تحقیقات آب و خاک ایران، دورهٔ ۴۶، شمارهٔ ۳، پاییز ۱۳۹۴ (ص ۴۰۴-۳۹۵)

بررسی تأثیر دبی و زبری بر حداکثر طول پخشیدگی املاح در یک کانال سهمی‌شکل

سونیا زبردست[1*]، سید حسن طباطبایی[2]، فریبرز عباسی[3]، منوچهر حیدرپور[4]، کارلو گالتیری[5]

۱. دانشجوی دکتری گروه مهندسی آب دانشکدهٔ کشاورزی دانشگاه شهرکرد

۲. دانشیار گروه مهندسی آب دانشکدهٔ کشاورزی دانشگاه شهرکرد

۳. استاد مؤسسهٔ تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی کرج

۴. استاد گروه مهندسی آب دانشگاه صنعتی اصفهان

۵. استادیار گروه محیط زیست دانشگاه ناپولی فدریکوی ایتالیا

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۳/۱۰/۲۸ـ تاریخ تصویب: ۱۳۹۴/۲/۲)

چکیده

فرایند پخش آلاینده‌ها در کانال‌های روباز، به دلیل نقش آن‌ها در انتشار آلودگی زیست‌محیطی، بسیار مهم است. در این پژوهش آزمایشگاهی، تأثیر دبی و ضریب زبری‌های مختلف بر ضریب پخشیدگی عرضی و حداکثر طول پخشیدگی در یک کانال با مقطع سهمی بررسی شد. سه سطح ضریب زبری مانینگ تقریبی ۰/۰۲، ۰/۰۴، و ۰/۰۶ و سه سطح دبی تقریبی ۵، ۱۰، و ۱۵ لیتر بر ثانیه در نظر گرفته شد. کلرید سدیم به منزلهٔ مادهٔ ردیاب در بالادست جریان تزریق و غلظت کلرید سدیم پخش‌شده در آب همراه نیمرخ سرعت در هشت مقطع به فاصلهٔ ۳، ۴، ۵، ۶، ۷، ۸، ۹، و ۹/۵ متری از بالادست اندازه‌گیری شد. نتیجهٔ آزمایش‌ها مقادیر ضریب پخشیدگی عرضی را بین ۰/۲۳ تا ۰/۵۶ سانتی‌متر مربع بر ثانیه و طول پخشیدگی را ۱۰۸ تا ۱۷۰ متر برای سطوح مختلف ضریب زبری و دبی نشان داد. در ضریب زبری‌های ثابت، با افزایش دبی ورودی، طول پخشیدگی افزایش و در دبی‌های ورودی ثابت با افزایش ضریب زبری طول پخشیدگی کاهش یافت. به دلیل تأثیر شکل مقطع کانال بر نیمرخ سرعت، معادلهٔ ضریب پخشیدگی عرضی برای سطوح ضریب زبری و دبی درنظرگرفته‌شده در این پژوهش به صورت غیر خطی به دست آمد. همچنین، معادله‌ای برای حداکثر طول پخشیدگی در کانال سهمی‌شکل ارائه شد.

کلیدواژگان: ضریب انتشار عرضی، فرایند پخشیدگی، مقطع غیر مستطیلی، نیمرخ سرعت.

مقدمه

با بررسی چگونگی شکل‌گیری پدیدهٔ پخش در کانال‌های روباز، روش‌های افزایش ظرفیت حمل و قدرت پخش مواد شیمیایی شناسایی شد. با منطقی کردن رهاسازی این مواد به کانال‌های روباز می‌توان محیط زیست و توسعهٔ پایدار را با هم به دست آورد (Shirazialiyan, 2009). حرکت مواد شیمیایی و آلاینده‌ها از مکان تزریق تحت تأثیر دو فرایند انتقال و پخش قرار می‌گیرد. طول پخشیدگی کامل مسافتی است که جریان در آن توانایی رقیق‌سازی و پخش کامل مادهٔ شیمیایی (املاح) را به صورت یکنواخت در کل سطح مقطع جریان دارد (Saadatpour *et al.*, 2011). محاسبهٔ میزان پخش مواد ردیاب و غلظت آن‌ها در کانال‌های روباز معمولاً بر پایهٔ حل معادلات بقای جرم استوار است. حل‌های تحلیلی موجود صرفاً برای جریان‌های یکنواخت در کانال‌های مستقیم است. در مواردی که هندسهٔ کانال پیچیده‌تر یا جریان غیر یکنواخت است به روش‌های عددی برای حل معادلات نیاز است. دقت این معادلات برای پیش‌بینی پدیده‌های پخش به در اختیار داشتن مقادیر صحیح ضریب پخشیدگی آشفته، که از مشخصه‌های جریان روباز است، بستگی دارد (Lau and Krishnappan, 1977). ضریب پخشیدگی آشفته، به واسطهٔ تفاوت در نیمرخ‌های سرعت، در سه راستای اصلی، دارای سه مقدار متفاوت در جهت‌های مذکور است. با وجود این، مهم‌ترین راستا راستای عرضی است. زیرا در این راستا نیمرخ سرعت عرضی به صورت مشخص وجود ندارد و از آنجا که ماهیت این ضریب به نیمرخ سرعت بستگی دارد برای تعیین آن باید به داده‌های آزمایشگاهی و صحرایی روی آورد (West and Cotton, 1980). برای تخمین ضرایب پخشیدگی عرضی با استفاده از روش‌های موجود لازم است نیمرخ‌های کاملی در چند مقطع در طول کانال در پایین‌دست محل تزریق به دست آورد. اگرچه چنین آزمایش‌هایی هزینه‌بر است، امکان‌پذیر است. نیاز به این حجم داده معمولاً مانع تخمین

* نویسندهٔ مسئول: sonia_zebardast@yahoo.com

Archive of SID
www.SID.ir

دقیق ضرایب پخشیدگی عرضی می‌شود (Boxall and Guymer, 2000). پژوهشگران، بر اساس مطالعه‌های آزمایشگاهی، روابط تجربی با ضرایب متفاوت را برای تخمین ضریب پخشیدگی عرضی ارائه داده‌اند که برخی از آن‌ها در جدول ۱ می‌آید.

جدول ۱. روابط ضریب پخشیدگی عرضی ارائه‌شده از سوی پژوهشگران

ردیف	منبع	معادله	شرایط خاص آزمایش
۱	Fischer (1979)	$e_y = ۰/۱۵ hu^*$	-
۲	Rutherford (1994)	$e_y = (۰/۱۰-۰/۲۶) hu^*$	-
۳	Deng (2002)	$e_y = ۰/۱۴۵ hu^*$	در کانال‌های بدون انحنا
۴	Gualtieri and Mucherino (2007)	$e_y = ۰/۱۶۶ hu^*$	-

e_y ضریب پخشیدگی عرضی، h عمق آب، و u^* سرعت برشی است.

