

## مطالعه پتانسیل خودپالایی جریان روی تلماسه در یک کانال مستطیلی روباز

سعید رضا خداشناس<sup>1\*</sup>، رضا معارف دوست<sup>2</sup>، محبوبه قاسمی<sup>3</sup>

تاریخ دریافت: 1393/12/9 تاریخ پذیرش: 1394/6/11

## چکیده

مطالعه در زمینه فرآیندهای اختلاط مواد آلودکننده برای مدیریت کیفی آب رودخانه‌ها حائز اهمیت بوده و یکی از ملاحظات زیست محیطی به شمار می‌رود. شکل بستر نظیر تلماسه‌ها در کنترل میزان انتقال رسوب، تولید توربولانس و مقاومت جریان در رودخانه‌ها، کانال‌ها و تالاب‌ها ضرورت مطالعه بر روی تلماسه‌ها را بیش از پیش مطرح می‌نماید. هدف از تحقیق حاضر بررسی ضریب اختلاط عرضی روی تلماسه‌ها می‌باشد. بدین منظور، اندازه-گیری‌های آزمایشگاهی روی تلماسه پنجم تا نهم در یک سری ده‌تایی از تلماسه‌های شنی دوبعدی مصنوعی انجام شد. کانال آزمایشگاهی مورد استفاده دارای طول، عرض و عمق به ترتیب 20، 0/6 و 0/6 متر بود. این تلماسه‌ها دارای طول موج یک متر، ارتفاع 0/08 متر، شیب وجه پایین دست 28 درجه و عرضی برابر عرض کانال بودند. شن مورد استفاده برای ساختن تلماسه‌ها دارای قطر متوسط 14 میلی‌متر بود. به‌منظور بررسی تأثیر نسبت ظرافت بر ضریب اختلاط عرضی روی تلماسه از دو عمق مختلف استفاده شد. نتایج نشان داد که تلماسه در افزایش ضریب اختلاط عرضی نقش به‌سزایی دارد به گونه‌ای که این ضریب در این حالت 2/36 برابر آن در بستر صاف بود. طول اختلاط کامل در حالت تلماسه در کف کانال برابر 11 متر بوده که نسبت به این مقدار روی بستر صاف یک سوم برابر را نشان داد. این پارامتر روی تلماسه با افزایش عمق کاهش را نشان می‌داد. بنابراین آزمایشات مبین این موضوع بود که قدرت خودپالایی رودخانه روی تلماسه نسبت به بستر صاف و با افزایش عمق جریان روی تلماسه‌ها افزایش می‌یابد.

واژه‌های کلیدی: تلماسه، جریان ثانویه، شکل بستر، ضریب اختلاط عرضی، نسبت ظرافت

## مقدمه

فرآیند اختلاط هیدرولوژیکی، کوچک‌ترین قسمت فرآیند کلی مدیریت محیط زیست است. سیستم کنترل محیطی خوب، باید ترکیبی از فرآیندهای الف) کنترل منبع آلودگی (اغلب درمان اولیه سیستم‌های مجاری پساب نامیده می‌شود)، ب) تصفیه پساب‌ها و ج) چگونگی پراکندگی در محیط باشد. یک مهندس هیدرولیک باید توجه خاصی به تأثیر فعالیت‌های انسان بر آب، پساب و به‌طور کلی محیط زیست داشته باشد. در طی سال‌های گذشته مهندسان هیدرولیک مسئولیت تأمین آب از منابع طبیعی را بر عهده داشته‌اند، اما امروزه به همان میزان باید تلاش کنند تا کمبود مقدار آب موجود را مرتفع کرده و کاهش کیفیت آب این منابع را به حداقل مقدار برسانند (Crank, 1975).

دانستن توانایی پخش آلاینده توسط جریان در رودخانه‌ها و

کانال‌های باز از جهت‌های مختلف در مهندسی رودخانه دارای اهمیت است. برای نمونه، پیش‌بینی میزان پخش آلاینده می‌تواند در بررسی مقدار دبی ورودی مجاز آلاینده‌ها به رودخانه و همچنین در پیش‌بینی میزان رقیق‌سازی که توسط جریان صورت می‌گیرد مفید باشد (Cotton and West., 1980). هنگامی که ردیاب در جریان رودخانه تزریق می‌شود انتقال از بالادست به پایین دست به سه مرحله تقسیم می‌شود:

اختلاط نزدیک خروجی، حاصل از مومنتم اولیه و سناریوی

اختلاط عرضی جریان، حاصل از انتقال آشفته

پخشیدگی طولی ناشی از آشفته‌گی برشی

اختلاط عرضی، برخلاف اختلاط عمودی دارای تئوری مشخصی برای تخمین نیست و تنها از طریق آزمایش تعیین می‌گردد. در این رابطه آزمایشات متعددی در کانال‌های آزمایشگاهی مستقیم و انحنادار انجام شده است. همچنین تعداد زیادی آزمایش‌های صحرائی به این منظور انجام شده است و وابستگی این ضریب را به پارامترهایی مانند عمق، عدد رینولدز، نسبت ظرافت، عدد فرود و غیره بررسی شده است. بر پایه‌ی چنین آزمایشاتی، فیشر و همکاران نشان دادند که عرض کانال در اختلاط عرضی دخالت دارد. آن‌ها با بررسی میانگین 75 آزمایش رابطه 1 را برای این ضریب ارائه داده‌اند (Fisher et al.,

