

## مطالعه آزمایشگاهی ساختار جریان آشفته در یک کانال مستقیم با بستر زبر

سید حسین مهاجری<sup>۱\*</sup>، اکبر صفرزاده<sup>۲</sup>، سید علی اکبر صالحی نیشابوری<sup>۳</sup> و مسعود قدسیان<sup>۴</sup>

### چکیده

در شرایط جریان با جداره زبر، خصوصیات آماری جریان در ناحیه داخلی لایه مرزی علاوه بر ویژگی‌های جریان آشفته (لزجت سیال)، از ابعاد عناصر زبر نیز تأثیر می‌پذیرد. حضور اجزای زبر در بستر کانال، موجب تغییر شرایط طبیعی کانال می‌شود، زبری، جریان‌های ثانویه را تقویت و به این واسطه اثر مهمی در جابه‌جایی و انتقال جانبی رسوب ایفا می‌کند. در این مقاله به بررسی اثر زبری بر مشخصات هیدرولیکی جریان آشفته در یک کانال مستقیم روباز با مقطع عریض پرداخته شده است. به بیان دقیق‌تر در این مقاله مشخصات جریان در شرایط تشکیل جریان ثانویه تحت اثر زبری بررسی شده است. نتایج نشان داده که سرعت طولی و خصوصیات آشفتگی جریان در مقطع عرضی تغییر می‌کنند. ممان‌های مرتبه اول (سرعت متوسط) و مرتبه دوم (شدت آشفتگی) در اثر تشکیل جریان ثانویه از معادلات تئوری موجود انحراف پیدا می‌کنند. این تغییرات و انحراف از معادلات تئوری در نقاط نزدیک به جداره مشهودتر است. به علاوه تنش برشی نیز در مقطع عرضی تغییرات محسوسی از خود نشان می‌دهد. دامنه نوسان تنش برشی در مقطع عرضی، ۳۵٪ تنش برشی متوسط است.

**واژه‌های کلیدی:** بستر زبر، جریان‌های ثانویه، جریان آشفته، کانال روباز، مطالعه آزمایشگاهی.

ارجاع: مهاجری س. ح. صفرزاده ا. صالحی نیشابوری س. ع. ا. و قدسیان م. ۱۳۹۸. مطالعه آزمایشگاهی ساختار جریان آشفته در یک کانال مستقیم با بستر زبر. مجله پژوهش آب ایران. ۳۴: ۸-۱.

۱- استادیار گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه خوارزمی.  
۲- دانشیار گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل.  
۳- استاد، دانشکده مهندسی عمران و محیط‌زیست، دانشگاه تربیت مدرس، تهران.  
۴- استاد، دانشکده مهندسی عمران و محیط‌زیست، دانشگاه تربیت مدرس، تهران.

\* نویسنده مسئول: [hossein.mohajeri@khu.ac.ir](mailto:hossein.mohajeri@khu.ac.ir)

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۴/۰۲/۰۷

تاریخ دریافت: ۱۳۹۳/۰۶/۱۶

## مقدمه

بدون هیچ اغراقی کمتر مثالی از حرکت سیال را می‌توان یافت که جریان آن آشفته نباشد. آشفتگی را عوامل گوناگونی تقویت می‌کند. زبری جداره‌ها از جمله عواملی است که با افزایش بی‌نظمی در جریان موجبات بیشتر شدن آشفتگی را فراهم می‌آورد (نزو و ناکاگوا، ۱۹۹۳). براساس رژیم جریان، سه نوع بستر به نام‌های بستر هیدرولیکی کاملاً صاف، بسترهای نیمه‌زبر و بسترهای کاملاً زبر وجود دارد. در بسترهای هیدرولیکی کاملاً صاف، اثر زبری کف از بین می‌رود. این در حالی است که در بسترهای کاملاً زبر به خاطر نفوذ بیشتر اجزای زبر در لایه مرزی آشفته، اثر لزجت سیال از بین می‌رود. معیار طبقه‌بندی فوق، براساس عدد بی‌بعد زبری است  $(k_s^+ = k_s U_* / \nu)$ . در این رابطه  $k_s$  زبری معادل نیکورادزه،  $\nu$  لزجت سینماتیکی سیال و  $U_*$  سرعت برشی است. چنانچه این عدد از پنج کوچک‌تر باشد، رژیم جریان صاف در نظر گرفته می‌شود. اما اگر این عدد از هفتاد بزرگ‌تر باشد، رژیم جریان زبر در نظر گرفته شده و چنانچه این عدد مابین پنج و هفتاد باشد، رژیم جریان از نوع نیمه زبر است (نزو و ناکاگوا، ۱۹۹۳).