زبری کانال نیز مورد دیگری است که علاوه بر نسبت عرض به عمق به نظر می‌رسد بر ضریب پخشیدگی عرضی و طول پخشیدگی مؤثر باشد. Miller and Richardson (1974) آزمایش‌هایی شامل بستر زبر با استفاده از گوه‌های چوبی و بلوک‌های مستطیلی در سرتاسر بستر کانال، به عنوان زبری، انجام دادند و اعلام کردند با افزایش زبری ضریبِ پخشیدگی عرضی نیز افزایش می‌یابد. Chau (2000) تحقیقاتی در زمینهٔ ضریب پخشیدگی عرضی و ضریب بدون بعد آن در یک کانال مستطیلی روباز، تحت شرایط مختلف زبری بستر و جریان، انجام داد. وی نشان داد ضریب پخشیدگی عرضی نسبت به سرعت برشی و عمق جریان متغیر است. Pourabadeyi *et al.* (2007) تأثیر زبری موضعی بر ضریب پخشیدگی عرضی آلودگی را در یک کانال مستطیلی بررسی کردند. Azizpour (2011) نشان داد با افزایش فاکتور اصطکاک ضریب پخشیدگی عرضی افزایش می‌یابد و در نتیجه طول پخشیدگی کامل کم می‌شود و رقیق‌سازی در فاصله‌ای کمتر انجام می‌گیرد. Tabatabaei *et al.* (2013) نشان دادند ضریب پخشیدگی عرضی با افزایش عمق جریان، به دلیل کاهش سرعت برشی و جریان‌های ثانویه، در هر دو حالت با و بدون پوشش گیاهی، افزایش می‌یابد. Shirazialiyan (2009) طول پخشیدگی کامل را در فلوم آزمایشگاهی با ایجاد زبری‌های متفاوت و در نسبت‌های مختلف عرض به عمق جریان بررسی کرد و نشان داد هر چه عمق آب کمتر و زبری بیشتر باشد طول پخشیدگی کمتر می‌شود. Saadatpour *et al.* (2011)، با استفاده از معادلات حاکم بر هیدرولیک جریان، حالت‌های مختلف جریان را برای افزایش قابلیت پخشیدگی جریان بررسی کردند و با مقایسهٔ آن‌ها نتیجه گرفتند در سرعت ثابت جریان ۰/۳۳ متر بر ثانیه مقدار ضریب بی‌بعد پخشیدگی عرضی با افزایش عمق جریان از ۵/۶۲ به ۱۱/۴ سانتی‌متر در کانال بررسی‌شده از ۰/۰۴۹۴۵ به ۰/۰۱۲۱ کاهش می‌یابد. آن‌ها بهترین روش کاهش طول پخشیدگی و افزایش راندمان کاهش غلظت را در جریان‌های آشفته معرفی کردند.

طول پخشیدگی به خصوصیات هیدرولیکی، شرایط پوشش گیاهی، و مشخصات جریان در کانال نیز وابسته است (Buschmann, 2005; Wang, 2003). بحث اصلی در هیدرولیک جریان مشخص کردن نیمرخ سرعت در کانال روباز در شرایط متفاوت است (Rowinski and Kubrak, 2002). در اکثر موارد افزایش سرعت متوسط جریان بر توانایی حمل مواد شیمیایی توسط جریان می‌افزاید. در نتیجه، میزان ضریب پخشیدگی عرضی این مواد کاهش و طول پخشیدگی کامل افزایش می‌یابد (Azizpour, 2011).

نیمرخ سرعت در مقاطع سهمی‌شکل، به دلیل شکل مقطع سهمی، با نیمرخ سرعت مقاطع رودخانه و کانال‌هایی که در پژوهش‌های قبلی انجام گرفته‌اند تفاوت دارد. این نیمرخ سرعت در سایر معادلات مربوط به طول و ضرایب پخشیدگی تأثیرگذار است. هدف این پژوهش ارزیابی و تعیین طول پخشیدگی املاح در یک مقطع سهمی‌شکل (غیر مستطیلی) در دبی‌های ورودی مختلف و ضریب زبری‌های متفاوت است.

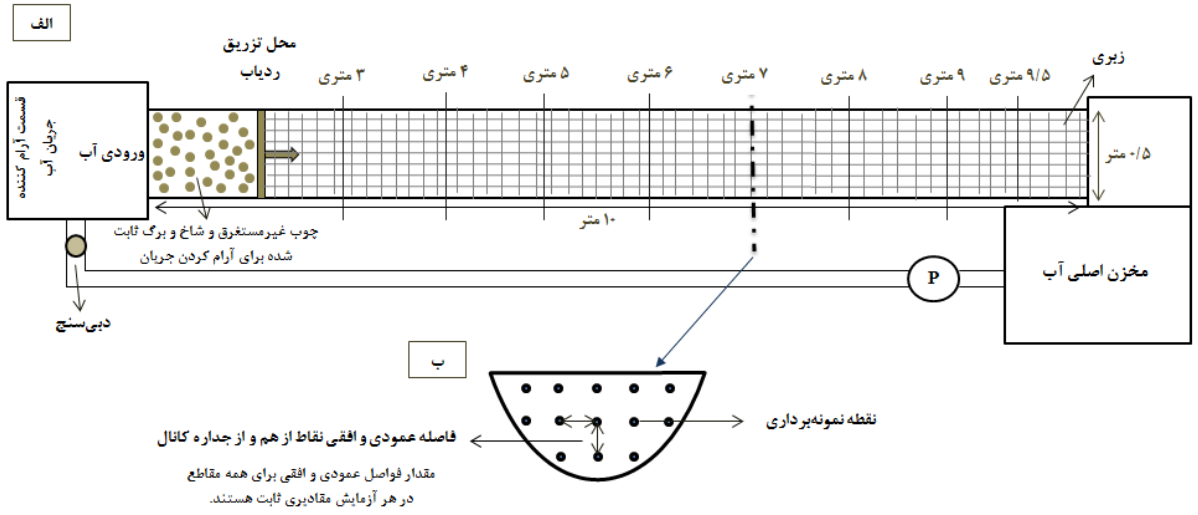
مواد و روش‌ها

آزمایش‌ها در کانالی با مقطع سهمی به طول ۱۰، عرض ۰/۵، و عمق ۰/۳ متر در فلوم تحقیقاتی آزمایشگاه هیدرولیک دانشگاه شهرکرد انجام گرفت. از آنجا که مقطع فلوم آزمایشگاهی مستطیل‌شکل بود، مقطع سهمی‌شکل مورد نظر با استفاده از جوش دادن میل‌گرد امکان‌پذیر شد. میل‌گردهای جوش‌داده‌شده به شکل سهمی بر کانال مستطیل‌شکل آزمایشگاه سوار شد و با پهن کردن صفحهٔ پلی‌اتیلن ۲ میلی‌متری بر میل‌گردها مقطع سهمی‌شکل کانال آماده شد. صفحهٔ پلی‌اتیلن سفت و در عین حال انعطاف‌پذیر است که با قرار دادن آن روی میل‌گردها شکل مورد نظر آماده شد. یکی از دلایل استفاده از صفحهٔ پلی‌اتیلن با این ضخامت وزن مناسب و عدم تغییر شکل آن در حین آزمایش بود. مقدار جریان خروجی از موتور پمپ (دبی ورودی به کانال) به کمک شیر تنظیم تعبیه‌شده روی لولهٔ رانش پمپ کنترل شد. آب در سیکل بسته از منبع اصلی وارد مخزن ابتدای فلوم می‌شد و از صافی‌های مشبک آرام‌کنندهٔ جریان، که به صورت عمودی در راستای جریان قرار دارند، عبور می‌کرد و وارد

Archive of SID

www.SID.ir

کانال می‌شد. برای آرام کردن جریان و سرعت بخشیدن به توسعه‌یافتگی جریان بر ۰/۵ متر از ابتدای فلوم در کف به ضخامت حداکثر ۵ سانتی‌متر سنگ‌ریزه ریخته شد و چوب‌های غیر مستغرق و شاخ و برگ کار گذاشته شد. عکس کانال آزمایشگاهی در شکل ۱ می‌آید.



