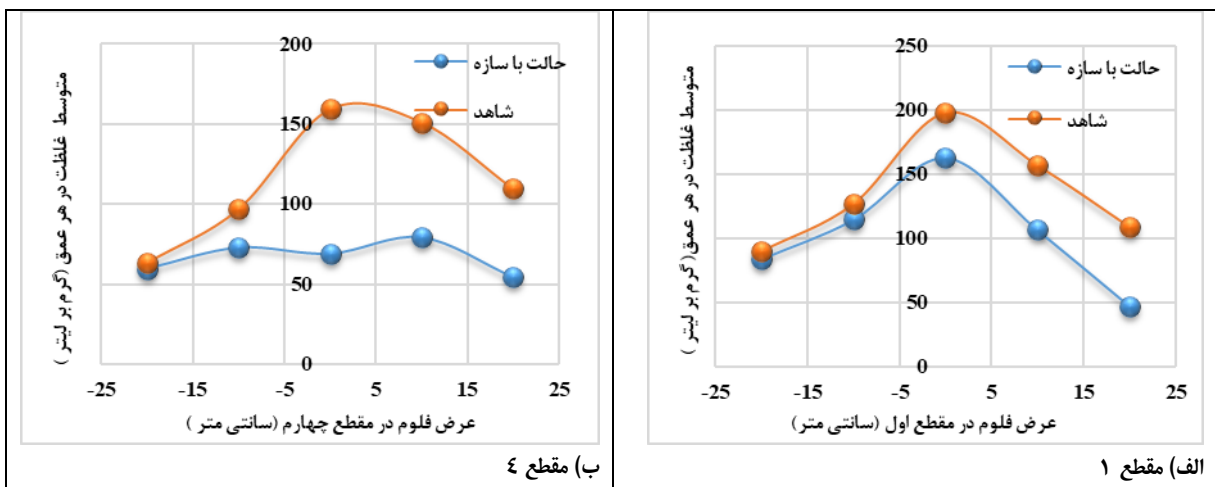
هنگامی که ماده ردیاب در هر آزمایش شاهد در مرکز فلوم تزریق می‌شد، تا کمی قبل از مقطع اول اندازه‌گیری جریان، از دیواره شفاف فلوم اختلاط عمقی ماده ردیاب قابل رویت بود به‌صورتی که ماده رنگی در عمق قبلا پخش شده بود و تا رسیدن به مقطع چهارم رفته رفته غلظت ماده رنگی کاهش پیدا می‌کرد و از بنفش به‌صورتی کم‌رنگ می‌رسید؛ در حالی که وقتی صفحات مستغرق در



شکل ۴- توزیع غلظت در مقاطع عرضی پایین‌دست محل ردیاب (دبی ۴۲ لیتر بر ثانیه)

تغییرات متوسط غلظت عمقی را در پنج خط قائم در مقطع شماره ۱ (نزدیکترین مقطع به محل ردیاب) و شکل ۵-ب همین تغییرات را در مقطع شماره ۴ (دورترین مقطع از محل ردیاب) برای دو حالت بدون صفحه و با صفحات نشان می‌دهد. یادآوری می‌شود که ماده ردیاب از مرکز فلوم و از فاصله ۱/۵+ متری بالادست مقطع ۱ تزریق شده است.

برای مقایسه تأثیر صفحات، از لحاظ کمی، بر توزیع عرضی غلظت در مقاطع پایین دست، میزان غلظت متوسط عمقی در پنج خط قائم در عرض فلوم، شامل مرکز فلوم و فواصل ۱۰R، ۲۰R، ۱۰L و ۲۰L- سانتی متری از مرکز فلوم و در حالت بدون صفحات و با صفحات اندازه گیری شد و به روش انتگرال گیری دوزنقه ای و به کار بردن غلظت اندازه گیری شده در هفت عمق مختلف، محاسبات صورت گرفت. شکل ۵-الف نمونه ای از



