مهندسی عمران شریف، (زمستان ۱۳۹۷)
دوره‌ی ۲ - ۳۴، شماره‌ی ۴/۲، ص. ۲۵-۳۳

Original Article

ارزیابی اثر استغراق نسبی در ساختار گردابه‌های بزرگ‌مقیاس آشفتگی در یک کانال مستطیلی با بستر زبر

سید حسن مهاجری * **(استادیار)**
گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه خوارزمی

سعید کاظمی محسن‌آبادی (استادیار)
گروه مهندسی عمران، واحد بوئین زهرا، دانشگاه آزاد اسلامی، بوئین زهرا، ایران

اکبر صفرزاده گندیشمن (دانشیار)
دانشکده‌ی مهندسی عمران، دانشگاه محقق اردبیلی

یکی از عوامل مهم در جریان کانال روباز با بستر زبر، استغراق نسبی جریان (نسبت عمق جریان به ارتفاع زبری بستر) است. در مطالعه‌ی حاضر به بررسی اثر استغراق نسبی در ساختار گردابه‌های بزرگ‌مقیاس آشفتگی در یک کانال مستطیلی پرداخته شده است. به این منظور، مؤلفه‌های طولی و قائم سرعت به کمک روش سرعت‌سنجی تصویری ذرات در یک صفحه‌ی قائم در راستای جریان اندازه‌گیری شدند. نتایج اندازه‌گیری‌های مطالعه‌ی حاضر نشان داد که استغراق نسبی، ساختار لحظه‌یی گردابه‌های جریان را تحت تأثیر قرار نمی‌دهد. از طرفی مشاهده شد که با افزایش استغراق نسبی، ابعاد گردابه‌های بزرگ‌مقیاس افزایش می‌یابد. همچنین نسبت بعد طولی گردابه‌های بزرگ‌مقیاس آشفتگی به دست آمده از مؤلفه‌ی طولی به مقدار بعد طولی گردابه‌های بزرگ مقیاس آشفتگی به دست آمده از مؤلفه‌ی قائم، با افزایش نسبت استغراق افزایش می‌یابد. این مشاهده بیانگر این واقعیت است که در راستای طولی و با افزایش استغراق نسبی، مؤلفه‌ی طولی سرعت جریان، محدوده‌ی بیشتری را در قیاس با مؤلفه‌ی قائم سرعت، تحت تأثیر قرار می‌دهد.

واژگان کلیدی: بستر زبر، استغراق نسبی، گردابه‌های بزرگ‌مقیاس آشفتگی، سرعت‌سنجی تصویری ذرات، سرعت لحظه‌یی.

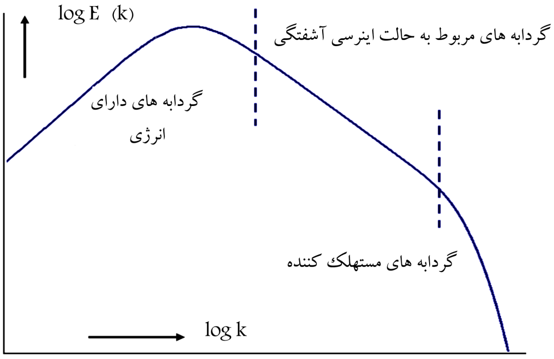
hossein.mohajeri@khu.ac.ir
s.kazemi@buiniau.ac.ir
safarzade@ma.ac.ir