شکل ۱. شماتیک کانال آزمایشگاهی استفاده‌شده الف) نما از بالا و ب) مقطع عرضی نمونه در یکی از مقاطع نمونه‌برداری

برای به دست آوردن ضریب پخشیدگی از محلول نمک کلرید سدیم به منزلهٔ مادهٔ ردیاب استفاده شد که در فاصلهٔ حدود ۲/۵ متری از ابتدای کانال در ترازی بالاتر از لبهٔ کانال از یک مخزن هوایی حاوی مادهٔ ردیاب در ارتفاع ثابت تزریق می‌شد. در این مکان، جریان کاملاً توسعه یافت و نوسانات در سطح آب به حد تعادل رسید. زیرا یکنواختی نیمرخ سرعت نشان‌دهندهٔ توسعه‌یافتگی جریان است. بنابراین، در فواصل ۲۰ سانتی‌متری در طول کانال برای دبی‌های ۵ تا ۱۵ لیتر بر ثانیه نیمرخ سرعت به دست آمد. در فاصلهٔ ۱/۵ تا ۲ متری کانال نیمرخ سرعت به صورت یکنواخت درآمد. یک لولهٔ انعطاف‌پذیر Lشکل مادهٔ ردیاب را از مخزن حاوی مادهٔ ردیاب دریافت و در مرکز سطح جریان ورودی به صورت دائمی تزریق می‌کرد. در هشت مقطع به فواصل ۳، ۴، ۵، ۶، ۷، ۸، ۹، و ۹/۵ متری از ابتدای کانال نیمرخ سرعت با استفاده از لولهٔ پیتوت به دست آمد. در هر مقطع از چندین نقطه عمود بر سه تراز عمقی سطح، مرکز، و کف کانال نمونه‌برداری انجام گرفت و برای تعیین غلظت مادهٔ ردیاب محلول نمک نمونه‌ها از دستگاه ECمتر استفاده شد و مقدار پخش عرضی ردیاب در مسیر جریان به دست آمد. نُه آزمایش برای سه دبی ورودی متفاوت و سه ضریب زبری مختلف انجام گرفت. تیمارهای دبی شامل دبی‌های حدود ۵، ۱۰، و ۱۵ لیتر بر ثانیه و تیمارهای ضریب زبری شامل ضریب زبری‌های حدود ۰/۰۲، ۰/۰۴، و ۰/۰۶ در نظر گرفته شد. مقدار ضریب زبری اول توسط کف کانال ایجاد شد. برای ایجاد ضریب زبری دوم دو توری با ضخامت و سوراخ‌های متفاوت در کانال روی هم پهن و با استفاده از گیره‌هایی روی دیوارهٔ کانال محکم شدند. برای ایجاد ضریب زبری سوم بین دو توری پهن‌شده شاخه‌های شمشاد نرم، به منزلهٔ پوشش گیاهی، قرار داده شد. مقدار ضریب زبری با استفاده از رابطهٔ مانینگ (رابطهٔ ۱) به دست آمد:

$$n = Q^{-1} A R^{\frac{2}{3}} S^{\frac{1}{2}}$$ (رابطهٔ ۱)

n ضریب زبری، Q دبی ورودی به کانال (متر مکعب بر ثانیه)، A سطح مقطع (متر مربع)، R شعاع هیدرولیکی (متر)، و S شیب هیدرولیکی است. زبری‌های استفاده‌شده در شکل ۲ می‌آید.

برای محاسبهٔ سطح مقطع در یک مقطع سهمی رابطهٔ ۲ به کار رفت (Walker and Skogerboe, 1987)؛ که در آن A سطح مقطع کانال، h عمق جریان، و σ_1 و σ_2 ضرایب هندسی‌شکل مقطع است. معادلهٔ سطح مقطع در کانال سهمی این پژوهش با رابطهٔ ۳ به دست آمد. شعاع هیدرولیکی برای مقطع سهمی‌شکل به کمک رابطهٔ ۴ حاصل می‌شود (Afzalimehr and Heidarpour, 2002)؛ که در آن w عرض جریان است. طول پخشیدگی محاسباتی بر اساس معادلهٔ به‌دست‌آمده از پژوهش‌های قبلی به کمک رابطهٔ ۵ محاسبه شد (Rutherford, 1994)؛ که در آن u سرعت در راستای جریان، e_y ضریب پخشیدگی عرضی، و L طول پخشیدگی کامل است. برای تعیین ضریب پخشیدگی عرضی نیز از رابطهٔ ۶ استفاده شد (Fischer, 1979):

$$A = \sigma_1 h^{\sigma_2}$$ (رابطهٔ ۲)

Archive of SID
www.SID.ir

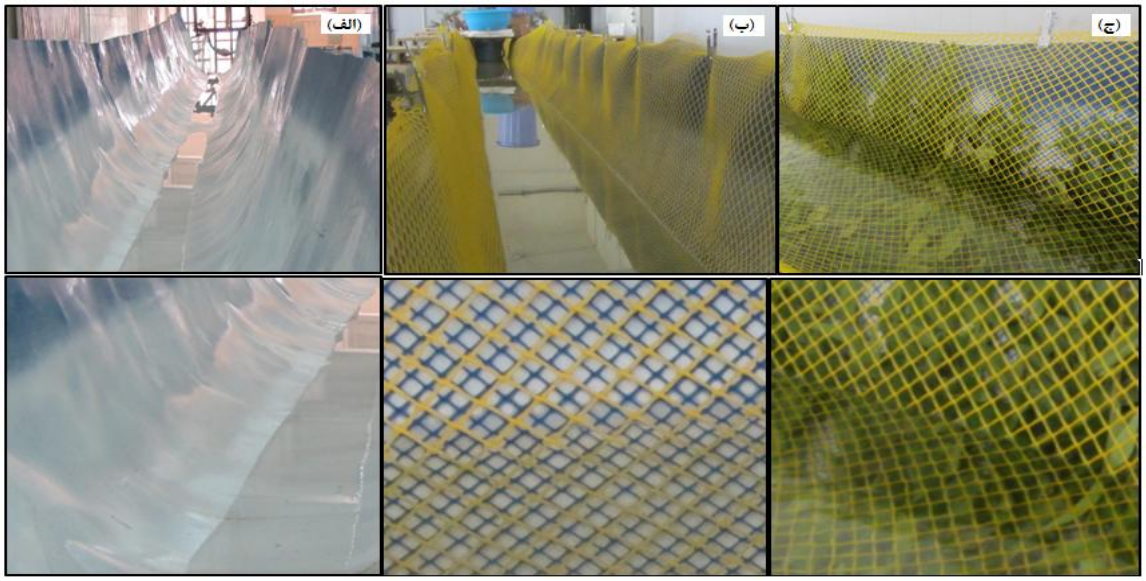
$$A = ۰/۴۳h^{۱/۲۶}$$ (رابطهٔ ۳)

$$R_h = \frac{۲w^{۲}h}{۳w^{۲}+۸h^{۲}}$$ (رابطهٔ ۴)

$$L = ۰/۱\frac{uw^{۲}}{e_y}$$ (رابطهٔ ۵)

$$e_y = \frac{۱}{۲}u\frac{d\sigma^{۲}}{dx}$$ (رابطهٔ ۶)