در بررسی حرکت سیال، موارد بسیاری را می‌توان یافت که سیال در مسیری خارج از مسیر اصلی‌اش جریان پیدا می‌کند. جریان جانبی در محل آبگیرها، جریان ایجاد شده در رودخانه‌های شریانی، جریان در کانال‌های دارای انحنا، همگی مواردی هستند که سیال در راستایی غیر از مسیر اصلی‌اش جریان پیدا می‌کند (نزو و ناکاگوا، ۱۹۹۳). به حرکت سیال در مسیری غیر از مسیر اصلی، جریان ثانویه گفته می‌شود. در مهندسی هیدرولیک، مطالعه جریان‌های ثانویه اهمیت خاصی دارد. جریان‌های ثانویه نقش به‌سزایی در انتقال رسوب، مقاومت هیدرولیکی و فرآیند پخش مواد ایفا می‌کنند (کارکز، ۱۹۶۶؛ نزو، ۲۰۰۵؛ ماریون و زاراملا، ۲۰۰۶). در جریان آب در یک کانال مستقیم روباز، جریان ثانویه ناشی از آشفتگی زمانی شکل می‌گیرد که سرعت‌های جانبی در حدود ۵٪ سرعت طولی جریان باشد (نزو و ناکاگوا، ۱۹۹۳؛ رودریگز و گارسیا، ۲۰۰۸). به‌منظور مطالعه جریان ثانویه، کانال‌های روباز براساس نسبت عرض کانال به عمق آب به دو دسته کانال‌های عریض و باریک تقسیم می‌شوند. در کانال‌های عریض نسبت عرض کانال به عمق آب بزرگ‌تر از پنج

است. این در حالی است که در کانال‌های باریک این نسبت کوچک‌تر از پنج می‌باشد (نزو و ناکاگوا، ۱۹۹۳). بررسی‌های گذشته نشان داده است که در کانال‌های باریک اثر جداره‌های جانبی در تشکیل جریان ثانویه مشهود بوده و جریان‌های ثانویه مشهودی تشکیل می‌شود؛ ولی در کانال‌های عریض (با نسبت عرض به عمق بین ۵ تا ۱۰) امکان تشکیل جریان ثانویه در کل مقطع عرضی وجود ندارد (نزو، ۲۰۰۵). با وجود تشکیل نشدن جریان ثانویه در کانال‌های عریض، مطالعه جریان روی بستر زبر و در کانال‌های عریض حاکی از تشکیل جریان‌های ثانویه است (نیکورا و همکاران، ۱۹۹۸؛ رودریگز و گارسیا، ۲۰۰۸). رودریگز و گارسیا (۲۰۰۸) به بررسی جریان ثانویه، خصوصیات آشفتگی جریان و تغییرات عرضی جریان در یک کانال مستقیم پرداختند. آن‌ها دلیل پایداری جریان ثانویه را تقویت گردابه سطحی در گوشه کانال و در نزدیکی جداره جانبی دانستند. در ادامه مطالعات رودریگز و گارسیا (۲۰۰۸)، بلچر و فاکس (۲۰۰۹) در نسبت عرض به عمق مشابه با رودریگز و گارسیا (۲۰۰۸) جریان‌های ثانویه را مشاهده کردند. آلبیراک و لمین (۲۰۱۱) نیز به بررسی جریان ثانویه و تغییرات متوسط سرعت طولی در راستای عرض کانال پرداختند. آن‌ها مشاهده کردند که تنش‌های رینولدز و تنش‌های برشی بستر در مقطع عرضی، تغییرات دوره‌ای محسوسی از خود نشان می‌دهند.

با وجود مشاهده تشکیل جریان ثانویه در کانال‌های عریض، نحوه تغییرات عرضی مشخصات جریان تحت تأثیر جریان‌های ثانویه به خوبی توصیف نشده است. در حقیقت انجام یک مطالعه جامع با اندازه‌گیری هم‌زمان الگوی جریان و تنش برشی به شدت احساس می‌شود. در پژوهش حاضر، به بررسی آزمایشگاهی این تغییرات در حضور المان‌های زبر و در محدوده نسبت عرض به عمق مابین ۵ تا ۱۰ پرداخته می‌شود. در این مطالعه ابتدا به بررسی شرایط جریان در عرض پرداخته؛ در ادامه پارمترهای آشفتگی جریان ارائه شده و اثر زبری و جریان ثانویه روی آن گزارش گردیده است. در انتها نیز به رابطه متقابل تنش برشی و جریان ثانویه و سازگاری این نوسانات با سایر مشخصات جریان پرداخته شد.

مطالعه اثر زبری روی الگوی جریان و خصوصیات آشفتگی از اوایل سده بیستم آغاز شده است. در این دوران

در این معادله،  $\tau_{ave}$  متوسط تنش برشی در عرض مقطع و  $\delta$  دامنه نوسان است که در این مطالعه براساس پیشنهاد ایکدا (۱۹۸۱)،  $0.18$  در نظر گرفته شده است. شدت آشفستگی کمیتی برای مقایسه قدرت آشفستگی در جریان است. این کمیت برابر با مقدار نرمال شده متوسط زمانی مربع نوسانات سرعت است. برای شدت آشفستگی در بسترهای صاف، نزو و ناکاگوا (۱۹۹۳) معادله زیر را پیشنهاد داده‌اند (نزو و ناکاگوا، ۱۹۹۳):

$$\frac{u'_i}{U_*} = D_i \exp(-C_k \frac{z}{H}) \quad (5)$$

که در این رابطه،  $u'_i$  شدت آشفستگی در هر ۳ راستا،  $C_k$  ضریب تجربی ثابت  $1/0$ ،  $D_i$  ضریب تجربی که در راستای طولی، عرضی و عمقی به ترتیب معادل  $2/3$ ،  $1/63$  و  $1/27$  است.