شکل ۵- تغییرات غلظت متوسط عمقی در پنج خط قائم در حالت بدون و با حضور صفحات (دبی ۴۲ لیتر بر ثانیه)

با توجه به شکل ۵، مشخص است که متوسط غلظت عمقی در خط های قائم مختلف در عرض فلوم در حالت بدون صفحه (شاهد) همیشه بالاتر است تا در حالت با صفحه. علاوه بر شکل ۵، به کمک متوسط غلظت توزیع عمقی که در قائم های مختلف محاسبه شد، درصد تغییرات متوسط غلظت در خط های قائم مختلف در دو حالت بدون صفحه و با صفحه از رابطه ۳ محاسبه شد:

با توجه به شکل ۵، مشخص است که متوسط غلظت عمقی در خط های قائم مختلف در عرض فلوم در حالت بدون صفحه (شاهد) همیشه بالاتر است تا در حالت با صفحه. علاوه بر شکل ۵، به کمک متوسط غلظت توزیع عمقی که در قائم های مختلف محاسبه شد، درصد تغییرات متوسط غلظت در خط های قائم مختلف در دو حالت بدون صفحه و با صفحه از رابطه ۳ محاسبه شد:

$$R\% = \frac{C_{without} - C_{with}}{C_{without}} \times 100 \quad (3)$$

که در آن، R = درصد تغییرات غلظت متوسط عمقی؛ و $C_{without}$ و

جدول ۱- درصد تغییرات غلظت در عرض فلوم در حالت با و بدون سازه

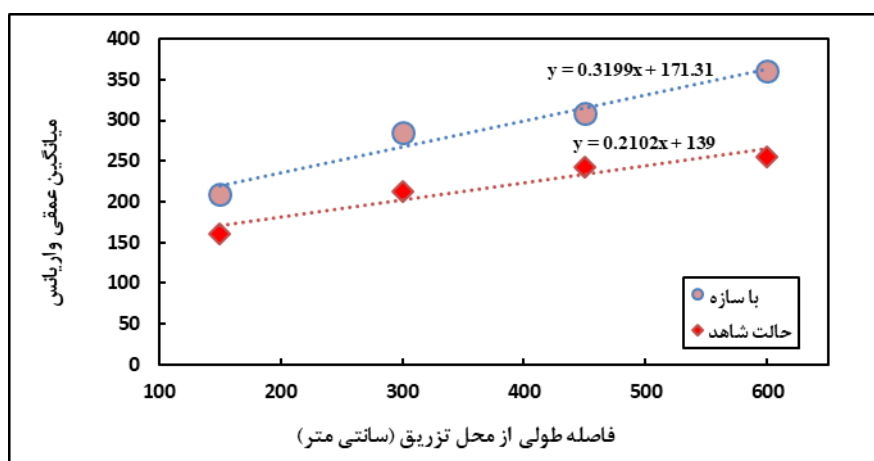
فاصله از مرکز فلوم (سانتی‌متر)	درصد تغییرات غلظت در مقطع اول	درصد تغییرات غلظت در مقطع دوم	درصد تغییرات غلظت در مقطع سوم	درصد تغییرات غلظت در مقطع چهارم
۲۰	+۵۷	+۴۷/۰	+۶۴/۷	+۵۰/۶
۱۰	+۳۲/۱	+۵۰/۲	+۵۵/۳	+۴۷/۳
۰	+۱۷/۸	+۳۱/۱	+۵۵/۶	+۵۶/۶
-۲۰	+۹/۷	+۱۸/۲	+۲۵/۲	+۲۴/۸
-۱۰	+۶/۷	+۵/۲	+۲۰/۵	+۵/۵

ضریب اختلاط عرضی

(برای مثال اگر تیغه‌ای در فاصله ۳۰ سانتی‌متری از مرکز فلوم است عدد مجموع غلظت‌ها طبق روش محاسبه در مجذور این فاصله یعنی ۹۰۰ ضرب شده است). سپس واریانس از تقسیم دو عدد مجموع نسبت به یکدیگر در هر مقطع حاصل شده است.

