

مطالعه‌ای بر روش‌های شناسایی ساختارهای منسجم در جریان کانال روباز با بستر غیر صاف (نقدی بر آنالیز کوآدرانت)

سید حسین مهاجری^{1*}، مصطفی نبی‌پور²

1- استادیار، گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات، تهران

2- دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه تربیت مدرس، تهران

* mohajeri@srbiau.ac.ir

چکیده - ساختارهای منسجم در جریان‌های لایه مرزی موجب انتقال مومنت‌های جریان و تولید انرژی آشفتگی می‌شوند. در شرایط توسعه یافتگی کامل جریان و در بالای زیر لایه لزج، ساختارهای منسجمی مانند پدیده‌های جهش و جاروب و نیز گردابه‌های سنجاقی تشکیل می‌شوند. به منظور شناسایی این ساختارهای آشفته روش‌های گوناگونی مانند آنالیز کوآدرانت و بررسی مقادیر لحظه‌ای سرعت سیال مورد استفاده قرار می‌گیرند. در مطالعه حاضر به بررسی دقت و کارایی این روش‌ها در جریان سطح آزاد روی بستر غیر صاف پرداخته می‌شود. بدین منظور میدان جریان در یک بستر شنی به روش سرعت‌سنجی تصویری ذرات اندازه‌گیری شده است. بررسی نتایج مطالعه حاضر نشان می‌دهد که با وجود قابلیت هر دو روش در تشخیص و شناسایی ساختارهای جهش و جاروب در نقاط با فاصله اندک از بستر، نتایج حاصله در نزدیکی و در بین المان‌های زیر بستر با یکدیگر متفاوت می‌باشند. این واقعیت از آنجا ناشی می‌شود که از نقطه نظر مفهومی به علت غیرصفر بودن مؤلفه قائم متوسط سرعت و نیز ماهیت سه بعدی جریان در شرایط بستر غیر صاف، استفاده از روش کوآدرانت صحیح به نظر نمی‌رسد. بر همین اساس پیشنهاد می‌شود که در شرایط بستر غیر صاف برای تشخیص ساختارهای جهش و جاروب از روش بررسی مقادیر لحظه‌ای سرعت جریان و یا روش بهبود یافته آنالیز کوآدرانت استفاده شد.

کلیدواژه‌گان: بستر غیر صاف، آنالیز کوآدرانت، ساختارهای منسجم، جریان کانال روباز، سرعت سنجی تصویری ذرات.

1- مقدمه

(Marusic, 2012). به بیان دیگر، در چنین شرایطی یک حرکت منسجم در داخل حرکت تصادفی سیال و در راستای جریان قابل مشاهده است که بر این اساس جریان به دو بخش جریان منسجم و تصادفی قابل تقسیم است. ساختارهای منسجم معمولاً از نوعی ناپایداری در حرکت سیال مانند ناپایداری کلوین-هلمهولتز³ یا رایلی-تیلور⁴ ناشی می‌شوند. این ناپایداری می‌تواند ناشی از حالت انتقالی از جریان آرام به آشفته سیال باشد. بنابراین قضاوت درباره امکان تشکیل ساختارهای منسجم نیازمند

یکی از راهکارهای رایج در مطالعه جریان آشفته، تفکیک و شناسایی ساختارهای منظمی از حرکت سیال در میدان سه بعدی، تصادفی و چند مقیاسی حرکت آشفته می‌باشد که به جریان‌های گردابه‌ای¹ یا ساختارهای منسجم² مشهورند (Cantwell, 1981). ساختارهای منسجم، ساختارهای منظم و تکرارپذیری از حرکت سیال هستند که اثر قابل توجهی در خصوصیات سیال مانند سرعت متوسط، تنش و انتقال مومنت می‌گذارند (Adrian and

³ Kelvin-Helmholtz instability

⁴ Rayleigh-Taylor instability

¹ Eddies

² Coherent Structures

به صورت گسترده در شرایط مختلف مورد استفاده قرار گرفت (مهرآئین و همکاران، 1394؛ Mignot et al., 2009؛ Mohajeri, 2014). این روش براساس تحلیل توزیع احتمال توأم دو مؤلفه طولی و قائم نوسان سرعت (به ترتیب در راستای جریان $u'(t)$ و عمود بر جریان $w'(t)$) می‌باشد (Willmarth and Lu, 1972). بر این اساس، نوسانات سرعت طولی و قائم به چهار گروه مختلف تقسیم می‌شوند: گروه یک که $u'(t)$ و $w'(t)$ هر دو مثبت می‌باشند؛ گروه دو (یا پدیده جهش) که $u'(t)$ منفی و $w'(t)$ مثبت است؛ گروه سه که $u'(t)$ و $w'(t)$ هر دو منفی می‌باشند و گروه چهار (یا پدیده جاروب) که دارای $u'(t)$ مثبت و $w'(t)$ منفی است. به بیان دقیق‌تر سهم هر یک از چهار گروه در متوسط تنش برشی رینولدز، با رابطه (1) تعیین می‌شود (Willmarth and Lu, 1972):

$$\overline{u'w'}_i = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T u'(t)w'(t)\xi_i dt \quad (1)$$

که در این رابطه T طول زمان برداشت اطلاعات، i بیان‌گر گروه قرارگیری مؤلفه نوسانی و ξ_i تابع تعیین‌کننده گروه قرارگیری مؤلفه نوسانی سرعت (براساس علامت $u'(t)$ و $w'(t)$) می‌باشد. لازم به ذکر است که در آنالیز کوآدرانت اغلب نوسانات با قدرت کم $u'(t)w'(t)$ در نظر گرفته نمی‌شوند. قدرت کم یا زیاد نوسانات سرعت در مقایسه با حاصل‌ضرب سه پارامتر شدت آشفتگی طولی σ_u و قائم σ_w و یک ضریب χ تعیین می‌شود. در مطالعه حاضر براساس پیشنهاد (Bogard and Tiederman, 1986) ضریب χ برابر با $1/0$ در نظر گرفته شد. این بدان معنی است که تنها مقادیری از $u'(t)w'(t)$ در نظر گرفته می‌شوند که بزرگتر از $\sigma_u\sigma_w$ می‌باشند. σ_u شدت آشفتگی طولی و σ_w شدت آشفتگی قائم است.

روش دیگر و قدیمی‌تر تشخیص گردابه‌ها، بررسی مقادیر لحظه‌ای سرعت سیال می‌باشد. یکی از مفاهیم بنیادی مورد استفاده در این روش، چرخش⁴ است (Monin and Yaglom, 1971). براساس این روش، چرخش عرضی از رابطه (2) تعیین می‌شود:

$$\omega = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u}{\partial z} - \frac{\partial w}{\partial x} \right) \quad (2)$$

که در آن u سرعت طولی و w سرعت قائم است.

داشتن اطلاعاتی در رابطه با شرایط اولیه جریان می‌باشد (Hussain, 1983).