1- دانشیار، گروه مهندسی آب، دانشگاه فردوسی مشهد

2- دانشجوی دکتری سازه‌های آبی، گروه مهندسی آب، دانشگاه فردوسی مشهد

3- دانشجوی دکتری آبیاری زهکشی، گروه مهندسی آب، دانشگاه شهید چمران اهواز

\* (نویسنده مسئول Email: khodashenas@ferdowsi.um.ac.ir)

(1979).

$$\varepsilon_t = 0.15hu * \quad (1)$$

که در رابطه  $1 * u$  سرعت برشی و  $h$  عمق جریان می‌باشد. فیشر و همکاران رابطه دیگری را برای انهار طبیعی و مرزهای ساحلی که به سمت متاندر شدن می‌روند ارائه دادند (Fischer et al., 1979).

$$\varepsilon_t = 0.6hu * \quad (2)$$

ضریب ارائه شده توسط آن‌ها بزرگ‌تر از حالت قبل بود. علت آن این بود که متاندر، ضریب اختلاط عرضی را افزایش می‌دهد. همچنین اگر متاندر دارای انحنای ملایم باشد و یا جداره آن نامنظم باشد ضریب رابطه بالا در حدود  $0/4 - 0/8$  متغیر خواهد بود.

خود پالایی به مجموعه فعل و انفعالاتی گفته می‌شود که به صورت طبیعی در یک منبع آبی اتفاق می‌افتد و در نتیجه آن، میزان آلودگی آب طی فرآیندهای طبیعی کاهش یافته و کیفیت آب بهبود می‌یابد. یکی از شاخص‌های مهم در ارزیابی قدرت خودپالایی یک آبراهه طول اختلاط کامل آن است. طول اختلاط کامل به فاصله میان محل تزریق آلودگی تا محلی که آلاینده به‌طور یکنواخت در عرض مجرا پراکنده شود، اطلاق می‌گردد. این طول خود تحت تأثیر عواملی نظیر سرعت جریان عبوری، آشفتگی‌ها و جریانات ثانویه تغییر می‌کند. در واقع تأثیر هر کدام از پارامترهای یاد شده بر ضریب اختلاط عرضی است که در نهایت بر طول اختلاط کامل یک آبراهه تأثیر می‌گذارد. در فاصله‌ای که کلیه نقاط در هر سطح مقطع غلظتی کمتر یا برابر 5% مقدار غلظت کل تزریق شده را دارا باشند، اختلاط کامل رخ می‌دهد. برای زمانی که منبع در وسط قرار دارد، طول اختلاط کامل از رابطه 3 به دست می‌آید.

$$L = 0.1 \frac{V_x w^2}{\varepsilon_t} \quad (3)$$

در حالتی که تزریق ردیاب در کناره‌های کانال صورت بگیرد، عرضی که در آن اختلاط کامل رخ می‌دهد دو برابر حالت فوق که منبع در وسط قرار دارد خواهد بود. در واقع فاصله معقول برای آنکه آلاینده‌ای که در کناره کانال تزریق شده به خوبی در عرض کانال مخلوط شود، از رابطه 4 به دست می‌آید (Schlichting, 1979)

$$L = 0.4 \frac{V_x w^2}{\varepsilon_t} \quad (4)$$

شکل‌های بستر، به تمام نوسانات بستر بدون توجه به شکل و اندازه آن‌ها گفته می‌شود. شکنج‌ها، شکل‌های بستر کوچک مقیاس با ارتفاع کمتر از  $0/1$  متر و طول موج کوچک‌تر از  $0/5$  متر می‌باشند که به عمق جریان بستگی دارند. عناوین تلماسه، شکنج خیلی بزرگ 1 و امواج شنی 2 برای توضیح شکل‌های بستر بزرگ‌تر که با عمق جریان در ارتباط هستند به کار می‌رود. تعیین تغییرات ضریب اختلاط

از مهم‌ترین پارامترهایی است که برای تعیین مشخصات کلی اختلاط در مجاری روباز به کار برده می‌شود. این ضریب برای آنالیزهای کنترل آلودگی مورد نیاز است (Rutherford, 1994)، (Okoye, 1970). محاسبه نرخ پخش مواد ردیاب و غلظت آن‌ها در کانال‌های روباز معمولاً بر پایه حل معادلات بقای جرم استوار است. راه حل تحلیلی موجود صرفاً برای جریان یکنواخت در کانال‌های مستقیم بوده و در مواردی که هندسه کانال پیچیده‌تر و یا جریان غیریکنواخت است، نیاز به روش‌های عددی برای حل معادلات حاکم می‌باشد. به هر صورت دقت این معادلات جهت پیش‌بینی پدیده‌های پخش بستگی کامل به در اختیار داشتن مقادیر صحیح ضریب اختلاط آشفته دارد (Okoye, 1970). پرپیچ از آزمایشات خود به این نتیجه رسید که فاکتور اصطکاک (به عنوان نماینده بی‌بعد زبری بستر) تأثیری بر ضریب بی‌بعد اختلاط عرضی ندارد (Perucca et al., 2009).