#### مواد و روش‌ها

در این پژوهش جریان‌های ثانویه در کانال با بستر زبر به صورت آزمایشگاهی مطالعه شد. آزمایش‌ها در یک کانال مستطیلی مستقیم به طول  $14/35$  (۱۱ متر طول کانال و  $3/35$  مخزن و دیواره انتقالی)، عرض  $1/0$  متر و ارتفاع  $0/7$  متر با شیب  $0/033$  درصد که جداره‌های جانبی آن از شیشه و جنس بستر آن از پلکسی‌گلاس است، انجام پذیرفت. به منظور تنظیم عمق آب، در پایین دست کانال یک سرریز پروانه‌ای اتوماتیک نصب شد. در شکل ۱- الف پلان کانال آزمایشگاهی نمایش داده شده است. همچنین در شکل ۱- ب تصویری از کانال در حین انجام آزمایش‌ها را نشان می‌دهد. به منظور کاهش اغتشاش و نوسان آب در ورودی کانال از دیوارهای هادی و صفحه آرام‌کننده جریان استفاده شده است. کنترل دبی جریان با استفاده از یک شیر دریچه انجام گرفت و اندازه‌گیری این دبی با کمک یک دبی‌سنج مغناطیسی با دقت  $0/2\%$  انجام گرفت. اندازه‌گیری عمق آب در داخل کانال با استفاده از عمق‌سنج نقطه‌ای با دقت اسمی  $0/01$  میلی‌متر انجام پذیرفت.

به منظور برداشت مؤلفه‌های سرعت لحظه‌ای از حسگر روبه پایین سرعت‌سنج صوتی (وکتورینو) با دقت  $0/5\%$  استفاده شد. این دستگاه قادر به برداشت هر سه مؤلفه سرعت به صورت همزمان است. به منظور تعیین موقعیت برداشت و جابه‌جایی سرعت‌سنج صوتی از یک دستگاه جابه‌جاکننده

نیکورادزه به بررسی اثر تراکم ذرات زبر بر ضریب اصطکاک سطحی در لوله‌ها پرداخت (نزو و ناکاگوا، ۱۹۹۳). به طور کلی جریان لایه مرزی به دو ناحیه داخلی (یا نزدیک جداره) و ناحیه خارجی قابل تقسیم است. در ناحیه خارجی نرخ استهلاك آشفستگی کمتر از نرخ تولید آن می‌باشد. این در حالی است که در ناحیه داخلی عکس این موضوع اتفاق می‌افتد (نزو و ناکاگوا، ۱۹۹۳). رابطه سرعت طولی در ناحیه داخلی و در بسترهای زبر، رابطه لگاریتمی است که به صورت زیر بیان می‌شود:

$$U^+ = 1/k \ln(\frac{z}{k_s}) + A \quad (1)$$

که در این رابطه،  $U_+ = U/U_*$  سرعت برشی و  $U$  سرعت در راستای طولی) و  $A$  ثابت انتگرال گیری است. در بسیاری از موارد مقدار  $A$  برابر  $1/5$  در نظر گرفته می‌شود (نزو و ناکاگوا، ۱۹۹۳). در مطالعه حاضر،  $x$  بیان‌گر راستای طولی کانال،  $y$  راستای عرض کانال و  $z$  راستای عمق است. همچنین  $v$ ،  $U$  و  $W$  به ترتیب سرعت در راستای طولی، عرضی و عمق کانال است و  $u$  و  $w$  نشان‌دهنده نوسانات سرعت در ۳ راستا هستند. همچنین  $v'$ ،  $u'$  و  $w'$  نشان‌دهنده مجذور متوسط مربعات نوسانات سرعت در ۳ راستا می‌باشند.

جهت مطالعه جریان ثانویه، از معادله چرخش در راستای جریان استفاده می‌شود (اینشتن و لی، ۱۹۵۸). در یک کانال عریض و در شرایط جریان یکنواخت، معادله چرخش در راستای جریان به شکل معادله (۲) است (نزو، ۲۰۰۵):

$$\left( \frac{\partial^2}{\partial y^2} - \frac{\partial^2}{\partial z^2} \right) \overline{vw} = \frac{\partial^2}{\partial y \partial z} (v'^2 - w'^2) \quad (2)$$

آنچه برای تعیین جریان ثانویه براساس معادله (۲) دارای اهمیت است، تعیین جمله سمت راست این معادله است که مربوط به نیروی محرک می‌باشد. معادله (۳)، معادله‌ای است که از آن می‌توان توزیع این متغیر را به شرط توزیع خطی تنش رینولدز محاسبه کرد (نزو، ۲۰۰۵):

$$\frac{(v'^2 - w'^2)}{U_*^2} \approx \frac{-uw}{U_*^2} = 1 - \frac{z}{H} \quad (3)$$

که در این رابطه  $H$  عمق جریان در کانال است. در سال ۱۹۸۱ ایکدا، معادله (۳) را با استفاده از مدل لزجت گردابه به صورت تئوری حل کرد و معادله زیر را برای تعیین تنش برشی ارائه داد (ایکدا، ۱۹۸۱):

$$\frac{t}{t_{ave}} = 1 + d \times \cos \frac{p.y}{H} \quad (4)$$

مختصات در راستای قائم برابر با  $0.33D_0$  به دست آمده‌اند.