ساختارهای منسجم در شرایط گوناگون حرکت آشفته سیال مانند جریان آب در یک رودخانه، جریان پیچشی در نزدیکی پایه پل و در نقطه اتصال دو جریان رودخانه‌ای به وجود می‌آیند و بر خصوصیات جریان تأثیر می‌گذارند. در جریان لایه مرزی که در اغلب مطالعات هیدرولیکی و مهندسی رودخانه مشاهده می‌شود، ساختارهای منسجم مختلفی تشکیل می‌شوند. مشهورترین نوع این ساختارهای منسجم، جهش سریع جریان نزدیک بستر به سمت بالا و جاروب جریان با سرعت بالا به سمت بستر (مشهور به پدیده‌های جهش و جاروب¹) می‌باشند (Willmarth and Lu, 1972). بررسی‌های بیشتر نشان داد که پدیده‌های جهش و جاروب در کنار یکدیگر، ناشی از وجود ساختار منسجم بزرگتری می‌باشند که به گردابه سنجاکی² (به شکل سنجاکی موی‌سر) مشهور می‌باشد (Adrian and Liu, 2002). در حقیقت گردابه سنجاکی همان گردابه نعل اسبی است که توسط Theodorsen (1952) برای نخستین بار مطرح گردید. لازم به ذکر است که مطالعات اخیر نشان داده است که چندین گردابه سنجاکی با یکدیگر، ساختارهای با مقیاس بسیار بزرگتری را شکل می‌دهند که به ساختارهای منسجم بسیار بزرگ³ مشهور می‌باشند (Hutchins and Marusic, 2007).

با وجودی که گردابه‌های سنجاکی و ساختارهای منسجم بسیار بزرگ از اهمیت فوق‌العاده بالایی برخوردار هستند، ریشه اصلی این ساختارها، پدیده‌های جهش و جاروب می‌باشد که ساختار منسجم رخ داده در داخل ساختارهای منسجم بزرگ‌تر می‌باشند (Adrian and Marusic, 2012). لذا در مطالعه حاضر تمرکز اصلی بر پدیده‌های جهش و جاروب خواهد بود. به منظور شناسایی پدیده‌های جهش و جاروب روش‌های مختلفی توسعه یافته‌است. مشهورترین و محبوب‌ترین روش در حیطه مطالعات هیدرولیکی، روش آنالیز کوآدرانت می‌باشد. این روش نخستین بار توسط Willmarth and Lu (1972) برای جریان لایه مرزی با بستر صاف معرفی گردید و پس از آن

¹ Sweep & Ejection

² Hairpin vortex

³ Superstructures

⁴ Vorticity

روش کمتر از آنالیز کوادرنانت مورد استفاده قرار می‌گیرد. هر چند که این روش بسیار دقیق‌تر و اصولی‌تر از روش آنالیز کوادرنانت در تشخیص پدیده‌های جهش و جاروب می‌باشد (Detert et al., 2010; Pope, 2000).

در مطالعه حاضر به مقایسه نتایج به دست آمده از این دو روش در شرایط بستر غیرصاف پرداخته می‌شود. به بیان دقیق‌تر، هدف اصلی در مطالعه حاضر بررسی کارایی روش آنالیز کوادرنانت در تشخیص پدیده‌های جهش و جاروب در یک کانال مستقیم با بستر غیر صاف می‌باشد. به این منظور الگوی جریان در یک کانال آزمایشگاهی به روش سرعت‌سنجی تصویری ذرات اندازه‌گیری شد. در ادامه شرایط آزمایشگاهی توضیح داده می‌شود.

2- مواد و روش‌ها

نتایج آزمایشگاهی تحقیق حاضر، در آزمایشگاه هیدرولیک دانشگاه ترنتو⁷ ایتالیا جمع‌آوری شده است. آزمایش‌ها در یک کانال مستقیم روباز با مقطع مستطیلی به طول 6، عرض 0/4 و ارتفاع 0/4 متر و با قابلیت تغییر شیب طولی انجام پذیرفت (شکل 1-الف). جداره کانال فوق از پلی متیل متاکریلات⁸ ساخته شده است. برای کاهش اثرات پایاب بر شرایط جریان یکنواخت، از یک سرریز قابل تنظیم در انتهای کانال استفاده شد. به منظور اندازه‌گیری عمق آب و کنترل شرایط یکنواختی جریان، پروفیل سطح آزاد آب به وسیله یک سنسور مافوق صوت⁹ اندازه‌گیری شد. دبی در ورودی کانال با استفاده از یک مبدل تنظیم سرعت پمپ، کنترل و به وسیله یک دبی‌سنج الکترومغناطیسی اندازه‌گیری شد. بستر شنی از سنگ‌دانه‌های با $D_{50} = 22 \text{ mm}$ و $D_{90} = 29 \text{ mm}$ تشکیل شده است که به‌طور یکنواخت روی کف کانال پخش گردیده تا یک لایه همگن با ضخامت 20 سانتی‌متر ایجاد شود (شکل 1-ب). توپوگرافی بستر با استفاده از یک لیزر از نوع M5L/200 از $x = -200 \text{ mm}$ تا $x = +300 \text{ mm}$ (ناحیه‌ای از کانال که اندازه‌گیری الگوی جریان در آنجا انجام می‌شود)، اندازه‌گیری شد.

در این مطالعه، سیستم مختصات راستگرد بکار رفته است. بدین ترتیب محور x در راستای جریان اصلی و موازی متوسط بستر و در جهت پایین‌دست مثبت است. محور z مربوط به راستای عمود بر جریان و جهت آن از تاج دانه‌های شنی به سمت بالاست. در نهایت محور y در راستای عرضی و به سمت دیواره چپ است. چرخش عرضی بیان‌گر تشکیل تغییرات شدید مؤلفه‌های طولی و قائم سرعت در یک فاصله کوتاه می‌باشد که در شرایط لایه مرزی بیان‌گر تشکیل یک لایه برشی¹ در عمق آب است. باید توجه داشت که چرخش به تنهایی نمی‌تواند بیان‌گر وقوع پدیده‌های جهش و جاروب باشد و اطلاعات کامل‌تر در این زمینه می‌تواند با تفکیک مؤلفه سرعت طولی به روش گالیه² به دست آید (Adrian et al., 2000; Detert et al., 2010). تفکیک سرعت به روش گالیه، شبیه تفکیک سرعت به روش رینولدز³ می‌باشد، با این تفاوت که به جای سرعت متوسط محلی، سرعت جابجایی سیال⁴ از سرعت لحظه‌ای کسر می‌شود (Pope, 2000). مطالعات پیشین نشان می‌دهد که در شرایطی که پدیده‌های جهش و جاروب روی می‌دهند، یک لایه جریان برشی در راستای عمق تشکیل شده که سرعت در بالادست آن زیاد و در پایین‌دست آن کم می‌باشد. در ناحیه بالادست پدیده جاروب و در ناحیه پایین‌دست پدیده جهش روی می‌دهد. گردابه تشکیل شده در بین این دو ناحیه اصطلاحاً گردابه گوه‌ای شکل⁵ نامیده می‌شود (Adrian and Marausic, 2012; Detert et al., 2010). براساس این روش، گردابه گوه‌ای شکل توسط مفهوم چرخش قابل شناسایی است و تفکیک سرعت طولی به روش گالیه نیز امکان تفکیک دو ناحیه با سرعت بالا و کم را فراهم می‌آورد (Detert et al., 2010). باید توجه داشت که استفاده از این روش و محاسبه چرخش لحظه‌ای، نیازمند داشتن مقادیر لحظه‌ای سرعت به صورت همزمان در چندین نقطه مختلف می‌باشد. از آنجا که چنین اندازه‌گیری‌هایی تنها با روش‌های گران قیمت مانند روش سرعت‌سنجی تصویری ذرات⁶ امکان‌پذیر است، این

¹ Shear Layer

² Galilian Velocity Decomposition

³ Reynolds Velocity Decomposition

⁴ Convection Velocity

⁵ Wedge-like Vortex

⁶ Particle Image Velocimetry (PIV)

⁷ Trento University

⁸ Polymethylmethacrylate

⁹ Ultrasonic

(Nikora et al., 1998). اندازه‌گیری‌ها در ناحیه‌ای دور از دیواره‌های جانبی در فاصله 3/3 متر از ورودی کانال انجام شده است که پروفیل سرعت کاملاً توسعه یافته و اثرات سرریز پایین دست ناچیز می‌باشد. طول توسعه یافته‌ی جریانی با استفاده از روش Nikora et al. (1998) و مفهوم لایه مرزی داخلی (Monin and Yaglom (1971) تخمین زده شد (جدول 1). مقایسه مقادیر محاسبه شده و ارائه شده در جدول 1، نشان می‌دهد که در ناحیه اندازه‌گیری، پروفیل‌های سرعت کاملاً توسعه یافته‌اند.