۱. مقدمه

به جهت اهمیت بالای جریان آب در کانال روباز و نیز فراوانی وقوع آن در طبیعت، بسیاری از پژوهشگران اقدام به مطالعه‌ی جریان مذکور کرده‌اند. با پیشرفت تکنولوژی و ابداع روش‌های نوین در اندازه‌گیری جریان، مانند سرعت‌سنجی تصویری ذرات، مطالعه‌ی این گونه از جریان‌ها با پیشرفت‌های شگرفی مواجه شده است.[۱] در حقیقت، با چنین پیشرفت‌هایی در روش‌های اندازه‌گیری می‌توان خصوصیاتی از جریان را مشاهده کرد که در مطالعه‌های پیشین قابل مشاهده و اندازه‌گیری نبودند.[۱] بدون هیچ استثنایی، جریان در کانال روباز در شرایط آشفته قرار دارد. این بدان معنی است که جریان در کانال روباز تحت اثر آشفتگی، اختلاط بیشتری دارد و لذا هر دو فرایند اصلی روی داده در طی پدیده‌ی انتقال (یعنی پخش و جابه‌جایی) تحت اثر آشفتگی قرار می‌گیرند.[۲] در شرایط جریان آشفته، ساختارهای پیوسته‌یی از حرکت سیال تشکیل می‌شوند، که به گردابه[۱] مشهور هستند.[۳] گردابه‌ها در انتقال ممنتوم جریان و نیز در فرایند تولید، انتقال، و استهلاک انرژی، که به آبشار انرژی[۲] معروف است، نقش قابل توجهی دارند. گردابه‌های تشکیلی در جریان آشفته، اندازه‌ی یکنواختی ندارند و می‌توانند از مقیاس‌های بسیار کوچک تا مقیاس‌های بسیار بزرگ تشکیل شده باشند، که بر این اساس طیف انرژی آشفتگی[۳] تشکیل می‌شود.[۳] گردابه‌های بزرگ‌مقیاس آشفتگی در بسیاری از پدیده‌های مهم و رایج در هیدرولیک نقش کلیدی ایفا می‌کنند. مطالعات بسیاری بیانگر نقش گردابه‌های مذکور در مکانیزم انتقال رسوب و پدیده‌ی فرسایش هستند و به همین خاطر گردابه‌های بزرگ‌مقیاس آشفتگی در مطالعه‌ی شکل بستر رودخانه‌ها و کانال‌ها اهمیت بالایی دارند.[۴و۵] همچنین، مطالعه‌های جدیدتر حاکی از اهمیت ساختارهای مذکور در رشد آبزیان،[۶] و نحوه‌ی توزیع مکانی، و حرکت پوشش گیاهی در رودخانه‌هاست.[۷] از طرف دیگر، ساختارهای بزرگ آشفتگی، یکی از اجزاء مهم فرایند آبشار انرژی هستند.[۳] به منظور درک اهمیت ساختارهای بزرگ آشفتگی، باید از طیف انرژی جریان بهره برد. شکل ۱، شمای کلی طیف انرژی آشفتگی را نمایش می‌دهد، که در آن محور افقی بیانگر عدد موج (k)است. عدد موج برابر با لگاریتم حاصل تقسیم بر دو برابر عدد

* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۱۳۹۵/۷/۲۵، اصلاحیه ۱۳۹۵/۱۱/۳۰، پذیرش ۱۳۹۵/۱۲/۱۶.
DOI:10.24200/J30.2019.1439



شکل ۱. شمای کلی طیف آشفتگی در یک کانال مستقیم روباز.

π بر مقیاس طولی (l) است ($K = 2\pi/l$)..محور قائم نیز بیانگر لگاریتم انرژی متناظر با عدد موج مرتبط ($E(K)$) است. مطابق شکل ۱، با توجه به میزان انرژی مقیاس‌های مختلف آشفتگی، اثر و نقش گردابه‌های کوچک‌مقیاس و بزرگ‌مقیاس با یکدیگر متفاوت است.[۳] در گردابه‌های کوچک‌مقیاس، که در سمت راست نمودار شکل ۱ قرار دارند (توجه شود که عدد موج، معکوس مقیاس طولی است)، انرژی جریان به شدت در حال کاهش است. اما گردابه‌های بزرگ‌مقیاس که در سمت چپ نمودار شکل ۱ قرار دارند، انرژی بالایی دارند، که با کاهش ابعاد گردابه‌ها، انرژی جریان افزایش می‌یابد.[۳] لذا گردابه‌های بزرگ‌مقیاس بیشترین حجم انرژی جریان را دارند. بنابراین با توجه به موارد ذکر شده درباره‌ی اهمیت ساختارهای بزرگ‌مقیاس آشفتگی، بررسی و تعیین خصوصیات گردابه‌های بزرگ‌مقیاس، موضوع بسیاری از مطالعات مهندسی هیدرولیک و مکانیک بوده است.