σ^2 واریانس توزیع غلظت و x طول انتشار ماده است. با ترسیم واریانس‌های مقاطع غلظت‌های نمونه‌برداری‌شده روی یک محور طولی، شیب واریانس‌ها ($\frac{d\sigma^{۲}}{dx}$) به دست آمد و با استفاده از این شیب و رابطهٔ یادشده میزان ضریب پخشیدگی عرضی در هر آزمایش به دست آمد.



شکل ۲. زبری‌های مختلف الف) کف کانال با ضریب زبری ۰/۰۲؛ ب) پهن کردن دو توری روی هم با ضریب زبری ۰/۰۴؛ ج) پوشش گیاهی بین توری‌ها با ضریب زبری ۰/۰۶

رابطه‌های یادشده برای طول و ضریب پخشیدگی عرضی تجربی است. بنابراین، از آنجا که معادلهٔ تئوری مشخصی برای ضریب پخشیدگی عرضی و طول پخشیدگی کامل وجود ندارد، نیاز است متغیرهای مهم و تأثیرگذار بر آن‌ها مشخص شوند. برای این منظور از تحلیل ابعادی استفاده شد. در جریان درون یک کانال سهمی‌شکل پارامترهایی مانند دبی ورودی، سرعت متوسط جریان، سرعت برشی جریان، رینولدز برشی، سطح مقطع، عمق و عرض جریان، و ضریب پخشیدگی عرضی وابسته‌اند. در این صورت می‌توان رابطهٔ ۷ را به دست داد:

$$L = f\left(Q,h,w,\upsilon,K_s,u^*,u,\frac{d\sigma^{۲}}{dx}\right)$$ (رابطهٔ ۷)

Q دبی ورودی جریان، υ ضریب گرانروی سینماتیکی، K_s ارتفاع مطلق زبری، و u^* سرعت برشی‌اند. در نتیجه، رابطهٔ ۸ به دست می‌آید:

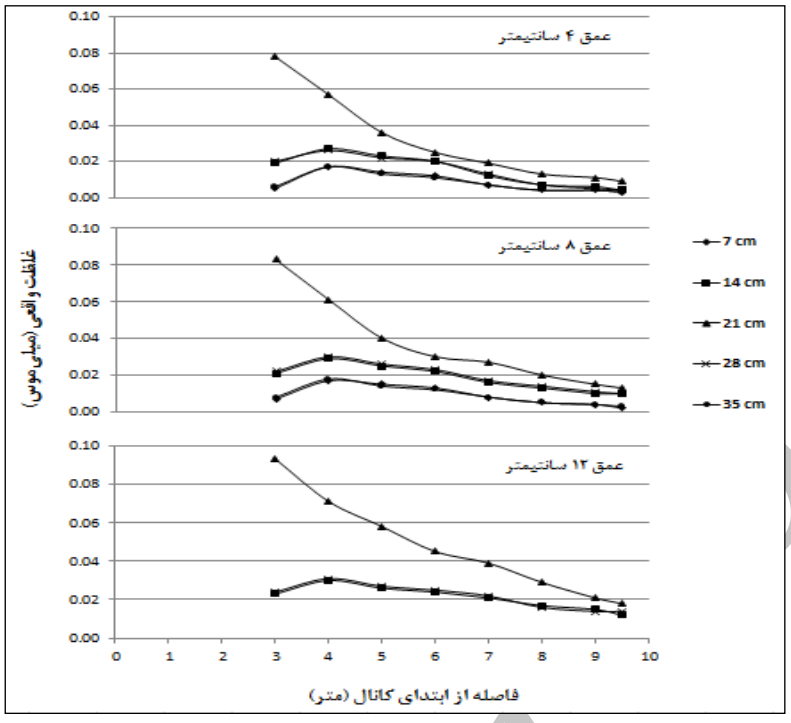
$$\frac{L}{w} = f\left(\frac{Q}{e_y h},\mathrm{Re}^*\right)$$ (رابطهٔ ۸)

Re^* عدد رینولدز برشی است.

طول پخشیدگی به‌کاررفته در رابطهٔ ۸ طول پخشیدگی مشاهده‌ای است که بر اساس داده‌های آزمایشگاهی و نیمرخ‌های غلظت به‌دست‌آمده در مقاطع مختلف کانال با روندیابی توزیع غلظت در طول کانال حاصل شد. در قسمت نمونه‌برداری از آب برای تعیین غلظت، نمونه‌ها در هر مقطع از نقاطی با فواصل عمودی و افقی مشخص نسبت به سطح و عمق آب برداشت شدند. فواصل عمودی و افقی این نقاط از مبدأ مشخص (جدارهٔ کانال در سطح جریان در هر مقطع) برای همهٔ نقاط نمونه‌برداری از هشت مقطع طولی یکسان بودند. روندیابی[1] با وصل کردن مقدار غلظت نقاط هشت مقطع در طول کانال با استفاده از نرم‌افزار اکسل انجام گرفت. برای به دست آوردن طول پخشیدگی در روندیابی از تعریف تئوری آن استفاده شد که می‌گوید پخشیدگی کامل زمانی صورت خواهد گرفت که مواد آلاینده به طور کامل در عرض و عمق کانال پخش شود تا جایی که همهٔ سطح مقطع جریان دارای غلظتی معادل ۱ درصد غلظت اولیه شوند. در شکل ۳ نحوهٔ روندیابی یکی از آزمایش‌ها می‌آید.

1. Routing

Archive
www.SID.ir



شکل ۳. روندیابی غلظت در یکی از آزمایش‌ها

در شکل ۳ سه شکل برای تراز عمقی سطح (۴ سانتی‌متر)، مرکز (۸ سانتی‌متر)، و کف کانال (۱۲ سانتی‌متر) به دست آمد. در هر شکل خطوطِ کشیده‌شده غلظت را در نقاطی از همهٔ مقاطع نشان می‌دهد که فواصل افقی یکسان از مبدأ مربوطه دارند.