در طی آزمایش‌ها، دو سری اندازه‌گیری با استفاده از روش سرعت‌سنجی تصویری ذرات در صفحات افقی و عمودی انجام گردید. در سری اول اندازه‌گیری‌ها، روش سرعت-سنجی سه‌بعدی تصویری ذرات¹ برای اندازه‌گیری سه مؤلفه سرعت طولی u ، عرضی v و ارتفاعی w در صفحه افقی $x-y$ در فاصله 1 میلی‌متری بالای تاج دانه‌های شنی بکار گرفته شد. در این حالت، دوربین‌های ویدیویی در بالای کانال و در یک موقعیت متقارن 45 درجه و همراه با یک منشور شیشه‌ای برای جلوگیری از اختلالات اپتیکی، نصب و صفحه لیزر بطور افقی قرار داده شد. محدوده برداشت تقریباً دارای طول و عرض 140 میلی‌متر بوده و مرکز آن تقریباً در وسط کانال قرار داده شد.

جدول 1 شرایط هیدرولیکی برداشت آزمایش‌ها

پارامتر	آزمایش 1	آزمایش 2	آزمایش 3
H (m)	0/040	0/520	0/060
S (-)	0/0028	0/0026	0/0029
Fr (-)	0/51	0/47	0/51
$Re_H \times 10^3$ (-)	12/75	17/63	23/32
B/H (-)	10/0	7/7	6/7
Q (10^{-3} m ³ /s)	5/1	7/05	9/33
k_s (mm)	6/75	8/55	8/7
k_s^+ (-)	190	284	354
X_L (m)	1/37	1/61	1/74
H/k_s	5/9	6/1	6/9

H عمق جریان، S شیب کانال، $Fr = U/\sqrt{gH}$ ، عدد فرود، $U=Q/BH$ سرعت متوسط، $Re_H = UH/\nu$ عدد رینولدز، B عرض کانال، Q دبی جریان، k_s ارتفاع زبری معادل، k_s^+ عدد بی‌بعد زبری معادل ماسه نیکورادزه، X_L طول توسعه یافته‌ی جریان، ν لزجت سینماتیکی



(الف)



(ب)

شکل 1 الف) نمایی از کانال آزمایشگاهی (ب) بستر زبر کانال در آزمایش‌ها

اطلاعات بیشتر در ارتباط با بستر زبر مطالعه حاضر در تحقیق مهاجری (1393) قابل مشاهده است. سه سناریو به نام‌های آزمایش 1، آزمایش 2 و آزمایش 3 که در بردارنده بازه‌ای از شرایط هیدرولیکی با عدد فرود تقریباً ثابت است، مورد مطالعه قرار گرفت (جدول 1). در جدول 1 عدد بی‌بعد زبری معادل ماسه نیکورادزه $k_s^+ = k_s u_* / \nu$ (که در آن ν لزجت سینماتیکی، u_* سرعت برشی و k_s ارتفاع زبری معادل است) نشان می‌دهد که جریان‌های مطالعه شده در شرایط بستر زبر هیدرولیکی بوده است (Nezu and Nakagawa, 1993). استغراق نسبی H/k_s از 5/9 تا 6/9 تغییر می‌کند که نشان می‌دهد جریان در هر سه آزمایش می‌تواند به‌عنوان جریان کم‌عمق تعریف شود (Nezu and Nakagawa, 1993). نسبت B/H بزرگتر از 5 است که بیانگر طبقه‌بندی جریان در دسته کانال‌های عریض می‌باشد

¹ Stereo PIV

است که اگر نسبت قطر ذرات ردیاب به اندازه یک پیکسل در تصویر بزرگتر از 3 تا 4 باشد، عدم قطعیت در برآورد نتایج در مرتبه یک‌دهم تا یک‌بیستم قطر ذره خواهد بود (Prasad et al. 1992). در مطالعه حاضر این شرایط برقرار گردید و لذا عدم قطعیت و خطای ناشی از برداشت الگوی جریان با این روش در مرتبه یک‌دهم تا یک بیستم قطر ذره خواهد بود. اطلاعات بیشتر در زمینه تجهیزات آزمایشگاهی و نحوه جمع‌آوری نتایج در Mohajeri (2014) و Mohajeri et al. (2015) قابل دسترس است.

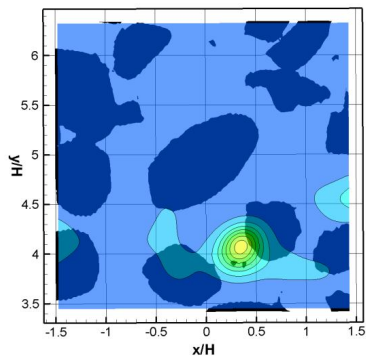
3- نتایج

3-1- نتایج روش آنالیز کوآدرانت

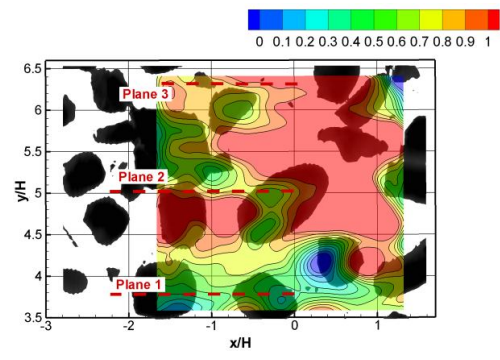
از آنجا که در آنالیز کوآدرانت بررسی‌ها بر روی $(u'w')$ انجام می‌شود، ابتدا به بررسی این کمیت پرداخته می‌شود. در شکل 2 توزیع بی‌بعد شده $(\overline{u'w'}/u_*^2)$ در دو صفحه افقی بالای سنگ‌دانه‌های شنی بستر (شکل 2-الف) و در صفحه قائم در مرکز کانال (شکل 2-ب) و در سری آزمایش 2 نمایش داده شده است. در هر دو شکل برای مقایسه نحوه توزیع $\overline{u'w'}/u_*^2$ با موقعیت ارتفاعی بستر، توپوگرافی اندازه‌گیری شده با لیزر نیز نمایش داده شده است. به‌علاوه در شکل 2-الف خط‌چین‌های قرمز رنگ نشان‌دهنده موقعیت نسبی 3 صفحه قائم برداشت الگوی جریان می‌باشند. در شکل 2-ب مشاهده می‌شود که تنش برشی رینولدز در عمق کانال افزایش می‌یابد و بیشترین مقادیر در نزدیکی بستر مشاهده می‌شود. رفتار مشابه تنش برشی رینولدز توسط بسیاری از محققان پیشین مانند Nezu and Nakagawa (1993) یا Nikora et al. (1998) مشاهده شده است. در هر دو شکل قابل مشاهده است که مقدار $\overline{u'w'}$ در نزدیکی بستر به صورت مکانی بسیار متغیر است. این در حالی است که در شکل 2-ب با دور شدن از بستر توزیع یکنواخت‌تر می‌شود. چنین رفتاری توسط Buffin-Bélanger et al. (2006) برای تنش برشی رینولدز مشاهده شده است. بررسی‌های انجام شده در شکل 2 نشان داد که نتایج حاصل از تنش برشی رینولدز منطبق با مطالعات پیشین می‌باشد.