در عین حال محققین دیگری چون لاء و کریشناپان با انجام آزمایشات روی یک کانال مستطیلی در ارتباط با تأثیر ضریب اصطکاک و نسبت عرض به عمق به این نتیجه رسیدند که با افزایش زبری، مقدار ضریب اختلاط عرضی افزایش می‌یابد. آن‌ها نتایج به دست آمده را با نتایج دیگر محققین مقایسه کردند. هیچ مسیر مشخص و منطقی در تغییرات ضریب بی‌بعد اختلاط عرضی با نسبت عرض به عمق در این مطالعات به استثناء داده‌های خودشان مشاهده نشد. نتایج آن‌ها نشان داد که اختلاط عرضی در کانال‌های مستطیلی مستقیم تحت تأثیر جریان‌های ثانویه و نه آشفتگی می‌باشد (Lau and Krishnappam., 1977). میلر و ریچاردسون آزمایش‌هایی در جریان کانال‌های باز با نسبت ثابت  $w/h=4/76$  (عرض کانال و  $h$  عمق جریان) انجام دادند. به خاطر کوچک بودن نسبت مذکور، جریان به صورت سه بعدی فرض شد. مقدار ضریب بی‌بعد اختلاط بسته به مقدار فاکتور اصطکاک بین  $0/1$  و  $0/18$  در نظر گرفته شد. آن‌ها نشان دادند با افزایش فاکتور اصطکاک، مقدار ضریب بی‌بعد اختلاط نیز افزایش می‌یابد (Miller and Richardson., 1974). لوو و کریشناپان (Lau and Krishnappam., 1977) با بررسی و بحث در ارتباط با نتایج میلر و ریچاردسون (Miller and Richardson., 1974) وجود این تأثیر را پذیرفتند.

ضریب اختلاط عرضی برای چهار نوع مختلف بستر، بستر صاف، بستر با توری، بستر با شن و بستر با سنگریزه توسط چاو اندازه‌گیری شد. تیمار شاهد دارای زبری استاندارد  $0/061$  میلی‌متر بود که به عنوان بستر صاف برای مقایسه دیگر شرایط بستر انتخاب شد. تحقیق حاضر در ادامه کار دیگران نشان داد که ضریب اختلاط عرضی یک تابع خطی از سرعت برشی و عمق جریان است. ضریب اختلاط عرضی بی‌بعد برای شرایط زبری کف بین  $0/13 - 0/24$  به دست آمد (Chau, 2000). بوکسال و همکاران آزمایشات خود را برای بررسی ضریب اختلاط عرضی و تعیین داده‌های هیدرودینامیکی در

1- Mega ripple

2- Sand waves

75 لیتر در ثانیه تغذیه می‌شد. آب پس از ورود به یک حوضچه آرامش و عبور از صافی‌ها وارد کانال شده و در هنگام خروج از کانال وارد حوضچه آرامش شده و بعد از عبور از یک مجرای زیرزمینی وارد یک مخزن بزرگ می‌شد که محل جمع‌آوری آب جهت تغذیه کانال بود.

تلماسه‌ها از ذرات شن با قطر متوسط ( $d_{50}$ )، 14 میلی‌متر با انحراف معیار استاندارد 1/23 که با فرمول  $(d_{84}/d_{16})^{0.5}$  محاسبه شد، ساخته شدند. طول تلماسه‌ها یک متر، ارتفاع متوسط تلماسه‌ها 8 سانتی‌متر و شیب بالادست آن‌ها 28 درجه بود. تعداد ده تلماسه از 8 متری تا 18 متری کانال تعبیه شد.

کلرایسدیم به عنوان ماده ردیاب، در یک سرعت ثابت و نزدیک به سرعت جریان آب در کانال با یک غلظت معلوم توسط یک مخزن با ارتفاع ثابت در فاصله نه متری از ابتدای کانال، جایی که جریان کاملاً توسعه یافته بود، به کانال تزریق شد. برای محاسبه ضریب اختلاط عرضی، نمونه‌های غلظت در پنج مقطع برداشت شدند. در هر مقطع 27 نمونه که در سه تراز عمقی و در هر تراز 9 نقطه در عرض کانال برداشت شد. بنابراین برای برداشت داده‌های غلظت از یک شبکه 3×9 در هر مقطع استفاده شد.

غلظت نمونه‌ها به وسیله EC-Meter اندازه‌گیری شد. با استفاده از رابطه زیر برای هر تراز واریانس داده‌های غلظت به دست می‌آید که با متوسط‌گیری از آن‌ها، برای هر مقطع یک واریانس غلظت متوسط عمقی به دست آمد.

$$\sigma_z^2 = \frac{\sum z_i^2 \times c_i}{\sum c_i} \quad (5)$$

$z_i$  فاصله هر نقطه نمونه‌برداری شده از مرکز کانال و  $c_i$  غلظت آن نقاط می‌باشد. اگر واریانس عرضی توزیع غلظت ردیاب با عمق متغیر باشد، میانگین عمقی ضریب اختلاط عرضی  $e_z$  می‌تواند از فرمول 6 به دست آید

$$e_z = \frac{1}{2} \frac{d\sigma_z^2}{u dx} \quad (6)$$

$u$  سرعت متوسط در مقطع عرضی و  $\sigma_z^2$  میانگین عمقی  $\sigma^2$  است.