برای مثال، شکل ۶ شیب واریانس را در حالت با صفحه و بدون صفحه در دبی ۴۲ لیتر بر ثانیه نشان می‌دهد. این شیب از برآزش دادن خطی از ۴ واریانس غلظت حاصل شده از چهار مقطع به دست آمده است. همان‌طور که در شکل مشخص است شیب واریانس در حالت با سازه (صفحه) بیش‌تر است تا در حالت بدون سازه (صفحه).

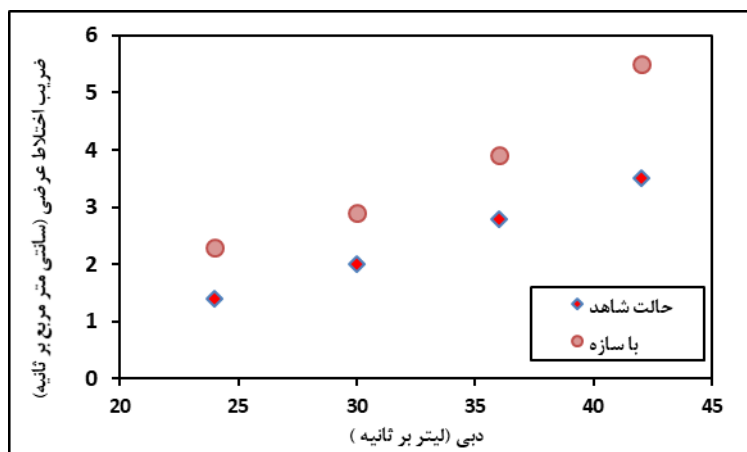
به کمک داده‌های آزمایشگاهی و نیز با به‌کار بردن روش تبادل ممان ساده، ضرایب اختلاط عرضی برای دو حالت بدون صفحه و با صفحه محاسبه شد. برای این کار، ابتدا مقادیر σ_y^2 واریانس در مقاطع مختلف و به کمک داده‌های اندازه‌گیری شده محاسبه گردید، بدین‌صورت که اختلاف غلظت‌ها در هر مقطع قبل و بعد از تزریق محاسبه و از تمامی ۴۹ عدد یک مقطع مجموع گرفته شد. پس از آن، هر عدد در مجذور فاصله‌ای ضرب شد که از مرکز فلوم داشت و باز هم از اعداد حاصل مجموع گرفته شد. با توجه به فاصله ۱۰ سانتی‌متری که تیغه‌های دستگاه از هم داشتند اعداد در ۹۰۰، ۴۰۰، ۱۰۰ و صفر ضرب شده‌اند



شکل ۶- واریانس توزیع غلظت در دبی ۴۲ لیتر بر ثانیه

جریان‌های ثانویه و گردابه‌ها، سبب افزایش ضریب شده‌اند. بیشترین ضریب مربوط به حالت با صفحات مستغرق در دبی ۴۲ لیتر بر ثانیه است که تأثیر توام آشفتگی و جریان‌های ثانویه را نشان می‌دهد.

نتایج نهایی ضریب‌های اختلاط عرضی در ۸ آزمایش در شکل ۷ نشان داده شده است. از این شکل مشخص است که افزایش دبی در عمق ثابت باعث افزایش ضریب اختلاط عرضی شده است که علت آن تلاطم و آشفتگی جریان است. سازه‌ها در هر دبی با ایجاد



شکل ۷- مقایسه ضریب اختلاط عرضی در حالت با و بدون سازه (صفحه)

برای بررسی دقیق‌تر نتایج، درصد تغییرات اختلاط عرضی در حالت بدون سازه (شاهد) و با سازه در چهار دبی از رابطه ۴ محاسبه شد:

جدول ۲ نشان می‌دهد که در تمامی دبی‌های آزمایش شده، سازه تأثیر مثبت در اختلاط عرضی دارد که دلیل آن می‌تواند تشکیل گردابه‌های حاصل از صفحات مستغرق باشد.