در سری دوم اندازه‌گیری‌ها، روش سرعت‌سنجی تصویری ذرات بصورت دو بعدی و دو مؤلفه‌ای برای اندازه‌گیری میدان جریان در یک صفحه عمودی $x-z$ در محور کانال و دو صفحه عمودی در فاصله 50 میلی‌متر از محور کانال به سمت چپ و راست استفاده شد. در این شرایط، دوربین در کناره چپ کانال قرار داده شد و پرتو لیزر از بالای کانال به یک منشور تابیده شد تا اثرات احتمالی سطح آب را از بین ببرد. در تمامی اندازه‌گیری‌ها دوربین‌های پرسرعت Fastcam X 1024 PCI Photron با یک حسگر حساس به نور CMOS مورد استفاده قرار گرفت. لیزر از نوع Nd:Yag بوده و در حالت موج پیوسته بکار رفت. ذرات الک شده گرد گیاهان با اندازه 75 تا 125 میکرومتر و چگالی 1/07 گرم در سانتی‌متر مکعب به‌عنوان مواد ردیاب در آب استفاده شد. برای هر آزمایش مواد ردیاب در ورودی کانال تزریق شد. غلظت حجمی ذرات هدف (مواد ردیاب) و تفاوت نور¹ بین نقاط هدف سفید و زمینه تصویر به گونه‌ای تنظیم شد تا توزیع همگنی از این ذرات مخصوصاً نزدیک به ناحیه کف بدست آید. برای حذف نواحی اشغال شده توسط مواد بستر در تصاویر، یک ماسک بر اساس ترازهای اندازه‌گیری شده بستر تهیه و به داده‌ها اعمال شد. پردازش و تحلیل تصاویر با استفاده از نرم‌افزار (Di Florio et al. 2002) PIVDEF (CNR-INSEAN) انجام شد. فاصله بردارهای سرعت بدست آمده l_{IA} در صفحات افقی و قائم حدوداً 1 میلی‌متر بود. برای هر دو سری آزمایش‌ها، فرکانس نمونه‌برداری برابر 500 هرتز بود. نمونه‌برداری جریان در صفحات قائم به مدت 38/4 ثانیه و در صفحات افقی به مدت 13 ثانیه به طول انجامید. (Cooper and Tait 2010) بطور خاص اثرات خصوصیات آزمایشگاهی، مانند طول مدت برداشت در سرعت‌سنجی تصویری ذرات را بر سری سرعت در بسترهای شنی مورد مطالعه قرار دادند. مقایسه شرایط اندازه‌گیری در مطالعه حاضر با یافته‌های این محققان نشان می‌دهد که بازه اندازه‌گیری به اندازه کافی طولانی بود، بطوری که که همگرایی آماری مومنت‌های مرتبه اول و دوم میدان جریان را تضمین می‌کند. تحقیقات پیشین نشان داده

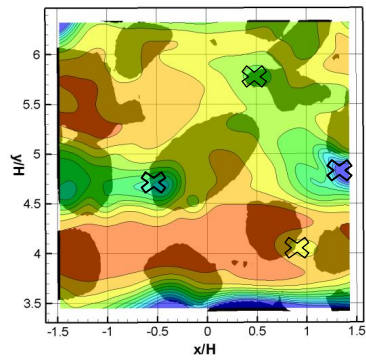
¹ Contrast



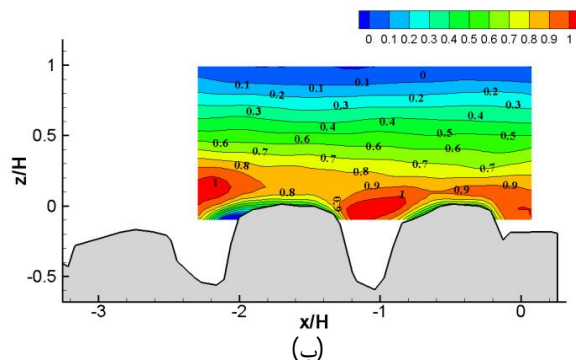
(الف)



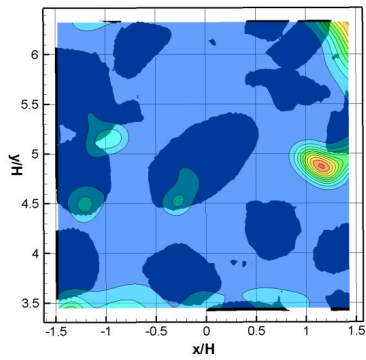
(الف)



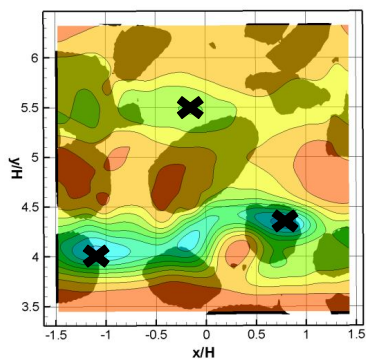
(ب)



(ب)



(ج)



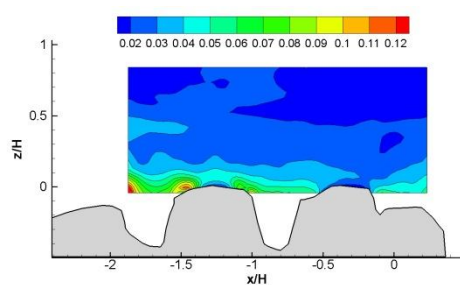
(د)

شکل 2 توزیع پارامتر بی بعد $(\overline{u'w'}/u_s^2)$ در سری آزمایشات 1 الف) در صفحه افقی نزدیک به سنگ‌دانه‌ها (ب) در صفحه قائم مرکزی؛ جریان از چپ به راست می‌باشد.

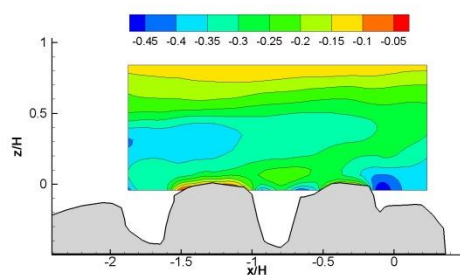
در شکل 3 آنالیز کوآدرانت انجام شده برای نتایج برداشت شده در صفحه افقی نمایش داده شده است. با توجه به این شکل، سهم گروه 1 و 3 (شکل‌های 3- الف و ج) در تنش برشی رینولدز (رجوع شود به رابطه 1) بسیار کم‌تر از سهم گروه 2 و 4 (شکل‌های 3- ب و د) می‌باشد. این پدیده از این واقعیت ناشی می‌شود که گروه 2 و 4 مربوط به دو پدیده فیریکی جهش و جاروب هستند، اما هیچ‌گونه ساختار منسجمی در گروه 1 و 3 روی نمی‌دهد. نتایج مشابه این مشاهده توسط بسیاری از محققان گزارش شده است (Nezu and Nakagawa, 1993; Mignot et al., 2009)

بررسی دقیق‌تر شکل 3 نشان می‌دهد که بین وقوع پدیده‌های جهش و جاروب و نیز توپوگرافی بستر یک تطابق نسبی وجود دارد. به بیان دقیق‌تر مقدار مطلق گروه 2 اغلب در بالادست سنگ‌دانه‌های بستر بیشتر می‌باشد (علامت ضرب در شکل 3- ب).