در جدول ۲ خلاصه‌ای از شرایط آزمایش‌های نمایش داده شده است. در این جدول  $S_0$  شیب کانال،  $Q$  دبی جریان و  $Re$  عدد رینولدز جریان است.

فاصله نقاط برداشت در راستای عرضی،  $5$  سانتی‌متر و در راستای عمق حداقل  $5$  میلی‌متر است (مهاجری، ۱۳۸۹).

جدول ۱- مشخصات زبری بستر

فاکتور	مقدار
$d_{90}(mm)$	۹/۵
$d_{50}(mm)$	۷/۰
$S_g = \sqrt{\frac{d_{94}}{d_{16}}}$	۱/۴۱۹

جدول ۲- شرایط جریان در مطالعه حاضر

نام	$S_0$	$Q$	$H(cm)$	$k_s^+$	$U_*(m/s)$
D13	۰/۰۳۳	۳۰/۷	۱۳	۱۷۳	۰/۰۲۰
D14	۰/۰۳۳	۳۴/۴۸	۱۴	۱۷۹	۰/۰۲۱
D15	۰/۰۳۳	۳۹/۳۸	۱۵	۱۸۳	۰/۰۲۲
D16	۰/۰۳۳	۴۲/۴۳	۱۶	۱۸۸	۰/۰۲۳

## نتایج و بحث

در شکل ۲، پروفیل سرعت طولی که با سرعت برشی بی‌بعد شده است، با معادله لگاریتمی (معادله (۱)) نمایش داده شده است. همان‌طور که در نمودارهای شکل ۲ مشاهده می‌شود، تطابق بسیار خوبی بین اطلاعات برداشت شده (سیل‌ها به رنگ‌های مختلف) و معادله تحلیلی (خط مشکی پررنگ) وجود دارد. در نقاط نزدیک به بستر انحراف از معادله تحلیلی مشاهده می‌شود. همچنین به نظر می‌رسد که این انحراف در نقاط نزدیک به جدارهای جانبی بیشتر می‌شود (هر چند که برخی نقاط نزدیک به جدارهای جانبی از این قانون پیروی نمی‌کنند). همچنین در شکل ۲-د اطلاعات آزمایشگاهی رودریگز و گارسیا با علامت ضربدر قرمز رنگ نمایش داده شده است (رودریگز و گارسیا، ۲۰۰۸). اطلاعات آزمایشگاهی رودریگز و گارسیا در محدوده عدد رینولدز مشابه این مطالعه ( $Re=44000$ ) و نسبت عرض به عمق بین  $5$  تا  $10$  برداشت شده است. مشاهده می‌شود که بین نتایج آن‌ها و نتایج آزمایش‌های حاضر تطابق معقولی وجود دارد. در هر چهار شکل ارائه

اتوماتیک بادقت  $0.1$  میلی‌متر استفاده شد. فرکانس برداشت اطلاعات  $100\text{Hz}$  و حجم نمونه‌برداری  $4/9$  میلی‌متر مکعب تعیین شد. برداشت سرعت لحظه‌ای در هر نقطه به مدت  $300$  ثانیه ( $5$  دقیقه) ادامه پیدا کرد. سری زمانی سرعت برداشتی در مقطع عرضی سری‌های زمانی برداشت شده با استفاده از روش ویولت<sup>۱</sup> پاک‌سازی شدند (گورینگ و نیکورا، ۲۰۰۲). این روش یک نوع تبدیل مانند تبدیل فوریه است با این تفاوت که به جای معادله پیوسته کوسینوسی در تبدیل فوریه، معادله مادر ویولت استفاده می‌شود. براساس این روش، مقدار سرعت لحظه‌ای در فضای ویولت، با یک مقدار مشخص مقایسه و پاک‌سازی می‌شوند (گورینگ و نیکورا، ۲۰۰۲). با توجه به فاصله حجم نمونه‌برداری از شاخک‌های دستگاه امکان برداشت اطلاعات در فاصله  $5$  سانتی‌متر از سطح آب وجود ندارد. همچنین به سبب تداخل امواج ارسالی با بستر زبر از اطلاعات  $1$  سانتی‌متری نزدیک به جداره نیز در تحلیل نتایج استفاده نمی‌شود.

تنش برشی موضعی نیز با کمک سنسور فشار ساخته‌ی مؤلفان انجام پذیرفت. این دستگاه قادر است تنش برشی را با دقت مطلوبی در بسترهای زبر اندازه‌گیری کند (مهاجری و همکاران، ۲۰۱۲). دقت مبدل‌های فشار  $0.1$  درصد، فرکانس برداشت اطلاعات  $100$  هرتز و مدت برداشت سری زمانی نوسانات فشار  $300$  ثانیه در نظر گرفته شد. سری‌های زمانی تنش برشی محاسباتی با کمک روش ویولت پاک‌سازی شدند (مهاجری و همکاران، ۲۰۱۲).