برای بررسی دقیق‌تر نتایج، درصد تغییرات اختلاط عرضی در حالت بدون سازه (شاهد) و با سازه در چهار دبی از رابطه ۴ محاسبه شد:

$$\Delta\varepsilon = 100 \times \frac{\varepsilon_s - \varepsilon_v}{\varepsilon_v} \quad (4)$$

که در آن،

جدول ۲- ضرایب اختلاط عرضی و درصد تغییرات آنها

درصد تغییرات ضریب اختلاط عرضی	ضریب اختلاط عرضی		دبی (لیتر بر ثانیه)
	حالت با سازه	حالت شاهد	
۶۴/۳	۲/۳	۱/۴	۲۴
۴۵	۲/۹	۲	۳۰
۳۹/۸	۳/۹	۲/۷۹	۳۶
۵۷/۱	۵/۵	۳/۵	۴۲

برای محاسبه سرعت برشی، از روابط ۴ تا ۸ استفاده می‌شود:

صفحات مستغرق باعث افزایش سرعت برشی می‌شوند؛ مقادیر سرعت برشی نیز در جدول ۳ آمده است.

که در آنها،

$$\tau_{bx} = \frac{\rho g}{C^2} U \sqrt{U^2 + V^2} \quad (4)$$

τ_{bx} و τ_{by} = به ترتیب تنش برشی بستر در جهت X و Y؛
 U و V = به ترتیب متوسط عمقی سرعت در جهت های X و Y؛
 ρ و g = به ترتیب جرم مخصوص سیال و شتاب گرانش زمین؛
 C = ضریب شزی که با توجه به n ضریب مانینگ و R شعاع هیدرولیکی به دست می آید.

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

$$\tau_b = \sqrt{\tau_{bx}^2 + \tau_{by}^2} \quad (6)$$

با توجه به اینکه صفحات از جنس پی‌وی‌سی هستند، ضریب مانینگ در رابطه ۸، ۰/۱۱ در نظر گرفته شده است. سرعت برشی محاسبه شده متوسطی از چهار مقطع اندازه‌گیری شده است.