برای اندازه‌گیری سرعت‌های نقطه‌ای از دستگاه ADV<sup>3</sup> با فراوانی نمونه‌گیری 200 هر تراز استفاده شد. پروفیل‌های سرعت در طول کانال در پنج مقطع، در همان محل داده‌برداری غلظت و در خط مرکزی کانال اندازه‌گیری شدند. سرعت جریان در تمام آزمایشات ثابت و برابر 0/24 متر بر ثانیه بود. پروفیل‌های سرعت شامل 20 تا 30 نقطه جهت داده‌برداری بوده و اولین نقطه اندازه‌گیری شده در 3

یک کانال پیچ و خم دار انجام دادند. داده‌های غلظت توسط فلئورومتر<sup>1</sup> جمع‌آوری شدند و رودامین WT به عنوان ماده ردیاب استفاده شد. نتایج آزمایشات آن‌ها ارائه روش جدیدی برای محاسبه ضریب اختلاط عرضی در کانال‌های پیچ و خم‌دار بود (Boxall et al., 2003). شینو و فنگ با استفاده از ابزار دقیق<sup>2</sup> در کانال مستطیلی و مرکب، با اندازه‌گیری همزمان آشفتگی، سرعت و غلظت مواد ردیاب، ساختار جریان و چگونگی تأثیر جریان‌های ثانویه بر پخش ماده‌ی ردیاب را بررسی و نتایج آن را ارائه کردند (Shiono et al., 2003). برای بررسی اثرات هندسه رودخانه روی اختلاط عرضی آلاینده‌ها، آزمایشات ردیابی در هفت شاخه رودخانه هان در کره توسط سئو و همکاران (Seo et al., 2006) انجام شد. مورفی (2006) یک مدل تئوری جدید برای انتشار طولی در کانال‌های با پوشش گیاهی ارائه داد. او نشان داد که مکانیسم تبادل در کانال‌های بدون پوشش گیاهی با کانال‌های دارای پوشش گیاهی، روی ضریب پخشیدگی تفاوت بسیار زیادی دارند و تراکم پوشش گیاهی بسیار تأثیرگذار است (Murphy, 2006). ضریب اختلاط عرضی در یک کانال دوزنقه‌ای متقارن توسط زنگ و همکاران در هر یک از زیر مقاطع (کانال اصلی، شیب جانبی، دشت سیلابی) به طور جداگانه محاسبه شدند. بر پایه اندازه‌گیری‌های آزمایشگاهی، مؤلفه‌های سرعت طولی و عرضی و توزیع عرضی غلظت مواد حل شده، مطالعه شدند. در پایان یک تابع خطی پله‌ای ضریب اختلاط، برای تخمین تحلیلی غلظت ماده حل شده در عرض پذیرفته شد. مقایسه داده‌های پیش‌بینی شده و داده‌های غلظت اندازه‌گیری شده ثابت کرد که این تابع پله‌ای یک راه مؤثر برای محاسبه اختلاط عرضی در جریان کانال روباز با تغییرات عرضی در عمق آب می‌باشد (Zeng et al., 2008). تانینو و نف ضریب اختلاط عرضی را در یک مدل مصنوعی پوشش گیاهی با اعداد رینولدز بالا در تراکم‌های مختلف از گیاه، مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها از استوانه‌های چوبی به منظور شبیه‌سازی پوشش گیاهی استفاده کردند. در اعداد رینولدز بالا ( $Re > 250$ ) با افزایش تراکم، ابتدا ضریب انتشار طولی به سرعت افزایش می‌یابد، سپس این ضریب کاهش یافته و دوباره افزایش یافته است (Tanino and Nepf., 2007).

## مواد و روش‌ها

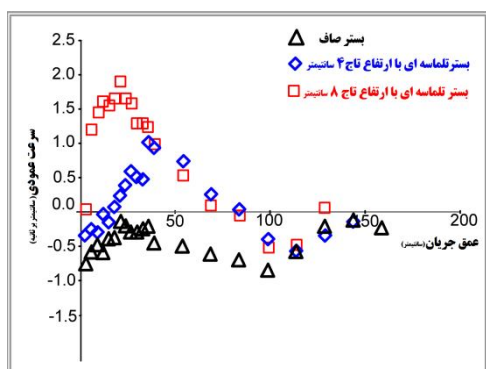
برای انجام آزمایشات تحقیق مورد نظر از کانال موجود در آزمایشگاه هیدرولیک دانشگاه شهرکرد با طول، عرض و ارتفاع به ترتیب 20، 0/6 و 0/6 متر استفاده شد. تمامی آزمایشات در شرایط یکنواخت انجام گرفت. این کانال به وسیله یک پمپ با حداکثر دبی