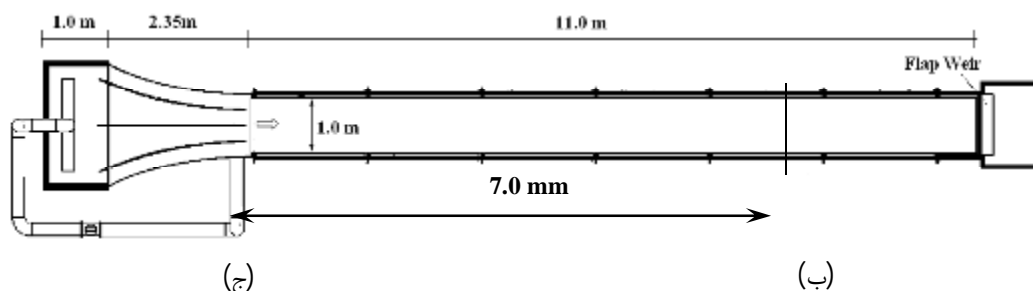
زبری مورد مطالعه در این مقاله از نوع زبری‌های طبیعی و از جنس سنگ‌دانه‌های سیلیسی تیز گوشه است. مشخصات زبری بستر در جدول ۱ نمایش داده شده است. مطابق این جدول، ضریب یکنواختی ( $\sigma_g$ ) در محدوده مصالح با دانه‌بندی یکنواخت قرار دارد (تیگریک و آراس، ۲۰۱۱). ارتفاع آب در آزمایش‌های حاضر در مقطع  $7$  متری از ابتدای کانال مستقیم بعد از دیواره‌های انتقالی (شکل ۱-الف)، که مقطع اندازه‌گیری است، از  $13$  تا  $16$  سانتی‌متر تغییر می‌کند. در مطالعه حاضر براساس روش بیشترین ارتفاع اجزای زبر (اسمارت، ۱۹۹۹) مقدار زبری بستر معادل با قطر عبوری  $90$  درصد مصالح ( $D_{90}$ ) و مبدا

خطوط تراز سرعت در راستای عرض کانال در این اشکال قابل مشاهده است. علت این تغییرات در جریان طولی کانال به حضور جریان‌های ثانویه مربوط می‌شود. همان‌طور که اشاره شد، نواحی با سرعت طولی کمتر، متناظر با حضور جریان ثانویه رو به بالا و نواحی با سرعت طولی بالاتر، متناظر با نواحی جریان ثانویه رو به پایین است. در شکل ۳ مشاهده می‌شود که تغییرات نسبی در منحنی‌های تراز سرعت طولی در عمق ۱۳ و ۱۶ سانتی‌متری، به وجود آمده است (فلش راهنمای سفید رنگ در شکل ۳). این موضوع نشان‌دهنده این است که نسبت فاصله بین دو سلول جریان ثانویه و عمق جریان ثابت می‌ماند (نیکورا و همکاران، ۱۹۹۸). براساس مطالعات کینوشیتا (۱۹۶۷) و آلبایراک و لمین (۲۰۱۱)، در کانال‌های عریض فاصله سلول‌های جریان ثانویه دو برابر عمق جریان آب است (کینوشیتا، ۱۹۶۷؛ آلبایراک و لمین، ۲۰۱۱). در پژوهش حاضر، همان‌طور که در شکل ۳ نشان داده شده است، فاصله دو سلول مجاور دو برابر عمق جریان است.

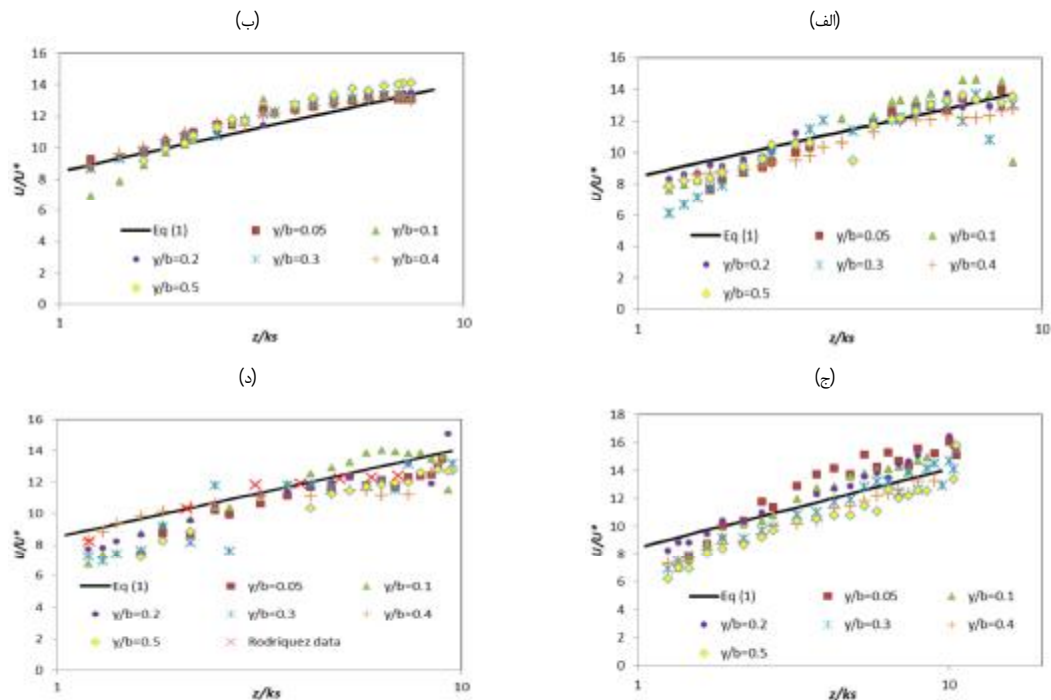
شده در شکل ۲ سرعت بی‌بعد شده در موقعیت‌های مختلف عرضی از مقدار معادله تحلیلی بیشتر و یا کمتر است. این نوسانات عرضی می‌تواند به حضور جریان ثانویه در کانال نسبت داده شود. مطالعات قبلی نشان داده است که در محل تشکیل جریان روبه بالا، سرعت کمتر است، با وجودی که در محل تشکیل جریان روبه پایین سرعت جریان بیشتر است (نزو و ناکاگاوا، ۱۹۹۳؛ نیکورا و همکاران، ۱۹۹۸؛ آلبایراک و لمین، ۲۰۱۱). از دیگر نقاط قابل توجه، انحراف بیشتر نقاط نزدیک به جداره جانبی (نقاط  $y/b=0.05, 0.1$  در شکل ۲) از معادله تحلیلی است. این مورد مربوط به اثر دیوارهای جانبی روی سرعت طولی جریان است که در معادله تحلیلی و یک بعدی مذکور (معادله (۱)) از این اثر نظر شده است. در حقیقت جریان ثانویه تشکیل شده در نقاط نزدیک به جداره، قوی‌تر از جریان ثانویه در مرکز کانال است.