$$U_0 = \sqrt{\frac{\tau_b}{\rho}} \quad (7)$$

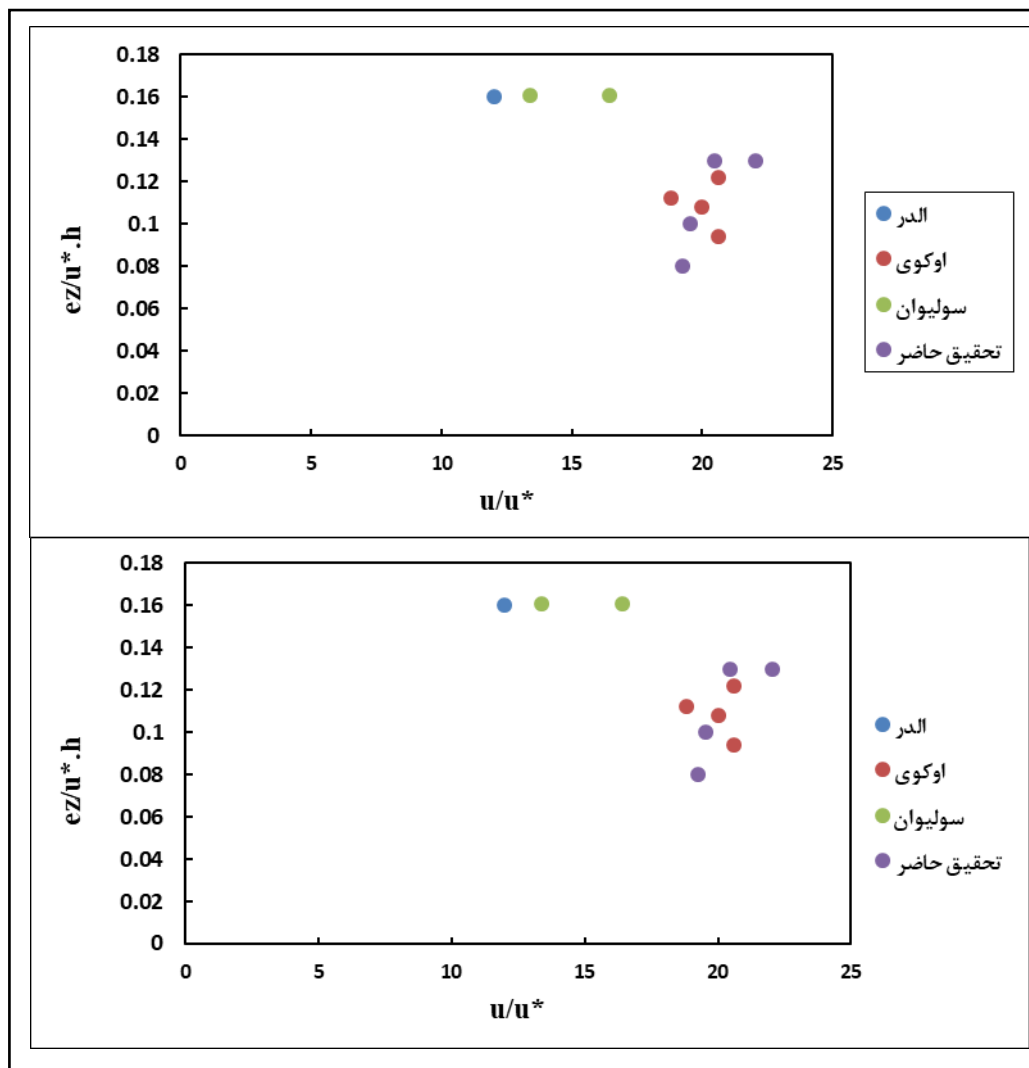
$$C = \frac{1}{n} R^{1/6} \quad (8)$$

جدول ۳- مقایسه نتایج حاصل با سایر محققین

تحقیق	سرعت متوسط (U) (سانتی متر بر ثانیه)	سرعت برشی (U*) (سانتی متر بر ثانیه)	U/U*	Ez/(U*)×(H)
قاسمی و همکاران (Ghasemi et al., 2012)	۲۴/۹	۱/۶۲	۱۵/۳۷	۰/۰۵
	۲۴/۵۴	۱/۸۹	۱۲/۹۸	۰/۱۱
	۲۴/۴۸	۲	۱۲/۲۴	۰/۱۴
	۲۴/۳۲	۲/۶۵	۹/۱۷	۰/۱۲
سعادت‌پور و همکاران (Saadatpour et al., 2011)	۳۳/۲	۳/۲۴	۱۰/۲۲	۰/۰۵
	۳۳/۲۱	۳/۲۳	۱۰/۲۶	۰/۰۲
	۳۳/۲	۲/۷۸	۱۱/۹۲	۰/۰۱۴
	۳۳/۳	۲/۷۸	۱۱/۹۶	۰/۰۱۲
تحقیق حاضر در حضور صفحات مستغرق	۲۰	۱/۱	۱۸/۱۸	۰/۱۳
	۲۵	۱/۱۳۲	۱۸/۹۳	۰/۱۴
	۳۰	۱/۴۲	۲۱/۱	۰/۱۸
	۳۵	۱/۹	۱۸/۴۲	۰/۱۹
تحقیق حاضر در حالت شاهد	۲۰	۱/۰۴	۱۹/۲۳	۰/۰۸
	۲۵	۱/۲۸	۱۹/۵۳	۰/۱
	۳۰	۱/۳۶	۲۲/۰۵	۰/۱۳
	۳۵	۱/۷۱	۲۰/۴۶	۰/۱۳

تغییرات ضریب بی‌بعد در حالت شاهد در تحقیق حاضر از ۰/۰۸ تا ۰/۱۳ متغیر است. این نتایج به نتایج تحقیقات اووکوی (Okoye, 1970) بسیار نزدیک بود.