بررسی‌های پیشین نشان داده است که ساختارهای بزرگ آشفتگی به شدت تحت تأثیر هندسه‌ی جریان و شرایط مرزی هستند.[۸] در شرایط طبیعی بستر بسیاری از کانال‌های روباز از المان‌های زبر تشکیل می‌شود. جداشدگی ناشی از برخورد جریان با این المان‌های زبر، جریان بسیار پیچیده‌یی را موجب می‌شود، که اثر آن می‌تواند در نقاط دور از بستر نیز مشاهده شود.[۹-۱۱] بر همین اساس، گردابه‌های بزرگ‌مقیاس آشفتگی نیز می‌توانند تحت تأثیر المان‌های زبر ذکر شده قرارگیرند. از طرفی دیگر، گردابه‌های بزرگ آشفتگی به شدت تحت تأثیر مقیاس‌های بزرگ طولی جریان، مانند ارتفاع لایه‌ی مرزی یا عمق آب در جریان کانال روباز هستند.[۳]

در مطالعات کانال روباز با بستر زبر، به جهت در نظرگرفتن توأم عمق جریان و نیز المان‌های زبر، عاملی با عنوان استغراق نسبی تعریف می‌شود. استغراق نسبی عبارت از حاصل تقسیم عمق جریان (H) بر مقیاس زبری بستر (k_s) است. همچنین برخی پژوهشگران به بررسی اثر استغراق نسبی در خصوصیات آشفتگی جریان پرداخته‌اند. برای مثال، در سال ۲۰۰۶ در بررسی اثر استغراق نسبی در پروفیل لگاریتمی سرعت عنوان شده است که در شرایط مذکور، پارامترهای معادله‌ی لگاریتمی (مانند ثابت انتگرال گیری) با توجه به تغییرات استغراق نسبی تغییر می‌کنند و عملاً نمی‌توان آن‌ها را ثابت فرض کرد.[۱۲] همچنین در یک مطالعه‌ی آزمایشگاهی در سال ۲۰۰۷،[۱۳] مشاهده شده است که اثر استغراق نسبی محدود به پروفیل لگاریتمی سرعت نیست و تنش‌های رینولدز نیز تحت اثر پارامتر مذکور قرار می‌گیرند. اخیراً نیز در یک مطالعه‌ی آزمایشگاهی دیگر به بررسی اثر پارامتر استغراق نسبی پرداخته و مشاهده شده است که استغراق نسبی علاوه بر سرعت متوسط و تنش‌های رینولدز می‌تواند علاوه بر خصوصیات آماری آشفتگی، در جریان‌های ثانویه‌ی تشکیل شده در یک کانال مستقیم با بستر زبر نیز تأثیرگذار باشد[۱۰] با وجود اهمیت اثر استغراق نسبی در ساختارهای آشفتگی، اثر این موضوع در ساختارهای آشفتگی و به طور خاص ساختارهای بزرگ‌مقیاس آشفتگی تاکنون مطالعه نشده است. لذا، هدف اصلی در مطالعه‌ی حاضر، بررسی اثر استغراق نسبی در مقیاس‌های بزرگ آشفتگی است. به بیان دقیق‌تر، در مطالعه‌ی حاضر اثر استغراق نسبی در ابعاد و ساختار مقیاس‌های بزرگ آشفتگی تحلیل و بررسی شده است. به منظور بررسی اثر پارامتر استغراق نسبی، ابتدا باید به سرعت لحظه‌یی جریان توجه شود و در ادامه، ابعاد گردابه‌های بزرگ‌مقیاس تعیین شود، که در ادامه، نحوه‌ی استخراج اطلاعات موردنظر شرح داده شده است.