1- Fluoremeter

2- Laser Double Analog

3- Acoustic Doppler Velocimeter

است و با استفاده از آن تغییرات جریان ثانویه توضیح داده می‌شود. همانگونه که در شکل مشخص است سرعت عمودی در بستر صاف به جز نقاط نزدیک بستر و سطح آب کم‌تر از بستر تلماسه‌ای می‌باشد. در این حالت جهت جریان ثانویه تشکیل شده رو به پایین است در بستر تلماسه‌ای جریان ثانویه تشکیل شده به جز نقاط نزدیک بستر و سطح آب که به مقادیر روی بستر صاف در این محل نزدیک می‌باشند قوی‌تر است. در نقاط نزدیک بستر و سطح آب جهت جریان ثانویه روی تلماسه رو به پایین بوده و در بقیه نقاط به سمت بالا است. به عبارت دیگر قوی‌تر شدن جریان ثانویه در بستر تلماسه‌ای نسبت به بستر صاف به دلیلی وجود تلماسه موجب تغییر ضریب اختلاط عرضی می‌شود.



شکل 1- نیمرخ عمودی سرعت برای بستر صاف و تلماسه‌ای

یکی دیگر از عوامل تأثیرگذار در ضریب اختلاط عرضی تنش برشی بی‌بعد رینولدز می‌باشد که همانطور که در شکل ذیل مشاهده می‌شود وجود تلماسه سبب افزایش قابل توجهی در میزان تنش برشی رینولدزی و در نتیجه افزایش ضریب اختلاط می‌گردد. شدت آشفتگی براساس جذر میانگین مربعات نوسانات سرعت RMSE محاسبه می‌گردد که در سه راستای طولی، عرضی و عمودی روی تلماسه نسبت به بستر صاف مقایسه شد.

میلی‌متری نزدیک بستر کانال قرار داشت. در مجموع چهار سری آزمایش انجام شد. سری اول شامل بستر صاف، سری دوم تا چهارم شامل تلماسه با سه عمق مختلف 20، 25 و 28 سانتی‌متر در کف کانال می‌باشد.

جهت آشنایی بیش‌تر با عوامل تأثیرگذار بر ضریب اختلاط عرضی آزمایش را برای بستر صاف و تلماسه ای با ارتفاع 4 و 8 سانتی‌متر تکرار می‌کنیم. مقادیر غلظت را توسط دستگاه به‌دست آورده و نمودار واریانس توزیع غلظت  $\sigma^2$  نسبت به فاصله طولی  $x$  رسم کردیم. شیب خط مستقیم برازش داده به‌عنوان شیب واریانس توزیع غلظت  $\frac{d\sigma^2}{dx}$  بدست می‌آید با توجه به فرمول 6 مشاهده می‌شود که با ضرب کردن شیب واریانس توزیع غلظت در سرعت متوسط تقسیم بر عدد 2 میزان ضریب اختلاط عرضی به‌دست می‌آید.

## نتایج و بحث

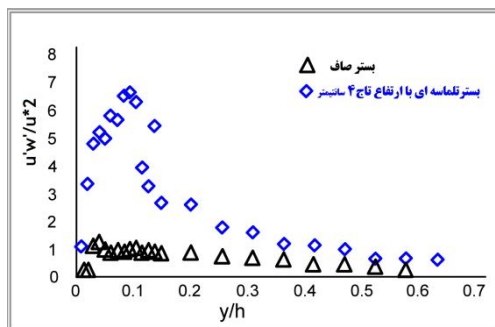
در ابتدا ضریب اختلاط عرضی رو بستر صاف اندازه‌گیری شد که مقدار آن برابر  $2/49$  سانتی‌متر مربع بر ثانیه به‌عنوان تیمار شاهد در نظر گرفته شد. جهت بررسی اثر تلماسه ابتدا عمق و در نتیجه آن نسبت ظرافت را ثابت در نظر می‌گیریم. میزان عمق 28 سانتی‌متر می‌باشد و نتایج به‌شرح جدول 1 است.

همانطور که ملاحظه می‌شود وجود تلماسه نسبت به بستر صاف بر کاهش طول اختلاط و افزایش ضریب اختلاط عرضی تأثیر چشم‌گیر دارد. هرچه ارتفاع تاج تلماسه بیش‌تر باشد سرعت برشی و در نتیجه جریان‌های ثانویه بیش‌تر شده که از عوامل مؤثر بر بهبود اختلاط عرضی می‌باشد.