شکل ۸ مقایسه ضریب بی‌بعد اختلاط عرضی را در برابر (سرعت متوسط به روی سرعت برشی) در تحقیق حاضر و تحقیقات سایر محققان نشان می‌دهد. محدوده



شکل ۸- مقایسه نتایج تحقیق با نتایج تحقیقات دیگر محققان

و در فاصله کمتری از ورود آلاینده اختلاط کامل آن صورت می‌گیرد. برای مثال در دبی ۲۴ لیتر بر ثانیه طول اختلاط در حالت شاهد حدوداً ۹۰ متر است در حالی که در حضور صفحات طول اختلاط به حدود ۵۵ متر کاهش می‌یابد.

نتایج به دست آمده از بررسی طول اختلاط در حالت با و بدون صفحات مستغرق در چهار دبی آزمایش شده در شکل ۹ آمده است که نشان می‌دهد در تمامی دبی‌های آزمایش شده، همان‌طور که ضریب‌های اختلاط عرضی افزایش پیدا کرده‌اند، طول اختلاط کاهش پیدا کرده است



شکل ۹- مقایسه طول اختلاط در حالت با و بدون صفحات مستغرق

نتیجه‌گیری

- صفحات مستغرق باعث افزایش سرعت برشی و تشکیل جریان‌های ثانویه و در نتیجه بهبود اختلاط عرضی شده‌اند. می‌توان نتیجه گرفت که صفحات مستغرق تأثیری مثبت بر ضریب اختلاط عرضی دارند؛ برای مثال، در دبی ۴۲ لیتر بر ثانیه ضریب اختلاط عرضی، نسبت به حالت بدون سازه، ۵۷ درصد افزایش نشان می‌دهد.

- با توجه به اینکه مهم‌ترین مسئله در ورود آلاینده‌ها به رودخانه کاهش طول اختلاط آن است، می‌توان نتیجه گرفت که صفحات مستغرق با افزایش ضریب اختلاط عرضی به مقدار زیادی سبب کاهش طول اختلاط آلاینده‌ها می‌شوند.

- هنگامی که سرعت جریان کم و رودخانه قدرت خودپالایی کمی داشته باشد، این صفحات با ایجاد کردن گردابه‌ها سبب کاهش طول اختلاط به مقدار زیادی خواهند شد.

صفحات مستغرق تا به امروز برای کنترل آبشستگی و مسایل مرتبط با رسوب استفاده شده است. در تحقیق حاضر تأثیر این صفحات بر ضریب اختلاط عرضی در کانال مستقیم بررسی و با استفاده از دستگاه EC سنج طراحی شده مخصوص این پروژه، داده‌های غلظت برداشت و بررسی شده‌اند. نتایج نشان می‌دهد که:

- وجود صفحات مستغرق در تمامی شدت جریان‌ها و در مقایسه با حالت بدون سازه باعث افزایش ضریب اختلاط عرضی شده است.

- با افزایش دبی، ضریب اختلاط عرضی افزایش پیدا کرده است که این روند به دلیل تأثیر سازه و افزایش سرعت جریان به صورت توأمان است. در حالت شاهد نیز افزایش دبی، یا به عبارتی افزایش سرعت جریان، باعث افزایش ضریب اختلاط عرضی تا ۲/۵ برابر شده است که دلیل آن آشفتگی و تلاطم جریان است.

قدردانی

این مطالعه از محل پژوهانه نویسنده دوم اجرا شده است؛ بدین وسیله از معاونت پژوهشی دانشگاه شهید چمران قدردانی می‌شود.