۲. پیشینه‌ی علمی

به منظور بررسی مقادیر لحظه‌یی سرعت سیال، ورتیسیته‌ی جریان محاسبه می‌شود. ورتیسیته، یکی از مفاهیم بنیادی فیزیکی است، که براساس معادله‌ی ۱ تعیین می‌شود:[۲]

$$\omega = \frac{1}{2}\left(\frac{\partial u}{\partial z} - \frac{\partial w}{\partial x}\right) \qquad (۱)$$

که در آن، u و w به ترتیب سرعت‌های طولی و قائم جریان هستند. در مطالعه‌ی حاضر، سیستم مختصات راستگرد به‌کار رفته است. بدین ترتیب که محور x در راستای جریان اصلی و موازی متوسط بستر و در جهت پایین دست است؛ محور z مربوط به راستای عمود بر جریان و جهت آن از تاج دانه‌های شنی به سمت بالاست؛ و درنهایت، محور y در راستای عرضی و به سمت دیواره‌ی چپ است. بر همین اساس ورتیسیته‌ی به دست آمده از رابطه‌ی ۱، ورتیسیته‌ی عرضی جریان است. باید توجه داشت که ورتیسیته نمی‌تواند به تنهایی ساختارهای آشفته‌ی جریان را به خوبی نمایش دهد و اطلاعات کامل‌تر در این زمینه می‌تواند با تفکیک مؤلفه‌ی سرعت طولی به روش گالیله[۴] به دست آید.[۱۴،۱۵] تفکیک سرعت به روش گالیله، مشابه تفکیک سرعت به روش رینولدز[۵] است، با این تفاوت که به جای سرعت متوسط محلی، سرعت جابه‌جایی سیال[۶] از سرعت لحظه‌یی کسر می‌شود.[۳]

در مطالعه‌ی حاضر، به منظور تعیین ابعاد گردابه‌های بزرگ‌مقیاس آشفتگی از روشی با عنوان همبستگی دونقطه‌یی[۷] استفاده شده است. براساس روش مذکور، همبستگی بین نوسان سرعت در دو نقطه از جریان که مختصات مکانی متفاوتی دارند، از رابطه‌ی ۲ تعیین می‌شود:[۱۴]

$$\rho_{ij} = \frac{\overline{u'_i(x,z)u'_j(x+\Delta x, z+\Delta z)}}{\sigma_{ui}\sigma_{uj}} \qquad (۲)$$

که در آن، σ_{ui} و σ_{uj} انحراف معیار نوسان‌های زمانی مؤلفه‌های i و j سرعت و ρ_{ij} همبستگی بین دو مؤلفه‌ی سرعت u_i و u_j هستند. جهت تعیین اندازه‌ی مقیاس‌های بزرگ آشفتگی با روش همبستگی دونقطه‌یی، مؤلفه‌های قطری تانسور ρ_{ij} باید محاسبه شوند (یعنی مؤلفه‌هایی که i و j آن‌ها با یکدیگر یکسان هستند). در این شرایط رابطه‌ی ۲ به صورت رابطه‌ی ۳ ساده می‌شود:[۳]

$$\rho_i = \frac{\overline{u'_i(x,z)u'_i(x+\Delta x, z+\Delta z)}}{\sigma_{ui}^2} \qquad (۳)$$

در علم آمار، معادله‌ی نوشته شده در رابطه‌ی ۳، معروف به ضریب خودهمبستگی[۸] است. چنانچه مقدار ρ_i براساس رابطه‌ی ۳ تعیین شود، می‌توان اندازه‌ی مقیاس‌های

بزرگ آشفتگی را با کمک رابطه‌های ۴ و ۵ به دست آورد:[۳]