روش‌های مختلفی برای تعیین سرعت برشی وجود دارد که در این پژوهش از روش ویژگی‌های لایهٔ مرزی و روش برازش قانون لگاریتمی بر داده‌های سرعت استفاده شد. در این روش از همهٔ سرعت‌های نقطه‌ای نیمرخ سرعت جهت محاسبهٔ سرعت برشی استفاده شد که در رابطهٔ ۹ دیده می‌شود (Afzalimehr and Anctil, 2000):

$$u^{*} = \frac{(\delta_{*} - \theta)u_{\max}}{۴/۴\delta_{*}} \qquad \text{(رابطهٔ ۹)}$$

u^{*} سرعت برشی، u_{max} حداکثر سرعت نقطه‌ای در راستای قائم، δ_{*} ضخامت جابه‌جایی لایهٔ مرزی، و θ ضخامت اندازهٔ حرکت لایهٔ مرزی است. δ_{*} و θ به کمک روابط ۱۰ و ۱۱ به دست آمدند (Afzalimehr and Anctil, 2000):

$$\delta_{*} = \int_{0}^{h}\left(۱ - \frac{u}{u_{\max}}\right)dy \qquad \text{(رابطهٔ ۱۰)}$$

$$\theta = \int_{0}^{h}\frac{u}{u_{\max}}\left(۱ - \frac{u}{u_{\max}}\right)dy \qquad \text{(رابطهٔ ۱۱)}$$

u سرعت در راستای قائم y از عمق آب h است. در روابط ۱۰ و ۱۱، با استفاده از سرعت لحظه‌ای در عمق‌های اندازه‌گیری‌شدهٔ سرعت و حداکثر سرعت نقطه‌ای در این مقطع، پارامترهای ضخامت جابه‌جایی و اندازهٔ حرکت لایهٔ مرزی و سرعت برشی به دست آمدند.

عدد رینولدز برشی به کمک رابطهٔ ۱۲ به دست آمد (Kouchakzadeh *et al.*, 2006):

$$\mathrm{Re}^{*} = \frac{u^{*}K_{s}}{\upsilon} \qquad \text{(رابطهٔ ۱۲)}$$

Re^{*} عدد رینولدز برشی، u^{*} سرعت برشی (متر بر ثانیه)، K_s ارتفاع مطلق زبری (متر)، و υ ضریب گرانروی سینماتیکی (1.007×10^{-6} متر مربع بر ثانیه) است. بر اساس اندازه‌گیری‌های آزمایشگاهی، ارتفاع مطلق زبری برای ضریب زبری‌های ۰٫۰۲، ۰٫۰۴، و ۰٫۰۶ به ترتیب ۰٫۰۰۱، ۰٫۰۰۶، و ۰٫۰۱۵ متر به دست آمد.

در این پژوهش، ضریب پخشیدگی عرضی و طول پخشیدگی محاسباتی، به کمک رابطه‌هایی که در بالا آمد، محاسبه شد و طول پخشیدگی مشاهده‌ای نیز با روندیابی با استفاده از نرم‌افزار اکسل به دست آمد. همچنین، به کمک رگرسیون مرحله‌ای در نرم‌افزار آماری SAS معادله‌ای برای طول پخشیدگی مشاهده‌ای، بر حسب پارامترهای تأثیرگذار بر آن، ارائه شد.

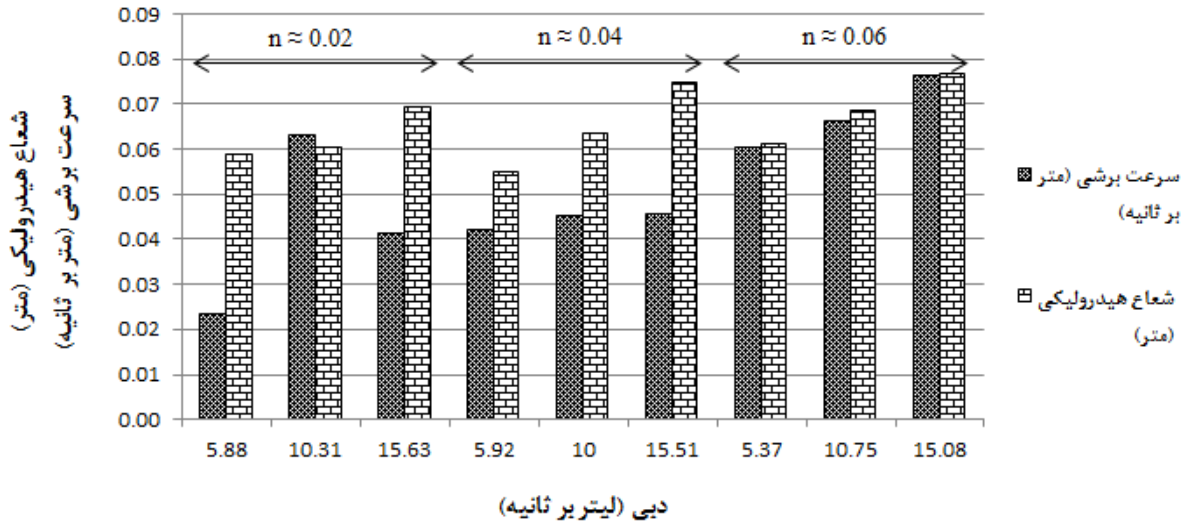
Archive of SID
www.SID.ir

یافته‌ها و بحث

سرعت متوسط، رینولدز برشی، و عمق و عرض سطح آزاد جریان در سطوح مختلف دبی و ضریب زبری برای آزمایش‌ها در جدول ۲ می‌آید. همان‌گونه که جدول ۲ نشان می‌دهد افزایش دبی باعث افزایش سرعت و عمق جریان می‌شود. همچنین، به دلیل غیر مستطیلی (سهموی) بودن مقطع کانال، با افزایش دبی عرض جریان نیز افزایش پیدا می‌کند. با افزایش دبی و ضریب زبری مقدار عدد رینولدز برشی نیز افزایش می‌یابد. تأثیر مقادیر مختلف ضریب زبری بر عدد رینولدز برشی بیشتر از تأثیر مقادیر دبی بر این عدد است. در شکل ۴ تغییرات شعاع هیدرولیکی و سرعت برشی نسبت به مقادیر دبی و ضریب زبری می‌آید.

جدول ۲. سرعت متوسط، رینولدز برشی، و عمق و عرض جریان در سطوح مختلف دبی و ضریب زبری

دبی (لیتر بر ثانیه)	ضریب زبری	عمق جریان (سانتی‌متر)	عرض سطح آزاد جریان (سانتی‌متر)	سرعت متوسط (متر بر ثانیه)	رینولدز برشی
۵٫۸۸	۰٫۰۲۴	۱۱٫۰۹	۳۵٫۶۳	۰٫۲۰۷۷	۲۳٫۱۵
۱۰٫۳۱	۰٫۰۲۰	۱۱٫۳۰	۳۶٫۷۵	۰٫۳۶۸۵	۶۲٫۴۰
۱۵٫۶۳	۰٫۰۲۵	۱۳٫۹۵	۳۸٫۶۳	۰٫۴۲۴۰	۴۰٫۷۰
۵٫۹۲	۰٫۰۴۲	۹٫۹۰	۳۵٫۵۰	۰٫۲۵۳۳	۲۵۰٫۴۹
۱۰	۰٫۰۴۴	۱۲٫۱۰	۳۷٫۶۳	۰٫۳۲۹۶	۲۶۷٫۴۶
۱۵٫۵۱	۰٫۰۴۱	۱۵٫۹۵	۳۹٫۸۸	۰٫۳۵۷۳	۲۷۱٫۱۸
۵٫۳۷	۰٫۰۶۳	۱۱٫۵۰	۳۶٫۸۸	۰٫۲۵۵۹	۸۹۷٫۵۳
۱۰٫۷۵	۰٫۰۶۰	۱۳٫۶۰	۳۸٫۷۵	۰٫۳۵۲۴	۹۸۳٫۳۶
۱۵٫۰۸	۰٫۰۶۱	۱۶٫۴۹	۴۰٫۸۸	۰٫۴۱۲۳	۱۱۳۳٫۷۹