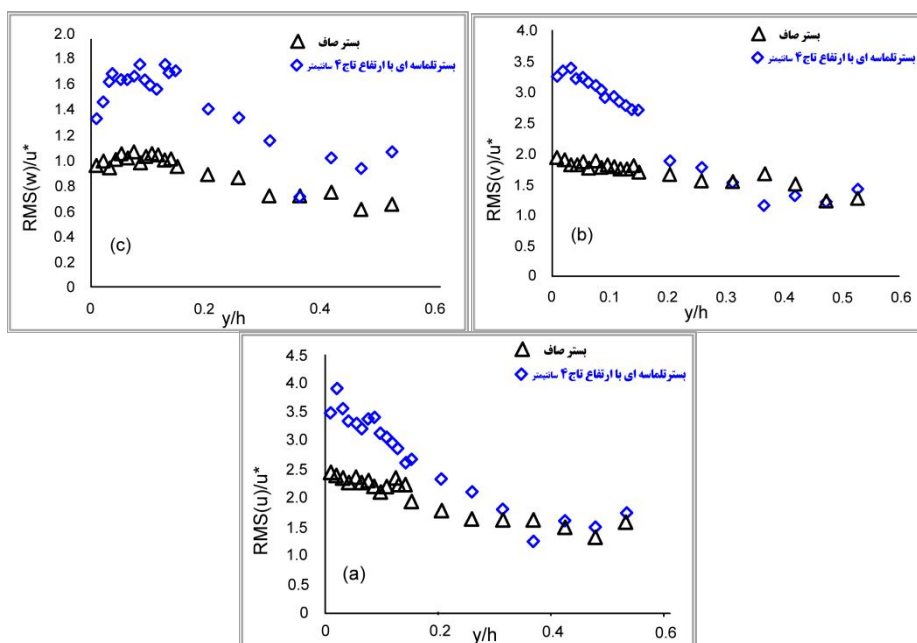
عواملی مانند سرعت برشی، شدت آشفتگی، تنش برشی رینولدز و جریان‌های ثانویه بر ضریب اختلاط عرضی مؤثر است. لذا جهت بررسی دقیق‌تر اثر این عوامل نیمرخ‌های سرعت عمودی، تنش برشی و شدت آشفتگی برای بستر صاف و تلماسه‌ای را بررسی می‌کنیم. سرعت عمودی از مؤلفه‌هایی است که جریان ثانویه به آن وابسته

جدول 1- تأثیر ارتفاع تلماسه بر ضریب اختلاط عرضی در عمق ثابت

$l(m)$	$\varepsilon_t/hu_*$	$\varepsilon_t(cm^2/s)$	$u_*(cm/s)$	$u(cm/s)$	شیب واریانس $\frac{d\sigma^2}{dx}$	$w/h$	
طول	ضریب بی بعد	ضریب اختلاط	سرعت	سرعت	شیب واریانس	ضریب	
اختلاط	اختلاط عرضی	عرضی	برشی	متوسط	توزیع غلظت	ظرافت	
35/64	0/05	2/49	1/62	24/90	0/20	2/14	بستر صاف
15	0/11	5/89	1/89	24/54	0/48	2/14	تلماسه با ارتفاع 4cm
11/07	0/14	7/96	2	24/48	0/65	2/14	تلماسه با ارتفاع 8 cm



شکل 2- توزیع تنش رینولدز بروی بستر صاف و تلماسه‌ای



شکل 3- توزیع شدت آشفتگی بر بستر صاف و وجه بالادست تلماسه ای (a) راستای جریان (b) راستای عرضی (c) راستای عمودی

تلماسه با افزایش عمق جریان افزایش یافته است. همانگونه که جدول 2 دیده می‌شود با افزایش نسبت ظرافت، ضریب اختلاط عرضی کاهش می‌یابد. در شکل 4 ضریب اختلاط عرضی روی تلماسه در اثر تغییر عمق جریان نشان داده شده است. سری اول آزمایشات روی بستر صاف انجام شد.

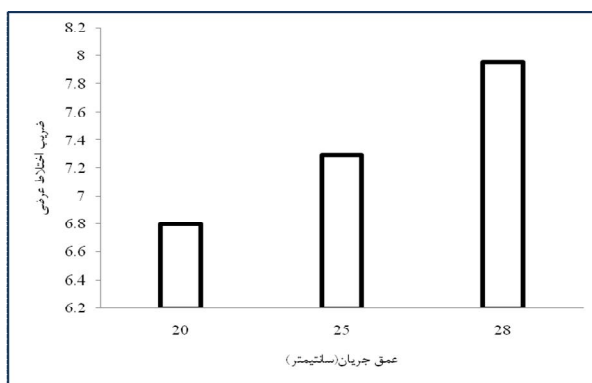
همانطور که در شکل 5 مشاهده می‌شود طول اختلاط کامل با افزایش عمق جریان کاهش می‌یابد. روند تغییرات نتایج حاضر با نتایج به دست آمده توسط میلر و ریچاردسون (Miller and Richardson., 1974) در کانال مستقیم با کف پوشیده شده با بلوک‌های مستطیلی و لاء و کریشناپان در یک کانال ماریچی با تغییر توپوگرافی کف انجام شد، مطابقت دارد (Lau and Krishnappan., 1977). طبق جدول 1 ضریب اختلاط عرضی با افزایش ضریب اصطکاک افزایش یافته است. این ضریب برای ضریب اصطکاک 0/077 برابر با  $7/3 \text{ cm}^2/\text{s}$  و برای ضریب اصطکاک 0/0534 برابر  $7/956 \text{ cm}^2/\text{s}$  می‌باشد.