$$L_x = \int_0^\infty \rho_i(\Delta x, t)dx \qquad (۴)$$

$$L_z = \int_0^\infty \rho_i(\Delta z, t)dz \qquad (۵)$$

که در آن‌ها، L_x و L_z به ترتیب اندازه‌ی مقیاس‌های بزرگ آشفتگی در راستای طولی و قائم هستند. در مطالعه‌ی حاضر، از رابطه‌های ۴ و ۵ برای تعیین ابعاد مقیاس‌های بزرگ آشفتگی استفاده و نحوه‌ی تغییر آن‌ها تحت اثر استغراق نسبی بررسی شده است. باید توجه داشت که مابین ρ_i در رابطه‌ی ۳ و رابطه‌های ۴ و۵، یک تفاوت عمده وجود دارد: ρ_i در رابطه‌های ۴ و ۵، تک متغیره است. یعنی در روابط مذکور به غیر از بحث زمان، که انتگرال گیری بر روی آن انجام نمی‌گیرد، ρ_i تابعی از Δx و یا Δy است. این در حالی است که ρ_i در رابطه‌ی ۳، دو متغیره است (یعنی همزمان تابعی از Δx و Δy است). در شرایط مذکور، ρ_i با R_{ii} نمایش داده می‌شود و از روابط ۶ و ۷ به دست می‌آید:

$$R_{uu} = \frac{\overline{u'(x,z)u'(x+\Delta x, +z)}}{\sigma_u^2} \qquad (۶)$$

$$R_{ww} = \frac{\overline{w'(x,z)w'(x+\Delta x, +z)}}{\sigma_w^2} \qquad (۷)$$

به منظور استفاده از روابط ۶ و۷، نوسان‌های لحظه‌یی سرعت درمکان‌های مختلف و به طور همزمان به صورت آزمایشگاهی باید اندازه گیری شوند. در مطالعه‌ی حاضر، روش سرعت‌سنجی تصویری ذرات برای اندازه گیری مذکور استفاده شد؛ که در ادامه، همراه با تجهیزات آزمایشگاهی مورد بهره‌برداری معرفی شده است.

۳. روش انجام پژوهش

نتایج آزمایشگاهی پژوهش حاضر، در آزمایشگاه هیدرولیک دانشگاه ترنتو[۹] ایتالیا جمع‌آوری شده است.[۱۶] آزمایش‌ها در یک کانال مستقیم روباز با مقطع مستطیلی به طول ۶ متر، عرض ۰/۵ متر، و ارتفاع ۰/۴ متر و با قابلیت تغییر شیب طولی انجام شده است (شکل ۲- الف.) جهت کاهش آثار پایاب در شرایط جریان یکنواخت، از یک سرریز قابل تنظیم در انتهای کانال استفاده شد. به منظور اندازگیری عمق آب و کنترل شرایط یکنواختی جریان، پروفیل سطح آزاد آب به وسیله‌ی یک حس‌گر مافوق