به‌منظور مشاهده بهتر جریان‌های ثانویه، در شکل ۳ منحنی‌های تراز سرعت طولی در کانال برای دو عمق ۱۳ و ۱۶ سانتی‌متری نمایش داده شده است. تغییرات دوره‌ای

(الف)



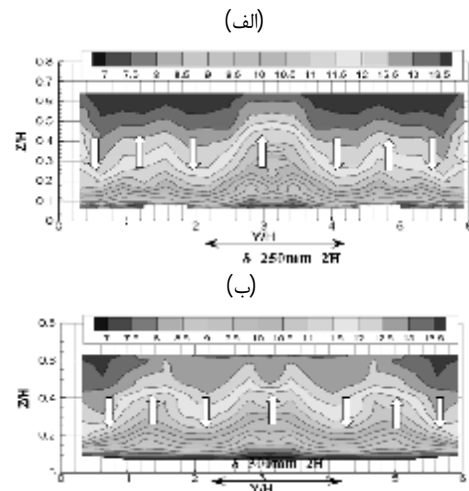
شکل ۱- مجموعه تجهیزات آزمایشگاهی (الف) پلان کانال آزمایش‌ها (ب) کانال آزمایشگاهی در هنگام برداشت (ج) زبری بستر در طی آزمایش‌ها



شکل ۲- تغییرات سرعت طولی جریان بی بعد مقطع عرضی در فاصله ۷ متری ورودی کانال با حضور بستر زبر (الف) عمق ۱۳ سانتی‌متر (ب) عمق ۱۴ سانتی‌متر (ج) عمق ۱۵ سانتی‌متر (د) عمق ۱۶ سانتی‌متر

مقدار به دست آمده از رابطه تحلیلی است. بر این اساس، همان‌طور که در شکل ۴- الف نمایش داده شده است، جریان به دو لایه زبر و ناحیه دور از جداره تقسیم می‌شود. در سری آزمایش‌های اخیر افزایش زبری موجب بی‌نظمی بیشتر اطلاعات به دست آمده است؛ به گونه‌ای که علاوه بر پراکنده شدن اطلاعات به دست آمده در بسترهای زبر در قیاس با بستر صاف، نقاطی که از رابطه تحلیلی تبعیت نمی‌کنند نیز افزوده شده‌اند. هر چند که می‌توان زیاد شدن این بی‌نظمی‌ها را به افزایش اختلال در فرکانس برداشتی توسط دستگاه سرعت‌سنج صوتی به خاطر حضور بستر زبر مربوط دانست (گورینگ و نیکورا، ۲۰۰۲)؛ با این وجود نمی‌توان اثر زبری در زیاد شدن عدم همسان‌گردی آشفتگی را در مشاهده این پدیده نادیده گرفت.

در شکل ۵ تغییرات تنش برشی نرمال شده با متوسط تنش برشی در عرض کانال نمایش داده شده است. همچنین معادله ایکدا (معادله (۶)) نیز به منظور مقایسه نمایش داده شده است. رابطه ایکدا که مبنای تحلیلی داشته، در بسترهای صاف به دست آمده است؛ لذا اثر زبری بستر در جریان ثانویه را نادیده گرفته است. این مورد موجب انحراف در بسیاری از نقاط بین اطلاعات آزمایشگاهی