به منظور بررسی اثر نسبت ظرافت (نسبت عرض کانال به عمق جریان) بر ضریب اختلاط عرضی روی تلماسه با ارتفاع تاج 8 سانتی - متر، از دو عمق مختلف جریان استفاده شد به گونه‌ای که شکل هندسی تلماسه‌ها بدون تغییر باقی بماند. تغییرات در نسبت ظرافت به دو طریق حاصل می‌شود: (1) عمق ثابت و عرض متغیر (2) عرض ثابت و عمق متغیر. برای ایجاد نسبت‌های ظرافت متفاوت، از آنجایی که عرض کانال ثابت بود، عمق جریان از طریق درجه انتهایی تغییر داده شد. خلاصه نتایج در جدول 2 آورده شده است. هدف از انجام این سری آزمایشات، بررسی اثر نسبت ظرافت بر ضریب اختلاط عرضی روی تلماسه‌ها بود.

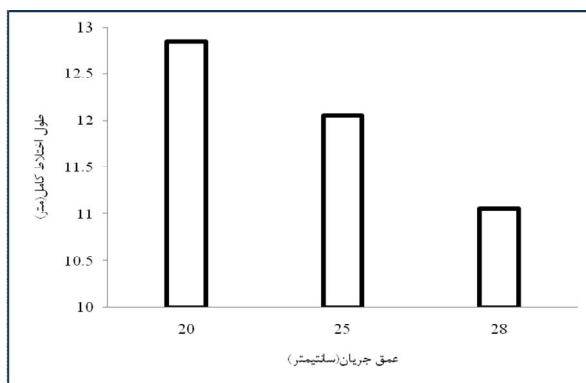
در این مطالعه برای هر کدام از نسبت‌های ظرافت انتخاب شده ضریب اختلاط عرضی اندازه‌گیری شد. در جدول 2 تغییرات ضریب ب بعد اختلاط عرضی و طول اختلاط کامل در مقابل نسبت ظرافت نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود این ضریب روی

جدول 2- تأثیر نسبت ظرافت (عمق) بر ضریب اختلاط عرضی در حضور تلماسه

l(m) طول اختلاط	w/h ضریب ظرافت	$\epsilon_1 / hu_{*c}$ ضریب بی بعد اختلاط عرضی	$\epsilon_1 (cm^2/s)$ ضریب اختلاط عرضی	f ضریب اصطکاک	$u_* (cm/s)$ سرعت برشی	u(cm/s) سرعت متوسط	h(cm) عمق جریان	
12/85	3	0/128	6/80	0/094	2/65	24/32	20	سری اول
12/06	2/4	0/121	7/30	0/077	2/4	24/35	25	سری دوم
11/07	2/14	0/142	7/96	0/053	2	24/48	28	سری سوم



شکل 4- تغییرات ضریب اختلاط عرضی در اثر تلماسه و تغییر عمق



شکل 5- تغییرات طول اختلاط کامل در اثر تلماسه و تغییر عمق

## نتیجه گیری

بستر تلماسه‌ای عبارتند از سرعت برشی، شدت آشفتگی، تنش برشی رینولدز و جریان‌های ثانویه که افزایش آن‌ها موجب بهبود اختلاط می‌شود. در این میان تأثیر تلماسه بر تنش برشی بی‌بعد رینولدزی بیش از سایر پارامترها مشهود است. هرچه ارتفاع تاج تلماسه بیش‌تر می‌شود اختلاط بهتر رخ می‌دهد و در نتیجه طول اختلاط کاهش می‌یابد.

روند تغییرات نتایج حاضر با نتایج به دست آمده توسط میلر و ریچاردسون (1974) در کانال مستقیم با کف پوشیده شده با بلوک

با توجه به نتایج به دست آمده از آزمایشات می‌توان دریافت که وجود تلماسه اثر چشم‌گیری بر ضریب اختلاط عرضی دارد به طوری که تلماسه با ارتفاع تاج 4 سانتی‌متر این ضریب را به میزان 2/36 برابر نسبت به بستر صاف افزایش داده است. هر چه ضریب اختلاط افزایش یابد پخش آلودگی در طول کم‌تری رخ می‌دهد در نتیجه طول اختلاط کاهش می‌یابد. مهم‌ترین عوامل مؤثر بر ضریب اختلاط در