الف) نمایی از کانال آزمایشگاهی؛ ب) بستر زیر کانال در آزمایش ها.

شکل ۲. شمایی از تجهیزات آزمایشگاهی در مطالعه حاضر.

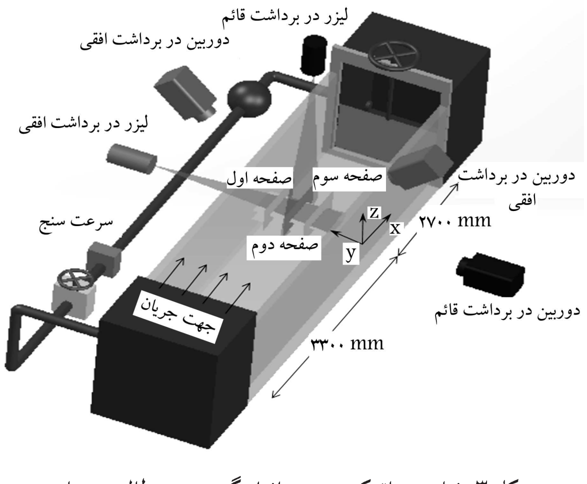
صوت[۱۰] اندازه‌گیری شد. دبی در ورودی کانال با استفاده از یک مبدل تنظیم سرعت پمپ، کنترل و به وسیله‌ی یک دبی‌سنج الکترومغناطیسی اندازه‌گیری شد. بستر شنی از سنگ‌دانه‌های با $D_{50} = 22mm$ و $D_{90} = 29mm$ تشکیل شده‌اند، که به طور یکنواخت روی کف کانال پخش شده است، تا یک لایه‌ی همگن با ضخامت ۲۰ سانتی‌متر ایجاد شود (شکل ۲- ب). توپوگرافی بستر با استفاده از یک لیزر از نوع $M5L/200$ از $x = -200mm$ تا $x = +300mm$ (ناحیه‌یی از کانال که اندازه‌گیری الگوی جریان در آنجا انجام می‌شود)، اندازه‌گیری شد. اطلاعات بیشتر در ارتباط با بستر زبر مطالعه‌ی حاضر در نوشتاری در سال ۲۰۱۴،[۱۶] قابل مشاهده است. سه سناریو به نام‌های آزمایش ۱، آزمایش ۲، و آزمایش ۳، که در بردارنده‌ی بازه‌یی از شرایط هیدرولیکی با عدد فرود تقریباً ثابت است، مطالعه شد (جدول ۱). در جدول ۱، عدد بی‌بعد زبری معادل ماسه‌ی نیکورادزه $k_s^+ = k_s u_* / v$ (که در آن: v 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.[۲] استغراق نسبی H/k_s از ۵/۹ تا ۶/۹ تغییر می‌کند، که نشان می‌دهد جریان در هر ۳ آزمایش می‌تواند به عنوان جریان کم عمق تعریف شود و چنین نسبت‌هایی در رودخانه‌های کوهستانی کشور ایتالیا قابل مشاهده است.[۱۷] نسبت B/H بزرگ تر از ۵ است، که بیانگر عدم تأثیر قابل توجه جریان‌های ثانویه در بخش مرکزی جریان است.[۲] اندازه‌گیری‌ها در ناحیه‌یی دور از دیواره‌های جانبی در فاصله‌ی