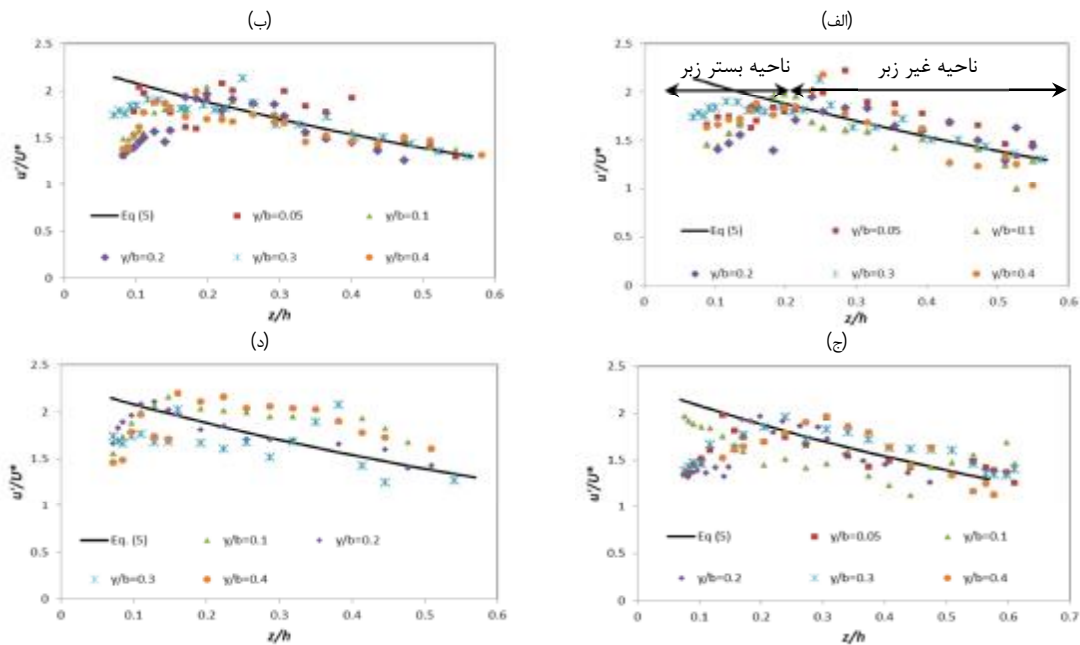


شکل ۳- منحنی‌های تراز سرعت طولی بی‌بعد شده با سرعت برشی در حضور زبری (الف) عمق ۱۳ سانتی‌متر (ب) عمق ۱۶ سانتی‌متر

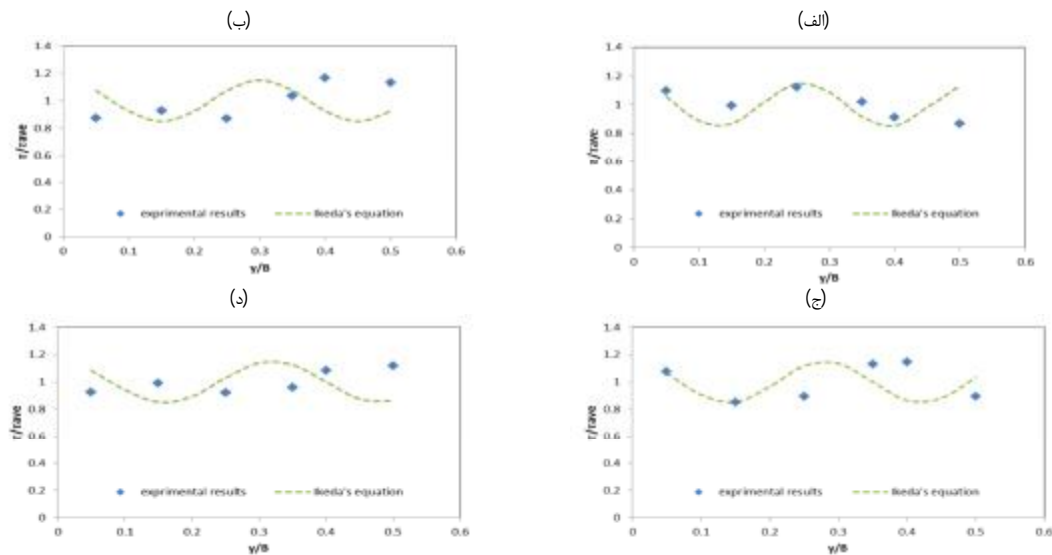
در شکل ۴- الف، شدت آشفتگی در عمق ۱۳ سانتی‌متری نمایش داده شده است. مشاهده می‌شود که شدت‌های آشفتگی به دست آمده در ناحیه خارج از  $z/ks = 0.3$  عمق جریان از رابطه تحلیلی تبعیت می‌کنند. این در حالی است که با نزدیک شدن به بستر، انحراف از رابطه تحلیلی مشاهده می‌شود. به نحوی که مقدار اندازه‌گیری شده کوچک‌تر از

برشی در عرض کانال با تغییرات سرعت طولی در عرض کانال پی برده می‌شود. به گونه‌ای که در محل‌هایی که جریان رو به بالا وجود دارد یا سرعت طولی کمتر است، تنش برشی کمتر و در محل‌های جریان رو به پایین یا سرعت طولی بیشتر، تنش برشی بیشتری مشاهده می‌شود. بر این اساس اهمیت جریان‌های ثانویه در توزیع مجدد اندازه حرکت در مقطع عرضی غیر قابل انکار است.