مراجع

- Baek, K. H. and Seo, I. W. 2011. Transverse dispersion caused by secondary flow in curved channels. *J. Hydraul. Eng.* 137(10): 1126-1134.
- Fischer, H. B., List, E. J., Koh, R. C. Y., Imberger, J. and Brooks, N. H. 1979. *Mixing in Inland and Coastal Waters*. Academic Press.
- Ghasemi, M., Heidarpour, M. and Esmailzade, M. 2012. Dune crown height ratio due to transverse mixing in a rectangular canal, The First International Conference and the Third National Conference on Dams and Hydroelectric Power Plants. Feb. 8-9. Tehran, Iran. (in Persian)
- Hamidifar, H., Omid, M. H. and Keshavarzi, A. 2015. The effect of vegetation submerged and non-submerged flood zone transverse mixing ratio. *Hydraul. Sci. J.* 1, 13-23. (in Persian)
- Boxall, J. B., Guymer, I. and Marion, A. 2003. Transverse mixing in sinuous natural open channel flows. *J. Hydraul. Res.* 41(2): 153-165.
- Okoye, J. K. 1970. Characteristics of transverse mixing in open channel flows. Report No. KH-R-23 W. M. Kech Laboratory of Hydraulics and water Resources. California Institute of Technology. Pasadena, California.
- Pour-Abadei, M. 2008. The effect of local roughness coefficient incorporation of cross-contamination in a rectangular canal. M. Sc. Thesis. Department of Irrigation and Reclamation Engineering. Tehran University, Tehran, Iran. (in Persian)
- Prych, E. A. 1970. Effects of density differences on lateral mixing in open channel flows. Report No. KH-R-21. California Institute of Technology. Pasadena, California.
- Saadatpour, A., Heidarpour, M., and Tabatabai, H. 2011. Choosing the right method for reducing the thorough mixing of rectangular flume. *J. Water Res.* 9, 12-18. (in Persian)
- Sharma, H. and Ahmad, Z. 2012. A new technique for enhancing transverse mixing of pollutants in streams. Proceeding of the International Conference on Environmental Research (ICER). Nov. 22-24. University of Terengganu, Kuala Terengganu, Malaysia.
- Shafai-Bejestan, M. 2012. *River Training and Sediment Management with Submerged Vanes*. Shahid Chamran University Press. Ahvaz, Iran. (in Persian)



Variation of Transverse Mixing Pollutants in a Straight Channel with and without Submerged Vanes

N. Kianersi* and M. Shafai-Bejestan

* Corresponding Author: M. Sc. Student, Department of Hydraulic Structures, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran. Email: nkianersi@yahoo.com

Received: 19 September 2017, Accepted: 17 February 2018

By entry of pollutants into the canals and rivers along a certain distance (Mixing length), the pollution due to factors such as the molecular motion, turbulence and vertical distribution of flow velocity are distributed throughout all the cross sections. There are several techniques to achieve this goals including increasing cross-mixing. In this study, the application of submerged vanes mounted on the bed of the channel at a certain angle for the purpose of increasing the transverse mixing in a straight rectangular flume was investigated. The experiments are conducted for four different flow conditions including with and without structure. Salt solution as a tracer, was entered to the center of the flume with constant flow rate. The concentration of tracer in four stations downstream of tracker, were measured with EC meter. The results showed that the mounted submerged vanes caused an increase in transverse mixing coefficient of about 1.5 to 1.7 times as compared with the case of no vane. Also, it was found that increasing the rate of flow discharge in case of no vane caused an increase in the transverse mixing coefficient of about 2.4 times. Similarly, an increase in the rate of flow discharge with structure caused the increase in the transverse mixing coefficients of about 2.5 times. Generally, the results showed that submerged vanes were very effective on Transverse mixing coefficients.

Keywords: Submerged Vanes, Transverse Mixing Coefficients, Turbulence