- in rectangular channels, Journal of Hydraulic Division. 103: 1173-1189.
- Miller, A and Richardson, E. 1974. Diffusion and dispersion in open channel flow. Journal. Hydraul. Division. 100: 159-171.
- Murphy, E., 2006. Longitudinal dispersion in vegetation flow. Master's thesis, Massachusetts Institute of Technology.
- 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, Calif.
- Perucca, E.C Camporeale and Ridolfi, L. 2009. Estimation of dispersion coefficient in rivers with riparian vegetation. Advances in Water Resource. 32: 78-87.
- Rutherford, J. 1994. River mixing, John Wiley and Sons.
- Schlichting, H. 1979. Boundary layer theory, McGraw-Hill Book Co., New York.
- Seo, I., Baek, K.O and Jeon, T. 2006. Analysis of transverse mixing in natural streams under slug tests, Journal. Hydraulic. Research. 44: 350-362.
- Shiono, K and Feng, T. 2003. Turbulence measurements of dye concentration and effects of secondary flow on distribution in open channel flow. Journal Hydraulic. Engineering. 129.5: 373-384.
- Tanino, Y and Nepf, M. 2007. Lateral dispersion in random cylinder arrays at high Reynolds number. Massachusetts Institute of Technology. Phys. Fluids. 21.4: 1070-6631.
- Yotsukura, N Fischer, H.B and Sayre, W.W. 1970. Measurement of mixing characteristic of the Missouri river between Sioux City, Iowa, and Plattsmouth, Nebraska, US Gov. print. Off.
- Valentine, E.M., Zulfiqar, A and Swailes, D.C. 2001. A Model for longitudinal dispersion. [https://www.iahr.org/elibrary/beijing\\_proceeding](https://www.iahr.org/elibrary/beijing_proceeding)
- Zeng, Y, Huai, W and Guymet, I. 2008. Transverse mixing in a trapezoidal compound open channel, Adv. Environmental. Research. 4(4): 287-294.
- های مستطیلی و لاء و کریشناپان (1977) در یک کانال ماریچی با تغییر توپوگرافی کف انجام شده است، مطابقت دارد. هم‌چنین چاو (2000) برای بسترهای زبر این ضریب را بین 0/12 تا 0/24 به دست آورده است که با جدول نتایج این تحقیق مطابقت دارد.
- هم‌چنین نتایج به دست آمده نشان داد که تلماسه به میزان زیادی می‌تواند به اختلاط عرضی آلاینده کمک کرده و سرعت اختلاط را افزایش دهد. محاسبات نشان داد که کاهش نسبت ظرافت سبب کاهش طول اختلاط کامل می‌شود. از آنجایی که طول اختلاط کامل یکی از پارامترهای تعیین قدرت خودپالایی رودخانه است بنابراین روی تلماسه با افزایش عمق جریان قدرت خودپالایی رودخانه افزایش می‌یابد. تلماسه‌ها یکی از رایج‌ترین شکل‌های بستر آبرفتی بوده که نسبت به بستر صاف قدرت خودپالایی بیش‌تری داشته و در نظر گرفتن چنین موردی در ملاحظات زیست محیطی قابل توجه می‌باشد.

## منابع

- Boxall, J.B and Guyme, I. 2003. Analysis and prediction of transverse mixing coefficient in natural channels. Journal of Hydraulic. 129.2: 129-139.
- Chau, K. 2000. Transverse mixing coefficient in an open rectangular channel. Environmental. Research. 4: 287-294.
- Cotton, A and West, J. 1980. Field Measurement of Transverse Diffusion in Unidirectional Flow in a Wide, Straight Channel. Water Research. 14: 24-32.
- Crank, J. 1975. The Mathematics of Diffusion, Clarendon Press, Oxford.
- Fischer, H.B. 1966. Longitudinal dispersion in laboratory and natural stream. California Institute of Technology, Master's Thesis.
- Fischer, H.B., List, E.J., Koh, R.C.Y., Imbergerer, J., Brooks, N.H. 1979. Mixing in inland and coastal water, Academic Press, N.Y.
- Lau, Y and Krishnappan, B. 1977. Transverse dispersion

## Self-purification potential study on the dune in a rectangular open channel flow

S.R.Khodashenas<sup>1\*</sup>, R.Maaref Doust<sup>2</sup>, M.Ghasemi<sup>3</sup>

Received: Feb.28, 2015

Accepted: Sep.02, 2015

### Abstract

Study in mixing processes for the management of water quality of rivers is important and one of the environmental concerns. The substrates, such as dunes, are effective in control of transport, production of turbulence and flow resistance in rivers, canals and wetlands. It is therefore essential that study is done in this subject. The objective of this study is to investigate the transversal mixing coefficient of dunes. For this purpose, measurements carried out on the fifth to the ninth of dunes in a series of ten dune sand of the synthetic two-dimensional. The experiments carried out in a laboratory channel with dimensions of length, width and depth, 20, 0.6 and 0.6 respectively. The dunes had a wave-length of one meter, height 0.8 meters, downstream side slopes 28 degrees and width equal to the channel width. The average diameter of sand dunes used was 14 mm. To evaluate the effect of the delicately ratio on lateral mixing coefficients, two different depths were used. The results showed that dune plays an important role in increasing the lateral mixing coefficient so that in this case this rate was 2.36 times the flat bed. Complete mixing length in the channel bed dunes was 11 meters to the amount indicated on the flat bed of a third. This parameter showed a decrease with increasing depth over the dunes. The tests indicate that the self-purification power of the river on the dunes, comparing to a flat bed, with increasing water depth above of the dunes, increases.

**Key words:** Transversal mixing coefficient, Profile of bed, Dune, Fineness ratio, Secondary flow

1- Associate Professor, Department of Water Engineering, Ferdowsi University of Mashhad

2- Ph.D Student Department of Water Engineering, Ferdowsi University of Mashhad

3- Ph.D Student Department of Water Engineering, University of Ahvaz

(\* Corresponding Author Email: khodashenas@ferdowsi.um.ac.ir)