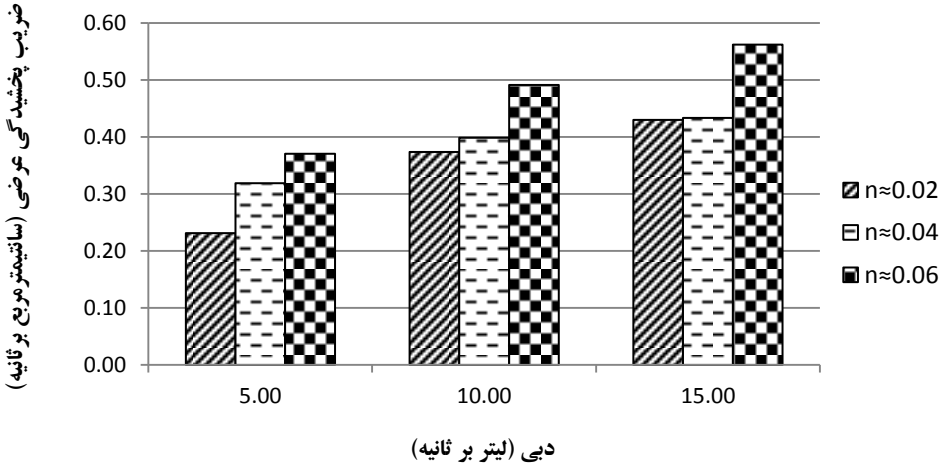
شکل ۴. شعاع هیدرولیکی و سرعت برشی در دبی‌ها و ضریب زبری‌های مختلف

شکل ۴ نشان می‌دهد دبی و ضریب زبری رابطه‌ای مستقیم با سرعت برشی دارند. چون با افزایش دبی و ضریب زبری سرعت برشی نیز افزایش می‌یابد. در مورد شعاع هیدرولیکی نیز همین‌طور است؛ با افزایش دبی و ضریب زبری، شعاع هیدرولیکی نیز نسبتاً روند افزایشی دارد. ضریب پخشیدگی عرضی در سطوح مختلف دبی و ضریب زبری در شکل ۵ می‌آید. مطابق شکل ۵، مقادیر ضریب پخشیدگی عرضی بین ۰٫۲۳ تا ۰٫۵۶ سانتی‌متر مربع بر ثانیه برای سطوح مختلف دبی و ضریب زبری به دست آمد. در ضریب زبری‌های ثابت، با افزایش دبی، ضریب پخشیدگی عرضی افزایش یافت. همچنین، در دبی‌های ورودی ثابت، با افزایش ضریب زبری، ضریب پخشیدگی عرضی بالا رفت.

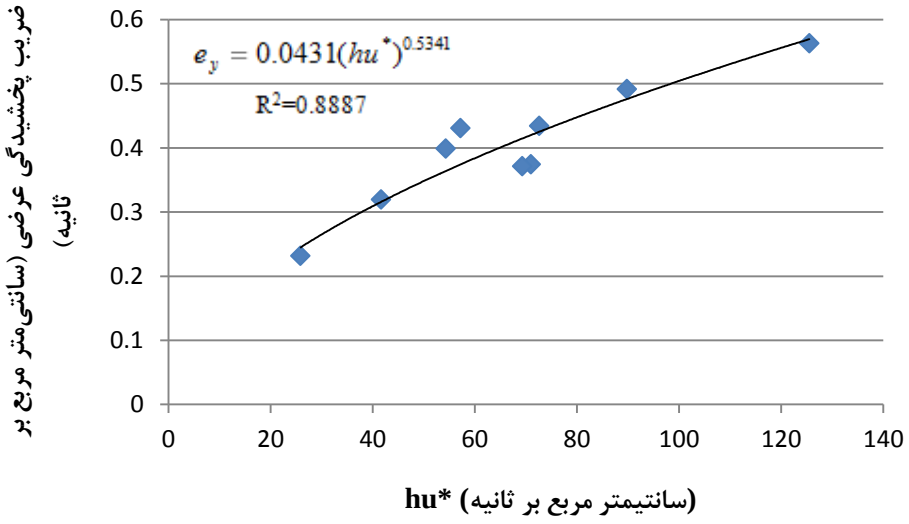
مقایسهٔ نتایج نشان می‌دهد مقادیر مختلف ضریب زبری و دبی ورودی اعمال‌شده در این پژوهش تا ۵۹ درصد در مقادیر

www.SID.ir

ضریب پخشیدگی عرضی تغییر ایجاد کرده است. در دبی‌های مختلف با دو برابر شدن ضریب زبری، به طور میانگین، ضریب پخشیدگی تا ۱۰ درصد و با سه برابر شدن ضریب زبری تا ۲۷ درصد افزایش یافت. در ضریب زبری‌های مختلف با دو برابر شدن دبی ضریب پخشیدگی به طور میانگین تا ۲۷ درصد و با سه برابر شدن دبی تا ۳۵ درصد افزایش یافت. نتایج پژوهش‌های Miller and Richardson (1974) و Chau (2000) و Tabatabaei *et al.* (2013) نتایج این پژوهش را تأیید می‌کنند. Saadatpour *et al.* (2011) اعلام کردند، در سرعت ثابت جریان، مقدار ضریب بی‌بعد پخشیدگی عرضی با افزایش عمق جریان در کانال بررسی‌شده کاهش می‌یابد. در این پژوهش افزایش دبی ورودی باعث افزایش سرعت و عمق و عرض جریان (به دلیل مقطع سهمی‌شکل) شد و با توجه به رابطهٔ ۶ افزایش سرعت به افزایش ضریب پخشیدگی عرضی انجامید. Azizpour (2011) نشان داد فاکتور اصطکاک و عمق متوسط جریان در ضریب پخشیدگی عرضی آلودگی نقش ایفا می‌کنند؛ طوری که با افزایش فاکتور اصطکاک ضریب پخشیدگی عرضی افزایش می‌یابد.



شکل ۵. ضریب پخشیدگی عرضی در دبی‌ها و ضریب زبری‌های مختلف



شکل ۶. ضریب پخشیدگی عرضی در hu^* دبی‌ها و ضریب زبری‌های مختلف

بر اساس پژوهش‌های انجام‌شده در کانال‌های مستطیلی بین ضریب پخشیدگی عرضی و hu^* رابطهٔ خطی وجود دارد. ضریب پخشیدگی عرضی در مقابل حاصل‌ضرب عمق جریان در سرعت برشی (hu^*) دبی‌ها و ضریب زبری‌های مختلف در کانال سهمی‌شکل این پژوهش در شکل ۶ می‌آید.