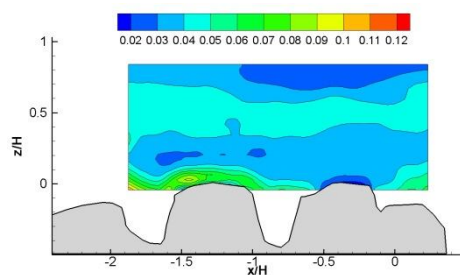
شکل 3 توزیع رخداد هر یک از کوآدرانت‌های بی بعد شده با سرعت برشی در صفحه افقی، در سری آزمایش‌های اول، الف) کوآدرانت 1 ب) کوآدرانت 2 ج) کوآدرانت 3 د) کوآدرانت 4؛ جریان از چپ به راست می‌باشد.



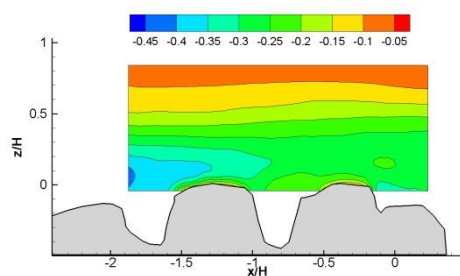
(الف)



(ب)



(ج)



(د)

شکل 4 توزیع رخداد هر یک از کودرانت‌ها بی‌بعد شده با سرعت برشی در صفحه قائم، در سری آزمایش‌های 1 و صفحه مرکزی (الف) کودرانت 1 (ب) کودرانت 2 (ج) کودرانت 3 (د) کودرانت 4؛ جریان از چپ به راست می‌باشد.

در شکل‌های 5- الف و ب، توزیع رنگی نشان‌دهنده چرخش سیال می‌باشد. اما در شکل‌های 5- ج و د، توزیع رنگی نمایشگر نوسان سرعت طولی که توسط روش رینولدز تفکیک شده است، می‌باشد. بردارهای سرعت در اشکال نمایش داده شده براساس روش گاليله تفکیک

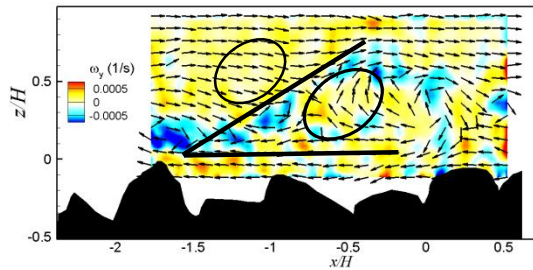
این در حالی است که غالباً در پایین دست سنگ‌دانه‌های بستر، مقدار مطلق گروه 4 بزرگتر می‌باشد (علامت ضرب در شکل 3- د). بنابراین در بالادست سنگ‌دانه‌ها اغلب پدیده جهش و در پایین دست آنها پدیده جاروب روی می‌دهد. رفتار مشابه در نزدیکی بستر توسط Hardy et al. (2009) گزارش شده است. به بیان دقیق‌تر Hardy et al. (2009) نیز مشاهده نمودند پدیده جهش اغلب در بالادست و جاروب در پایین دست سنگ‌دانه‌ها روی می‌دهد.

در شکل 4 نتایج حاصل از آنالیز کوآدرانت در صفحه قائم برای سری آزمایش 1 و صفحه موجود در مرکز کانال نمایش داده شده است. رفتار مشاهده شده در این شکل مطابق با مشاهدات صورت گرفته در صفحه افقی (شکل 3) می‌باشد. به علاوه در شکل‌های 4- ب و د مشاهده می‌شود که در نزدیکی سطح آب هر دو گروه 2 و 4 مقادیر کوچکی را نشان می‌دهند که این بیانگر عدم روی دادن پدیده‌های جهش و جاروب در نزدیکی سطح آب می‌باشد. از طرف دیگر، قیاس دقیق‌تر شکل‌های 4- ب و د نشان می‌دهد که حداکثر مقادیر گروه 4 در نزدیکی بستر و در بین سنگ‌دانه‌ها روی می‌دهد. این در حالی است که حداکثر مقادیر گروه 2 در بالای سنگ‌دانه‌ها و با فاصله اندکی از بستر روی می‌دهد. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که پدیده جهش اغلب در بالای سنگ‌دانه‌ها و با فاصله اندکی از بستر واقع شده و پدیده جاروب در بین سنگ‌دانه‌های شنی بستر روی می‌دهد. نتایج به دست آمده در این بخش نیز با مشاهدات Mignot et al. (2009) تطابق می‌باشد.

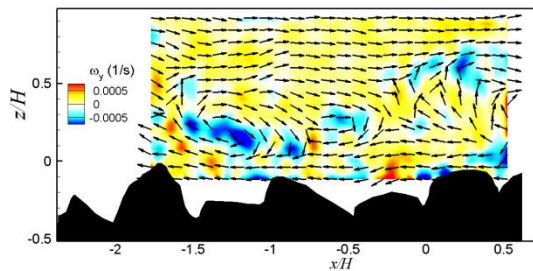
3-2- نتایج بررسی مقادیر لحظه‌ای سرعت سیال

در شکل 5، دو تصویر متوالی از سرعت لحظه‌ای جریان نمایش داده شده است. اختلاف زمانی بین این دو تصویر 80 میلی‌ثانیه می‌باشد (تصاویر الف و ج مربوط به زمان اول و تصاویر ب و د مربوط به زمان دوم می‌باشند) که این عدد به مراتب از فرکانس آشفتگی جریان (که در این مطالعه برای آزمایش 1 تا 3 به ترتیب برابر با 6/5، 7/9 و 6/4 ثانیه می‌باشد) کمتر می‌باشد (Pope, 2000) و بنابراین هر دوی این تصاویر مربوط به رخداد یک ساختار منسجم می‌باشند.

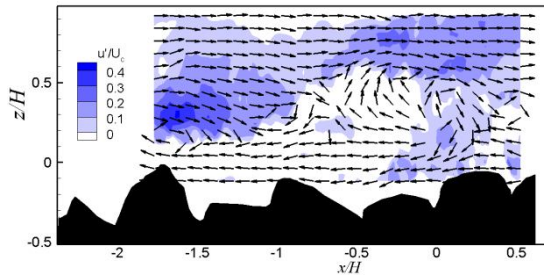
میدان جریان منتقل می‌شوند و در طی این مسیر معمولاً کشیده شده و سپس تجزیه می‌گردند.



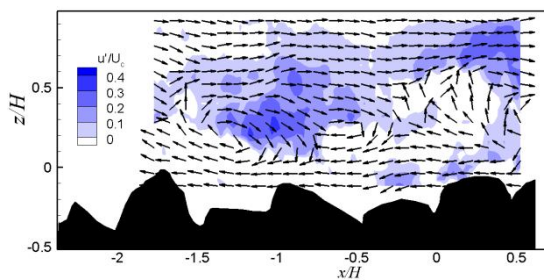
(الف)



(ب)



(ج)



(د)

شکل 5 میدان جریان لحظه‌ای در صفحه قائم (تفکیک شده توسط روش گاليله $(u_c = [0.85 U, 0])$) با اختلاف زمانی 80 میلی ثانیه در سری آزمایش 1، الف و ب) توزیع رنگی نشان‌دهنده چرخش می‌باشد ج و د) توزیع رنگی نشان‌دهنده نوسانات سرعت طولی (تفکیک شده توسط روش رینولدز) می‌باشد؛ جریان از چپ به راست می‌باشد.