جدول ۱. شرایط هیدرولیکی برداشت آزمایش‌ها.

-	آزمایش ۱	آزمایش ۲	آزمایش ۳
$H(m)$	۰/۰۴	۰/۵۲	۰/۰۶
$S(-)$	۰/۰۰۲۸	۰/۰۰۲۶	۰/۰۰۲۹
$Fr(-)$	۰/۵۱	۰/۴۷	۰/۵۱
$Re_H \times 10^3(-)$	۱۲/۵۷	۱۷/۶۳	۲۳/۳۲
$B/H(-)$	۱۰/۰۰	۷/۷۰	۶/۰۰
$Q_{(10^3 m^3/s)}$	۵/۱۰	۷/۰۵	۹/۳۳
$k_s(mm)$	۶/۷۵	۸/۵۵	۸/۷۰
$k_s^+(-)$	۱۹۰	۲۸۴	۳۵۴
$X_L(m)$	۱/۳۷	۱/۶۱	۱/۷۴
H/k_s	۵/۹۰	۶/۱۰	۶/۹

* S شیب کانال $Fr = U/\sqrt{gH}$ عدد فرود، $U = Q/BH$ سرعت متوسط، $Re_H = UH/v$ عدد رینولدز.

۳٫۳ متر از ورودی کانال انجام شده است، که پروفیل سرعت کاملاً توسعه‌یافته و آثار سرریز پایین‌دست ناچیز است. طول توسعه‌یافتگی جریان (X_L) با استفاده از روش ارائه شده‌یی در سال ۱۹۹۸ تخمین زده شده است(جدول ۱).[۶] مقایسه‌ی مقادیر محاسبه و ارائه شده در جدول ۱ با مقطع اندازه‌گیری نشان می‌دهد که در ناحیه‌ی اندازه‌گیری، جریان در شرایط کاملاً توسعه‌یافته قرار دارد. در طی انجام آزمایش‌ها، اندازه‌گیری سرعت جریان با استفاده از روش سرعت‌سنجی تصویری ذرات در صفحات عمودی در راستای جریان انجام شد، که در شکل ۳ نمایش داده شده است. در این سری اندازه‌گیری‌ها، روش سرعت‌سنجی تصویری ذرات به صورت دو بعدی و دو مؤلفه‌یی برای اندازه‌گیری میدان جریان سرعت طولی u و ارتفاعی w در یک صفحه‌ی عمودی $x-z$ در محور کانال و دو صفحه‌ی عمودی در فاصله‌ی ۵۰ میلی‌متر از محور کانال به سمت چپ و راست استفاده شد. در این شرایط، دوربین در کناره‌ی چپ کانال قرار داده شد و پرتوی لیزر از بالای کانال به یک منشور تابیده شد، تا آثار احتمالی سطح آب را از بین ببرد. در تمامی اندازه‌گیری‌ها از دوربین‌های پرسرعت $FastcamX$ با یک حس‌گر حساس به نور$CMOS$ استفاده شد. لیزر از نوع $Nd:Yag$ بود و در حالت موج پیوسته به کار رفت. ذرات الک‌شده‌ی گرد گیاهان با اندازه‌ی ۷۵ الی ۱۲۵ میکرومتر و چگالی ۱٫۰۷ گرم در سانتی‌مترمکعب به عنوان مواد ردیاب در آب استفاده شد. برای هر آزمایش، مواد ردیاب در ورودی کانال تزریق شد. غلظت حجمی ذرات هدف (مواد ردیاب) و تفاوت نور[۱۱] بین نقاط هدف سفید و زمینه‌ی تصویر به گونه‌یی تنظیم شد تا توزیع همگنی از ذرات مذکور مخصوصاً نزدیک به ناحیه‌ی کف به دست آید. برای حذف نواحی اشغال‌شده توسط مواد بستر در تصاویر، یک ماسک براساس ترازهای توپوگرافی اندازه‌گیری شده‌ی بستر تهیه و به داده‌ها اعمال شد. پردازش و تحلیل تصاویر با استفاده از نرم‌افزار $PIVDEF(CNR-INSEAN)$ انجام شد. فاصله‌ی بردارهای سرعت به دست آمده در صفحات افقی و قائم در حدود ۱ میلی‌متر بود. برای هر دو سری آزمایش‌ها، بسامد نمونه‌برداری برابر ۵۰۰ هرتز در نظر گرفته شد. نمونه‌برداری جریان به مدت ۳۸٫۴ ثانیه به طول انجامید. به منظور بررسی اثر طول مدت برداشت در سرعت‌سنجی تصویری ذرات بر نتایج به دست آمده، از مطالعه‌یی در سال ۲۰۱۰،[۱۸] استفاده شد. مقایسه‌ی شرایط اندازه‌گیری در مطالعه‌ی حاضر با یافته‌های پژوهش اخیر،[۱۸] برای زمان لازم جهت مطالعه‌ی آماری جریان آشفته در کانال روباز با بستر زبر نشان می‌دهد که بازه‌ی اندازه‌گیری به اندازه‌ی کافی طولانی بود، به طوری که همگرایی آماری مومنتم‌های مرتبه‌ی اول و

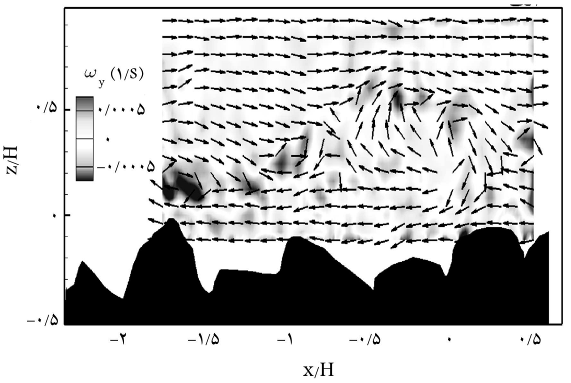


شکل ۳. نمای شماتیک سیستم اندازه‌گیری در مطالعه‌ی حاضر.