در شکل ۶ ملاحظه می‌شود که رابطهٔ بین ضریب پخشیدگی عرضی و hu^* در سطوح مختلف دبی و ضریب زبری درنظرگرفته‌شده در کانال سهمی‌شکل این پژوهش برای نُه حالت مختلف درنظرگرفته‌شده خطی نیست؛ بلکه به صورت رابطهٔ توانی ۱۳ به دست آمده است:

www.SID.ir

$$e_y = ۰/۰۴۳۱(hu^*)^{۰/۵۳۴۱}$$ (رابطهٔ ۱۳)

در کانال سهمی‌شکل، شکل مقطع کانال بر نیمرخ سرعت تأثیرگذار است و به دلیل تأثیر زیاد سرعت در ضریب پخشیدگی عرضی رابطهٔ این ضریب با hu^* خطی نیست؛ در حالی که در پژوهش‌هایی که در کانال‌های مستطیل‌شکل انجام شده این رابطهٔ خطی به دست آمده است.

طول پخشیدگی محاسباتی به‌دست‌آمده با رابطهٔ ۵ و طول پخشیدگی مشاهده‌ای به‌دست‌آمده با داده‌های آزمایش و روندیابی در ضریب زبری‌ها و دبی‌های ورودی مختلف برای کانال سهمی‌شکل این آزمایش در جدول ۳ می‌آید:

جدول ۳. طول پخشیدگی محاسباتی و مشاهده‌ای در ضریب زبری‌ها و دبی‌های ورودی مختلف

دبی (لیتر برثانیه)	ضریب زبری	طول پخشیدگی محاسباتی (متر)	طول پخشیدگی مشاهداتی (متر)	نسبت طول پخشیدگی مشاهداتی به عرض سطح آزاد جریان (L/w)
۵/۸۸	۰/۰۲۴	۱۱۳/۸۲	۱۲۹/۴۷	۳۶۳/۴۳
۱۰/۳۱	۰/۰۲۰	۱۳۳/۰۶	۱۵۳/۰۱	۴۱۶/۳۵
۱۵/۶۳	۰/۰۲۵	۱۴۶/۹۸	۱۶۹/۷۶	۴۳۹/۵۱
۵/۹۲	۰/۰۴۲	۱۰۰/۰۲	۱۱۵/۷۹	۳۲۶/۱۶
۱۰	۰/۰۴۴	۱۱۷/۰۰	۱۳۴/۳۴	۳۵۷/۰۱
۱۵/۵۱	۰/۰۴۱	۱۳۰/۸۷	۱۴۹/۳۵	۳۷۴/۵۴
۵/۳۷	۰/۰۶۳	۹۳/۷۸	۱۰۸/۱۷	۲۹۳/۳۵
۱۰/۷۵	۰/۰۶۰	۱۰۷/۶۴	۱۲۱/۹۷	۳۱۴/۷۵
۱۵/۰۸	۰/۰۶۱	۱۲۲/۴۰	۱۴۰/۴۷	۳۴۳/۶۶

طول پخشیدگی مشاهده‌ای در ضریب زبری‌ها و دبی‌های ورودی گفته‌شده از ۱۰۸ تا ۱۷۰ متر و طول پخشیدگی محاسباتی ۹۳ تا ۱۴۷ متر به دست آمد. در ضریب زبری‌های ثابت، با افزایش دبی، طول پخشیدگی کامل افزایش و در دبی‌های ورودی ثابت، با افزایش ضریب زبری، طول پخشیدگی کامل کاهش یافت. مقادیر مختلف ضریب زبری و دبی ورودی در این پژوهش تا ۳۶ درصد بر طول پخشیدگی تأثیرگذارند. طول پخشیدگی در دبی‌های مختلف، با دو برابر شدن ضریب زبری، به طور میانگین تا ۱۱ درصد و با سه برابر شدن ضریب زبری تا ۱۸ درصد کاهش یافت. در ضریب زبری‌های مختلف با دو برابر شدن دبی، به طور میانگین، طول پخشیدگی تا ۱۳ درصد و با سه برابر شدن دبی تا ۲۳ درصد افزایش یافت. نتایج پژوهش Shirazialiyan (2009) نتایج این پژوهش را تأیید می‌کند. طول پخشیدگی رابطه‌ای یکنواخت با سرعت برشی ندارد. زیرا روند سرعت برشی افزایشی است؛ در صورتی که طول پخشیدگی با افزایش ضریب زبری کاهش می‌یابد. افزایش دبی ورودی باعث افزایش سرعت و عمق و عرض جریان می‌شود. با توجه به رابطهٔ ۴ افزایش سرعت و عرض جریان به افزایش طول پخشیدگی می‌انجامد. طول پخشیدگی مشاهده‌ای متفاوت از طول پخشیدگی محاسباتی و در حدود ۱۱+ تا ۱۴+ درصد به دست آمد و بر این اساس رابطهٔ تجربی ۵، که برای مقاطع مستطیلی استفاده می‌شود، برای مقاطع غیر مستطیلی کاربرد ندارد. بنابراین، در این پژوهش برای شرایط گفته‌شده در یک کانال سهمی‌شکل بر اساس مقادیر دبی ورودی، ضریب پخشیدگی عرضی، عدد رینولدز برشی، عمق و عرض سطح آزاد جریان برای هر نُه حالت مختلف، با استفاده از نرم‌افزار آماری SAS، رابطهٔ ۱۴ برای طول پخشیدگی ارائه شد:

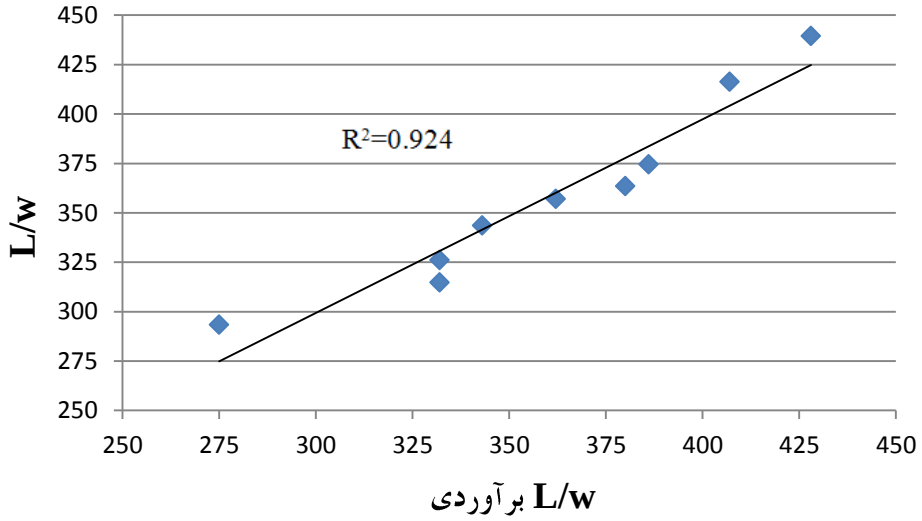
$$\frac{L}{w} = ۰/۱۴۵\frac{Q}{e_y h} + ۰/۰۵۳\,\mathrm{Re}^* + ۴۵/۳۸$$ (رابطهٔ ۱۴)

رگرسیون چندمرحله‌ای نشان داد ضریب تبیین برای پارامترهای $\frac{Q}{e_y h}$ و Re^* به ترتیب برابر ۸۷ و ۷ درصد است. بنابراین ($\frac{Q}{e_y h}$) مهم‌ترین پارامتر در توجیه تغییرات طول پخشیدگی است. همچنین، نسبت طول پخشیدگی مشاهداتی به عرض سطح جریان در حالت واقعی نسبت به حالت برآوردی در شکل ۷ می‌آید.