شده‌اند. بر این اساس، مؤلفه‌های سرعت جابجایی سیال $(u_c = [0.85 U, 0])$ در نظر گرفته شد (U سرعت متوسط و u_c سرعت جابجایی سیال می‌باشد). علت اصلی استفاده از روش تفکیک سرعت گاليله برای نمایش بردارها به جای روش رینولدز این است که در روش گاليله لایه برشی بین ساختارها حفظ می‌شود. همچنین چون معادلات ناویر استوکس به تبدیل گاليله حساس نیست، سرعت جابجایی را می‌توان بطور مستقیم و بدون نیاز به اصلاح تنش رینولدز در معادلات ناویر استوکس به کار گرفت (Adrian et al., 2000). این موضوع بدان معنی است که با استخراج سرعت جابجایی از مؤلفه‌های سرعت موجود در معادله ناویر استوکس شکل کلی معادله حرکت ثابت باقی می‌ماند. لازم به ذکر است سرعت جابه‌جایی در اینجا با استفاده از روش سعی و خطا به دست آمده است و تنها به نحوی انتخاب شده است که ساختارهای منسجم تشکیلی در شرایط اندازه‌گیری بهتر مشاهده شوند.

برای هر دو زمان نمایش داده شده در شکل 5، تطابق خوبی بین اطلاعات حاصل از میدان چرخش، توزیع سرعت نوسانی و بردارهای سرعت تفکیک‌شده وجود دارد. در شکل 5-الف، ساختار گوه‌مانند در میدان جریان با توجه به چرخش شدید به رنگ آبی و نیز تغییر شدید بردارهای سرعت تفکیک شده در این ناحیه قابل تشخیص است. برای نمایش بهتر ساختار گوه‌ای از دو خط فرضی در این شکل استفاده شده است. بر اساس بردارهای تفکیک‌شده و نیز توزیع رنگی مؤلفه نوسانی سرعت طولی (شکل‌های 5-ج و د) می‌توان عنوان داشت که در دو طرف لایه برشی، دو ناحیه با سرعت بالا در بالادست لایه برشی (با u' مثبت) و ناحیه با سرعت کم در پایین‌دست لایه برشی (با u' منفی) قابل تشخیص است. نحوه تغییر رنگ چرخش (شکل‌های 5-الف و ب) در داخل لایه برشی به صورت غیرپیوسته و تکه تکه می‌باشد که نشان‌گر این واقعیت است که لایه برشی کج روی مرز نواحی پرسرعت و کم‌سرعت، پر از گردابه‌های ریز است. این گردابه‌ها معمولاً در تاج سنگ‌دانه‌های شنی تشکیل شده و همراه با سرعت جریان به سمت پایین‌دست حرکت می‌کنند و سپس تحت اثر مؤلفه قائم سرعت به بخش بالایی

Willmarth, 1973; Raupach, 1981; Bogard and Tiederman, 1986). اما در ارتباط با کاربرد این روش در شرایط بستر غیر صاف مانند بستر مورد مطالعه در تحقیق حاضر، دو نکته مفهومی را باید در نظر داشت. نخست آن - که در شرایط بستر صاف متوسط زمانی سرعت قائم برابر با صفر است (Nezu and Nakagawa, 1993). این نشان می‌دهد که مؤلفه لحظه‌ای سرعت قائم و نوسان سرعت قائم با یکدیگر برابر است (یعنی $w_i = w'_i$). این در حالی است که در شرایط بستر زبر متوسط سرعت قائم در نواحی نزدیک بستر زبر برابر با صفر نیست و لذا مؤلفه لحظه‌ای سرعت قائم و نوسان سرعت قائم با یکدیگر برابر نیستند (یعنی $w_i \neq w'_i$). براساس تعریف اولیه پدیده‌های جهش و جاروب، این دو حرکت می‌توانند توسط سرعت متوسط نیز روی بدهند (Willmarth and Lu, 1972). اثر سرعت متوسط در روی دادن پدیده‌های جهش و جاروب در روش دوم در نظر گرفته می‌شود (نگاه کنید به تعریف رابطه چرخش (رابطه 2) که در آن سرعت قائم و نه نوسان سرعت قائم حضور دارد). اما در روش آنالیز کوادرنانت و براساس روابط این روش (رابطه 1)، این اثر در نظر گرفته نمی‌شود. این موضوع بیان‌گر این حقیقت است که جریان منسجم در نزدیکی بستر زبر بسیار پیچیده می‌تواند از ساختارهای منسجم گوناگونی تشکیل شده باشد. به عنوان نمونه (Bomminayuni and Stoesser, 2011) در یک مطالعه عددی در ارتباط با ساختارهای منسجم در یک بستر زبر ساختارهای منسجم گوناگونی را در نزدیکی المان‌های زبر بستر مشاهده نمودند. همچنین ایشان بیان داشتند که بسیاری از ساختارهای مشاهده شده از نوع گردابه‌های لحظه‌ای و غیرمنسجم¹ می‌باشند. بنابراین اظهار نظر در ارتباط با ساختارهای منسجم در نزدیکی بستر زبر توسط آنالیز کوادرنانت چندان معتبر نمی‌باشد و استفاده از تحلیل لحظه‌ای سرعت توصیه می‌شود.

از طرف دیگر (Willmarth and Lu, 1972) روش آنالیز کوادرنانت را برای شرایطی توسعه دادند که بتوان از مؤلفه عرضی سرعت صرف نظر نمود و فرض جریان دوبعدی را بتوان استفاده نمود. در شرایط بستر زبر، این فرض حداقل در مناطق نزدیک به بستر، چندان منطقی به نظر نمی‌-

به همین دلیل گردابه‌های تشکیل شده در نزدیکی بستر قوی‌تر هستند. این نوع ساختار منسجم جریان منطبق با وقوع پدیده‌های جهش و جاروب در این شرایط می‌باشد. (Detert et al. (2010) و نیز (Hardy et al. (2009) با انجام تحلیلی مشابه آنچه در اینجا انجام شده است، حضور پدیده‌های جاروب و جهش را در شرایط بستر زبر مشاهده نمودند. بردارهای سرعت تفکیک شده نمایش داده شده در شکل 5، نشان می‌دهد که در این دو زمان حرکت سیال با سرعت بالا و اغلب به سمت بستر، در نواحی بالای بستر بیشتر مشاهده می‌شود (ناحیه بالادست لایه برشی)، این در حالی است که در نواحی نزدیک به بستر حرکت سیال اغلب با سرعت کم و غالباً به سمت بالا مشاهده می‌گردد (ناحیه پایین دست لایه برشی) که این نواحی در شکل 5- الف با دو دایره متمایز شده‌اند. این مشاهده با نتایج آنالیز کوادرنانت در خصوص رایج بودن پدیده جهش در بالای سنگ‌دانه‌ها و و با فاصله اندکی از بستر در تطابق می‌باشد. (Hardy et al. (2009) نیز مشاهده نمودند که پدیده جهش اغلب در بالای سنگدانه‌ها روی می‌هد.

4- بحث و بررسی

در بخش پیشین به نتایج آزمایشگاهی با استفاده از آنالیز کوادرنانت و روش بررسی ساختار سرعت لحظه‌ای به کمک چرخش و تفکیک سرعت به روش گالیلو ارائه گردید. بررسی نتایج نشان داد که تطابق مقبولی مابین نتایج دو روش در ارتباط با پدیده جهش قابل مشاهده است. در حقیقت مشاهده گردید که در مکانی که براساس آنالیز کوادرنانت بیان‌گر مقادیر بیشتر گروه 2 می‌باشد، روش بررسی ساختار سرعت لحظه‌ای نیز وجود پدیده جهش را نشان می‌دهد. اما رایج بودن پدیده جاروب در بین سنگدانه‌ها که توسط روش آنالیز کوادرنانت مشاهده گردید، براساس تحلیل لحظه‌ای سرعت قابل مشاهده نمی‌باشد.