حاضر و این معادله شده است. مشاهده می‌شود که تنش برشی در عرض کانال نوسان می‌کند. به این معنی که مقدار موضعی تنش برشی حول یک مقدار متوسط کم و زیاد می‌شوند. رودریگز و گارسیا این نوسان را در حدود ۲۰٪ متوسط تنش برشی دانسته‌اند. در مطالعه حاضر این نوسان در حدود ۳۵ درصد مقدار متوسط مشاهده شد. با مقایسه شکل ۵ با شکل ۳ به سازگاری نوسانات تنش



شکل ۴- شدت آشفتگی طولی در حضور زبری (الف) عمق ۱۳ سانتی‌متر (ب) عمق ۱۴ سانتی‌متر (ج) عمق ۱۵ سانتی‌متر (د) عمق ۱۶ سانتی‌متر



شکل ۵- توزیع تنش برشی در عرض کانال و مقایسه آن با معادلات موجود در حضور زبری (الف) عمق ۱۳ سانتی‌متر (ب) عمق ۱۴ سانتی‌متر (ج) عمق ۱۵ سانتی‌متر (د) عمق ۱۶ سانتی‌متر

## نتیجه‌گیری

در این مقاله، اثر زبری روی خصوصیات جریان آشفته در یک کانال روباز و به‌صورت آزمایشگاهی بررسی شد. نتایج به‌دست آمده از این تحقیق عبارتند از:

۱- مشاهده شد که در کانال روباز و با نسبت عرض کانال به عمق آب بالای ۵ تا ۱۰، جریان ثانویه ناشی از آشفته‌گی در شرایط بستر زبر تشکیل می‌شود.

۲- به طور کلی سرعت طولی در این شرایط از معادله لگاریتمی تبعیت می‌کند؛ هر چند که تحت تأثیر جریان ثانویه از معادله تحلیلی انحراف پیدا می‌کند. این انحراف در نزدیکی جدارهای جانبی مشهودتر است.

۳- براساس شدت آشفته‌گی، دو ناحیه تحت تأثیر زبری در نزدیکی بستر ( $z/h < 0.3$ ) و ناحیه غیر زبر وجود دارد که از بستر کانال دور است.

۴- تغییرات تنش برشی در عرض کانال تحت تأثیر جریان‌های ثانویه نیز قابل توجه است. مقدار این نوسان در مطالعه حاضر ۳۵ درصد مقدار متوسط عرضی تنش برشی است.

## منابع

- Journal of Geophysical Research. 71: 3109-3112.
8. Kinoshita R. 1967. An Analysis of the Movement of Flood Waters by Aerial Photography Concerning Characteristics of Turbulence and Surface Flow, Journal of the Japan society of photogrammetry. 6: 1-17.
9. Marion A. and Zaramella M. 2006. Effects of Velocity Gradients and Secondary Flow on the Dispersion of Solutes in a Meandering Channel, Journal of Hydraulic Engineering. 132: 1295-1302.
10. Mohajeri H. Salehi Neyshbouri A. A. and Safarzade A. 2012. A three tube pressure instrument for measuring the local bed shear stress in smooth and rough beds, 2nd IAHR Europe Congress, Munich, Germany.
11. Nezu I. 2005. Open-Channel Flow Turbulence and Its Research Prospect in the 21st Century, Journal of Hydraulic Engineering. 131: 229-246.
12. Nezu I. and Nakagawa H. 1993. Turbulence in Open-Channel Flows, A. A. Balkema, Rotterdam. 293 p.
13. Nikora V. I. Goring D. G. and Biggs B. J. F. 1998. Silverstream eco-hydraulics flume: hydraulic design and tests, Wellington, New-Zealand, Scientific and Industrial Research Publishing.
14. Rodríguez J. F. and García M. H. 2008. Laboratory measurements of 3-D flow patterns and turbulence in straight open channel with rough bed, Journal of Hydraulic Research. 46: 454-465.
15. Smart G. 1999. Turbulent Velocity Profiles and Boundary Shear in Gravel Bed Rivers, Journal of Hydraulic Engineering. 125: 106-116.
16. Tigrek S. and Aras T. 2011. Reservoir Sediment Management, Taylor & Francis. 320 p.
۱. مهاجری س. ح. ۱۳۸۹. بررسی آزمایشگاهی اثر زبری بستر بر الگوی جریان و تنش برشی در کانال مستقیم روباز. پایان‌نامه کارشناسی ارشد مهندسی عمران - آب. دانشگاه تربیت مدرس. ۱۴۰ ص.
2. Albayrak I. and Lemmin U. 2011. Secondary currents and corresponding surface velocity patterns in a turbulent open-channel flow over a rough bed, Journal of Hydraulic Engineering. 137: 1318-1334.
3. Belcher B. J. and Fox J. F. 2009. Laboratory measurements of 3-D flow patterns and turbulence in straight open channel with rough bed, Journal of Hydraulic Research. 47: 685-688.
4. Einstein H. and Li H. 1958. Secondary currents in straight channels, Transaction of American Geophysical Union. 39: 1085-1088.
5. Goring D. and Nikora V. 2002. Despiking Acoustic Doppler Velocimeter Data, Journal of Hydraulic Engineering. 128: 117-126.
6. Ikeda S. 1981. Self-forced straight channels in sandy beds, Journal of Hydraulic Division (ASCE). 107: 389-406.
7. Karcz I. 1966. Secondary currents and the configuration of a natural stream bed,