شکل ۷ همبستگی ۹۲/۴ درصدی را بین نسبت طول پخشیدگی مشاهداتی به عرض سطح جریان در حالت واقعی به نسبت طول پخشیدگی مشاهداتی به عرض سطح جریان در حالت برآوردی نشان می‌دهد.

Archive of SID

www.SID.ir



شکل ۷. نسبت طول پخشیدگی مشاهداتی به عرض سطح آزاد جریان در حالت واقعی نسبت به حالت برآوردی

نتیجه‌گیری

در این پژوهش، برای بررسی پخش املاح، طول پخشیدگی در یک کانال سهمی‌شکل در دبی‌های ورودی مختلف و ضریب زبری‌های متفاوت مطالعه شد. نتایج نشان داد:

- مقادیر مختلف دبی ورودی و ضریب زبری اعمال‌شده در این پژوهش تا ۵۹ درصد در مقادیر ضریب پخشیدگی عرضی تغییر ایجاد کردند و تا ۳۶ درصد بر طول پخشیدگی تأثیر گذاشتند.
- با افزایش مقادیر دبی ورودی و ضریب زبری، مقادیر شعاع هیدرولیکی و سرعت برشی و سرعت متوسط افزایش یافتند.
- در دبی‌های مختلف با دو برابر شدن ضریب زبری، به طور میانگین، ضریب پخشیدگی تا ۱۰ درصد افزایش و طول پخشیدگی تا ۱۱ درصد کاهش یافت. همچنین با سه برابر شدن ضریب زبری، به طور میانگین، ضریب پخشیدگی تا ۲۷ درصد افزایش و طول پخشیدگی تا ۱۸ درصد کاهش یافت.
- در ضریب زبری‌های مختلف، با دو برابر شدن دبی، ضریب پخشیدگی به طور میانگین تا ۲۷ درصد و طول پخشیدگی تا ۱۳ درصد افزایش یافت. همچنین، با سه برابر شدن دبی، ضریب پخشیدگی به طور میانگین تا ۳۵ درصد و طول پخشیدگی تا ۲۳ درصد افزایش یافت.
- به دلیل تأثیر شکل مقطع کانال رابطهٔ ضریب پخشیدگی عرضی با hu^* برای سطوح دبی و ضریب زبری درنظرگرفته‌شده در این پژوهش به صورت غیر خطی به دست آمد.
- در شرایط پژوهش رابطه‌ای برای طول پخشیدگی کامل ارائه شد. این رابطه نشان می‌دهد دبی ورودی و ضریب پخشیدگی عرضی پارامترهایی بسیار تاثیرگذار در مقدار طول پخشیدگی‌اند.

REFERENCES

Afzalimehr, H. and Anctil, F. (2000). Accelerating shear velocity in gravel bed channels. *Journal of Hydrolgy*, (45), pp 113-124.

Afzalimehr, H. and Heidarpour, M. (2002).*Fundamentals of open channel hydrodynamics*. Arkan press, p. 383. (In Farsi)

Azizpour, M. (2011). *Empirical Study of the transverse diffusion coefficient of pollution in channel*. Ms Thesis. Department of Irrigation & Reclamation Engineering, Faculty of Agriculture, University of Tehran.(In Farsi)

Boxall, J. B. and Guymer, I. (2000). Estimating transverse mixing coefficients. *Water and Maritime Engineering*, (4), pp 263-275.

Buschmann, M. H. (2005). New mixing-length approach for the mean velocity profile of turbulent boundary layers. *Journal of Fluids Engineering*, 127(2):393–396.

Chau, K. (2000). Transverse mixing coefficient measurements in an open rectangular channel. *Advances in Environmental Research*, (4), pp 287-294.

Deng, Z. (2002). Longitudinal dispersion coefficient in single-channel streams. *Journal of Hydraulic Engineering*, 128:901-909.

Fischer, H. (1979). *Mixing in Inland and Coastal Waters*. Academic press, p. 302.

Gualtieri, C. and Mucherino, C. (2007). Transverse turbulent diffusion in straight rectangular

Archive of SID
www.SID.ir

channels. *5th International Symposium on Environmental Hydraulics* (ISEH 2007), Tempe (USA), December, p 1-8.

Kouchakzadeh, S., Akram, M., and Bagheri, F. (2006). Hydraulic performance of corrugated pipes and developing applied conveyance relations for corrugated pipes based on their hydraulic performance. *Journal of Agriculture Engineering Research*. 27(7):1-18.

Lau, Y. and Krishnappan, B. (1977). Transverse dispersion in rectangular channels. *Journal of Hydraulic*, 103:1173-1189.

Miller, A. and Richardson, E. (1974). Diffusion and dispersion in open channel flow. *Journal of the Hydraulics Division*, 100:159-171.

Pourabadeyi, M., Amiri tokaldany, E., and Liaghat, A. (2007). Study Effect of flow parameters on transverse diffusion coefficient of contaminant in are ctangular channel. *6th Iranian Hydraulic Conference*, university of shahrekord, Shahrekord. IRAN. (In Farsi)

Rowinski, P. M. and Kubrak, J. (2002). A mixing-length model for predicting vertical velocity distribution in flows through emergent vegetation. *Hydrological Sciences-Journal-des Sciences Hydrologiques*. 47(6):893-904.

Rutherford, J. (1994). *River mixing*. John Wiley and Sons, Ltd. England, p. 347.

Saadatpour, A., Heidarpor, M., and Tabatabaei, S. H. (2011). Determination of complete mixing length in a rectangular flume. *Iranian Water Research Journal*, 5(9):11-18. (In Farsi)

Shirazialiyan, P. (2009). *The Effect of Vegetation on Process of Dispersion of Pollution in a Rectangular channel*. Ms Thesis. Department of Water Engineering, Faculty of Agriculture, Isfahan University of Technology. (In Farsi)

Tabatabaei, S. H., Heidarpour, M., Ghasemi, M., and Hoseinipour, E.,Z. (2013). Transverse Mixing Coefficient on Dunes with Vegetation on a Channel Wall. *World Environmental & Water Resources Congress*. MAY 19-23, 2013.Cincinnati. OHIO. USA.

Walker, W. R. and Skogerboe, G. V. (1987). *Surface Irrigation: Theory and Practice*. Prentice-Hall. Englewood Cliffs. New Jersey.

Wang, C. (2003). *Experimental Research on Channel Flow with Vegetation*. Ph. D dissertation. HoHai University, Nanjing, p. 150. (in Chinese)

West, J. R. and Cotton, A. P. (1980). Transverse diffusion for unidirectional flow in wide open channels. *Proceedings Institution of Civil Engineers*, (2), pp 491-498.

Archive of SID

www.SID.ir