باید توجه داشت روش آنالیز کوادرنانت نخستین بار برای بررسی جریان در شرایط بستر صاف توسعه یافت (Willmarth and Lu, 1972) و در ادامه نیز در همین شرایط به طور گسترده مورد استفاده قرار گرفت (Lu and

¹ Incoherent Vortices

تواند اطلاعات سودمندی را نشان دهد (Willmarth and Lu, 1972). اما با وجود سودمند بودن این اطلاعات، از نظر مفهومی و تئوری در ارتباط با پدیده‌های جهش و جاروب هیچ‌گونه نتیجه‌ای نمی‌توان گرفت. بنابراین کاربرد آنالیز کوآدرانت در مطالعات هیدورلیکی که بستر غیرصاف می‌باشد، کاملاً صحیح است، اما ارتباط دادن این تحلیل به وجود ساختارهای منسجم در جریان سیال چندان صحیح نمی‌باشد و تحلیل‌های قوی‌تری برای نتیجه‌گیری در این زمینه لازم است.

در نهایت لازم به ذکر است که مشاهدات توصیف شده توسط روش تحلیل سرعت لحظه‌ای در مطالعه حاضر نیز تنها در جهت تایید نظریه گردابه سنجاقی و وقوع پدید-های جهش و جاروب می‌باشد. اما نمی‌توان امکان تشکیل سایر ساختارهای منسجم مانند گردابه چسبیده¹ ارائه شده توسط Townsend (1976) در نزدیکی بستر زبر را نادیده گرفت. براساس نظر Townsend (1976) ساختارهای پیوسته در جریان لایه مرزی دارای قطری برابر با فاصله از جداره هستند و براین اساس تمامی ساختارهای پیوسته تشکیلی در این نوع جریان به جداره چسبیده می‌باشند. بنابراین توصیف جامع و دقیق چنین جریان پیچیده‌ای در نزدیکی بستر بسیار مشکل می‌باشد. لذا در این مطالعه، تنها به برجسته کردن نوعی از ساختار آشفته سیال که در بررسی و مقایسه با آنالیز کوآدرانت می‌تواند سودمند واقع گردد، اکتفا شده و در زمینه امکان وجود سایر ساختارهای آشفته، هیچ‌گونه اظهار نظری نشده است.

5- نتیجه‌گیری

در مطالعه حاضر به بررسی دو روش موجود برای شناسایی ساختارهای منسجم موجود در یک کانال مستقیم (آنالیز کوآدرانت و تحلیل سرعت لحظه‌ای سیال) در شرایط بستر غیرصاف پرداخته شد. به این منظور الگوی جریان توسط روش سرعت‌سنجی تصویری ذرات برداشت گردید. به طور کلی نتایج زیر از مجموعه‌ی آزمایشات به‌دست آمد:

1- مشاهده شد که نتایج به‌دست آمده از هر دو روش در نواحی با فاصله اندک از بستر، تطابق قابل قبولی با یکدیگر

رسد. به عبارت صحیح‌تر این فرض در بسیاری از شرایط رایج در مهندسی هیدرولیک، مانند جریان حول پایه پل یا جریان مابین آبشکن، به شدت زیر سوال می‌باشد. این بدان معنی است که علاوه بر تنش برشی رینولدز $(-\rho u'w')$ ، سایر مؤلفه‌های تنش رینولدز $(-\rho u'u')$ نیز دارای اهمیت می‌باشند و باید در نظر گرفته شوند. در چنین شرایطی توصیه می‌شود به جای استفاده از آنالیز کوآدرانت ارایه شده توسط Willmarth and Lu (1972)، از آنالیز کوآدرانت توسعه یافته توسط Duràn et al. (2012) استفاده نمود. براساس روش توسعه یافته توسط Duràn et al. (2012)، آنالیز کوآدرانت می‌تواند در شرایطی که جریان سه بعدی می‌باشد، در ناحیه لگاریتمی و ناحیه خارجی به کار برده شود. از دیگر مزایای مهم این روش آن است که نوسانات لحظه‌ای سرعت را که دارای شدت کمی می‌باشند و نمی‌توان به آنها هیچ ساختار پیوسته‌ای را نسبت داد، به خوبی شناسایی می‌کنند.

باید توجه داشت که در مطالعه حاضر، در نقاط دور از بستر زبر، نتایج آنالیز کوآدرانت با نتایج تحلیل سرعت لحظه‌ای در تطابق می‌باشد و علت کارایی آنالیز کوآدرانت در این ناحیه از جریان از ناچیز بودن مولفه سرعت قائم و عرضی و عدم تأثیر آنها در مؤلفه‌های نوسانی سرعت ناشی می‌شود. لذا می‌توان جمع‌بندی نمود که امکان تشخیص ساختارهای پیوسته به روش کوآدرانت در رژیم جریان صاف کاملاً صحیح و در رژیم جریان زبر با مشکل همراه می‌باشد. در ارتباط با شرایط بینابینی (شرایطی که نتوان آنها را نه بستر زبر و نه بستر صاف دسته‌بندی نمود) نمی‌توان به طور دقیق اظهارنظر نمود و در این زمینه مطالعات تکمیلی اجتناب ناپذیر است.

نکته مهم دیگر در ارتباط با آنالیز کوآدرانت، به نحوه استفاده از این آنالیز برمی‌گردد. با وجودی که در پاراگراف بالا دو نکته مهم و مفهومی در رابطه با کاربرد آنالیز کوآدرانت در تشخیص پدیده‌های جهش و جاروب ارائه گردید، استفاده از این روش در شرایط غیرصاف نیز می‌تواند سودمند باشد. این واقعیت از آنجا ناشی می‌شود که ریشه آنالیز کوآدرانت به تحلیل توزیع احتمال مؤلفه قائم و طولی سرعت مربوط می‌باشد و از نقطه نظر آماری می‌-

¹ Attached Eddy

u'	مؤلفه طولی نوسان سرعت
$-\rho u'w'$	تنش برشی رینولدز
$-\rho u'_i u'_j$	مؤلفه‌های مختلف تنش رینولدز
v	مؤلفه لحظه‌ای سرعت عرضی
w	مؤلفه لحظه‌ای سرعت قائم
w'	مؤلفه قائم نوسان سرعت
x	محور طولی
X_L	طول توسعه یافتگی جریان
y	محور عرضی
z	محور قائم
ν	لزجت سینماتیکی
ξ_i	تابع تعیین کننده گروه قرارگیری مؤلفه نوسانی سرعت
ρ	چگالی سیال
σ_u	شدت آشفتگی طولی
σ_w	شدت آشفتگی قائم
χ	ضریب
ω	چرخش عرضی
i	گروه قرارگیری مؤلفه نوسانی

دارند، ولی نتایج به دست آمده از آنالیز کوآدرانت در نزدیکی و در بین المان‌های زبر بستر با نتایج روش تحلیل سرعت لحظه‌ای در تطابق نمی‌باشند.

2- علت عدم تطابق نتایج در نزدیکی و در بین المان‌های زبر بستر، به عدم برقراری دو فرض اساسی در روش آنالیز کوآدرانت در شرایط بستر غیرصاف مربوط است. این دو فرض، غیر صفر بودن مؤلفه قائم سرعت و ماهیت سه بعدی جریان در بسترهای غیرصاف می‌باشد. بنابراین از نقطه نظر تئوری استفاده از روش آنالیز کوآدرانت در شرایط بستر غیرصاف چندان منطقی به نظر نمی‌رسد و باید از روش تحلیل لحظه‌ای سرعت یا روش بهبود یافته آنالیز کوآدرانت استفاده کرد.

3- باید توجه داشت که از نقطه نظر آماری آنالیز کوآدرانت می‌تواند در تحلیل آماری جریان آشفته سودمند واقع شود و استفاده از آن توصیه می‌شود. اما هرگونه ربط دادن آن به ساختارهای منسجم مانند جهش و جاروب و اظهار نظر در رابطه با این پدیده‌ها از نظر مفهومی چندان صحیح به نظر نمی‌رسد.

7- سپاسگزاری

مؤلفان بر خود لازم می‌دانند از دکتر ریگتی¹ و پروفیسور رومانو² که در تحلیل نتایج ارائه شده در این مقاله همکاری بسیار زیادی داشتند، تشکر نمایند.

8- منابع

مهاجری، س. ح. (1393). "مطالعه‌ای بر روش‌های تعیین زبری یک بستر شنی". نشریه هیدرولیک، دوره 9، شماره 4، ص.ص. 73-86.

مهرآئین، م؛ نوربخش، م. و قدسیان، م. (1394). "بررسی میدان جریان آشفته اطراف آبشکن T شکل مستغرق". نشریه هیدرولیک، دوره 15، شماره 3، ص.ص. 171-178.

Adrian, R., Christensen, K. and Liu, Z. (2000). "Analysis and interpretation of instantaneous turbulent velocity fields". *Experiments in Fluids*, 29, pp. 275-290.

Adrian, R. and Marusic, I. (2012). "Coherent structures in flow over hydraulic engineering surfaces". *Journal of Hydraulic Research*, 50 (5), pp. 451-464.

¹ Dr. Righetti, University of Bozen, Italy.

² Prof. Romano, University of Sapienza, Italy.

6- فهرست علائم

B	عرض کانال
D_{50}	قطر میانه
D_{90}	قطر ذره‌ای که 90 درصد ذرات از آن کوچکترند
Fr	عدد فرود
g	شتاب جاذبه
H	عمق جریان
k_s	ارتفاع زبری معادل
k_s^+	عدد بی بعد زبری معادل ماسه نیکورادزه
l_{IA}	فاصله بردارهای سرعت
Q	دبی جریان
Re_H	عدد رینولدز با طول مشخصه H
S	شیب کانال
t	زمان
T	طول زمان برداشت اطلاعات
u	مؤلفه لحظه‌ای سرعت طولی
U	سرعت متوسط جریان
u_c	سرعت جابجایی سیال
u_*	سرعت برشی

- of the structure of the Reynolds stress in a turbulent boundary layer". *Journal of Fluid Mechanics*. 60 (3), pp. 481-511.
- Mignot, E., Hurther, D. and Barthelemy, E. (2009). "On the structure of shear stress and turbulent kinetic energy flux across the roughness layer of a gravel-bed channel flow". *Journal of Fluid Mechanics*. 638, pp. 423-452.
- Mohajeri, S. H. (2014). "Hydrodynamics of gravel bed flows (Implications in colmation)". PhD Thesis, Department of Civil, Mechanics and Environmental Engineering, University of Trento and School of Geography, Queen Mary University of London.
- Mohajeri, S. H., Grizzi, S., Righetti, M., Romano, G. P. and Nikora, V. (2015). "The structure of gravel-bed flow with intermediate submergence: A laboratory study". *Journal of Water Resources Research*, 51 (11), pp. 9232-9255.
- Monin, A. and Yaglom, A. (1971). "*Statistical Fluid Mechanics - Vol. 1: Mechanics of Turbulence*". The MIT Press.
- Nezu, I. and Nakagawa, H. (1993). "*Turbulence in Open-Channel Flows*". A.A. Balkema.
- Nikora, V., Goring, D. and Biggs, B. (1998). "Silverstream eco-hydraulics flume: hydraulic design and tests". *New Zealand Journal of Marine and Freshwater Research*. 32, pp. 607-620.
- Pope, S. (2000). "*Turbulent Flows*". Cambridge University Press.
- Prasad, A., Adrian, R., Landreth, C. and Offutt, P. (1992). "Effect of resolution on the speed and accuracy of particle image velocimetry interrogation". *Experiments in Fluids*. 13, pp. 105-116.
- Raupach, M. (1981). "Conditional statistics of Reynolds stress in rough-wall and smooth-wall turbulent boundary layers". *Journal of Fluid Mechanics*. 108, pp. 363-382.
- Theodorsen, T. (1952). "*Mechanism of turbulence*". Proceeding of 2nd Midwest. Conf. Fluid Mechanics, Ohio State University, Columbus.
- Townsend, A. (1976). "*The Structure of turbulent shear flow*". 2nd edition. Cambridge University Press, Cambridge.
- Willmarth, W. and Lu, S. (1972). "Structure of the Reynolds stress near the wall". *Journal of Fluid Mechanics*. 55(01), pp. 65-92.
- Adrian, R. and Liu, Z. (2002). "Observation of vortex packets in direct numerical simulation of fully turbulent channel flow". *Journal of Vision* 5(1), pp. 9-19.
- Bogard, D. G. and Tiederman, W. (1986). "Burst detection with single-point velocity measurements". *Journal of Fluid Mechanics*. 162, pp. 389-413.
- Bomminayuni, S. and Stoesser, T. (2011). "Turbulence statistics in an open-channel flow over a rough bed". *Journal of Hydraulic Engineering*. 137(11), pp. 1347-1358.
- Buffin-Bélanger, T., Rice, S., Reid, I. and Lancaster, J. (2006). "Spatial heterogeneity of near-bed hydraulics above a patch of river gravel". *Water Resources Research*. 42(4), W04413.
- Cantwell, B. J. (1981). "Organized motion in turbulent flow". *Annual Review of Fluid Mechanics*. 13(1), pp. 457-515.
- Cooper, J. and Tait, S. (2010). "Spatially representative velocity measurement over water-worked gravel bed". *Water Resources Research*. 46(11), W11559.
- Detert, M., Nikora, V. and Jirka, G. (2010). "Synoptic velocity and pressure fields at the water-sediment interface of streambeds". *Journal of Fluid Mechanics*. 660, pp. 55-86.
- Di Florio, D., Di Felice, F. and Romano, G. P. (2002). "Windowing, re-shaping and re-orientation interrogation windows in particle image velocimetry for the investigation of shear flows". *Measurement Science and Technology*, 13, pp. 953-962.
- Durán, A., Flores, O. and Jiménez, J. (2012). "The three-dimensional structure of momentum transfer in turbulent channels". *Journal of Fluid Mechanics*. 694, pp. 100-130.
- Hardy, R., Best, J. L. S. and Carbonneau, P. (2009). "Coherent flow structures in a depth-limited flow over a gravel surface: The role of near-bed turbulence and influence of Reynolds number". *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*. 114(F1), F01003.
- Hussain, F. (1983). "Coherent structures- reality and myth". *Journal of Physics of Fluids*. 26(10), pp. 2816-2850.
- Hutchins, N. and Marusic, I. (2007). "Evidence of very long meandering streamwise structures in the logarithmic region of turbulent boundary layers". *Journal of Fluid Mechanics*. 579, pp. 1-28.
- Lu, S. and Willmarth, W. (1973). "Measurements