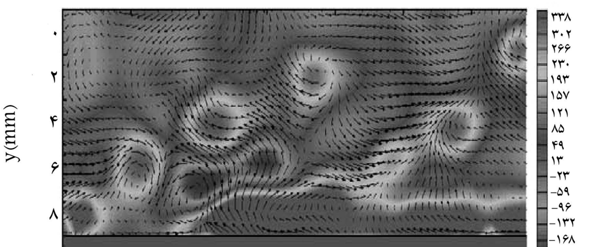
دوم میدان جریان را تضمین می‌کند. مطالعات پیشین نشان داده است که اگر نسبت قطر ذرات ردیاب به اندازه‌ی یک پیکسل در تصویر بزرگ‌تر از ۳ الی ۴ باشد، عدم قطعیت در برآورد نتایج در مرتبه‌ی $\frac{1}{10}$ تا $\frac{1}{20}$ قطر ذره خواهد بود.[۱۹] در مطالعه‌ی حاضر، شرایط ذکرشده برقرار شد و لذا عدم قطعیت و خطای ناشی از برداشت الگوی جریان با این روش در مرتبه‌ی $\frac{1}{10}$ تا $\frac{1}{20}$ قطر ذره خواهد بود. اطلاعات بیشتر در زمینه‌ی تجهیزات آزمایشگاهی و نحوه‌ی جمع‌آوری نتایج در نوشتاری در سال ۲۰۱۵،[۱۰] قابل دسترسی است.

۴. نتایج و بحث

در شکل ۴- الف، ورتیسیته‌ی جریان که از مؤلفه‌های سرعت لحظه‌یی به دست آمده است (رابطه‌ی ۱)، نمایش داده شده است. همچنین بردارهای سرعت نمایش داده شده در شکل مذکور، مؤلفه‌های نوسانی سرعت لحظه‌یی هستند، که براساس روش گالیله تفکیک شده‌اند. تفکیک کردن مؤلفه‌ی سرعت براساس روش گالیله، همان طور که در پیشینه‌ی علمی اشاره شده است، از حاصل تفریق سرعت لحظه‌یی از سرعت انتقالی سیال به دست می‌آید و موجب مشاهده‌ی بهتر ساختارهای آشفتگی لحظه‌یی تشکیل‌شده در جریان آشفته می‌شود.[۹] سرعت انتقالی در شکل ۴، که از روش سعی و خطا به دست آمده است، برابر با$0/85U$ (U سرعت متوسط جریان است) و صفر به ترتیب در راستای جریان و عمود بر جریان در نظر گرفته شد. همان طورکه در شکل مذکور نشان داده شده است، بردارهای جریان در نقاط نزدیک به بستر، تحت تأثیر برخورد با المان‌های زبر انحراف جریان را نشان می‌دهند. همچنین در شکل ۴-الف، دو ناحیه یکی با بردارهای با علامت مثبت(سمت چپ



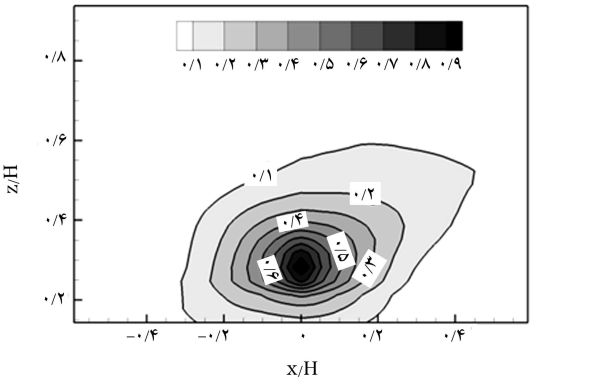
الف) صفحه افقی الف آزمایش ۲؛



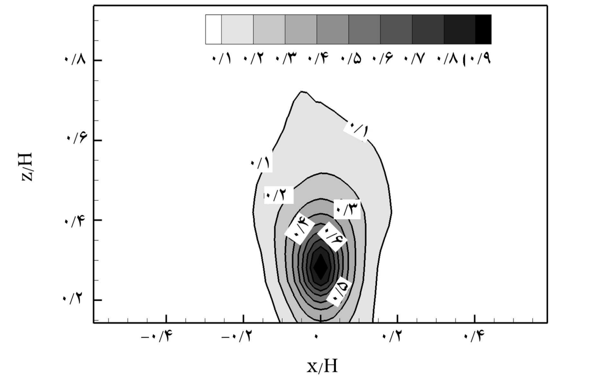
ب) برداشت آزمایشگاهی آلویسیو.

شکل ۴. بردارهای سرعت نوسانی لحظه‌یی تفکیک شده به روش گالیله ($u_c = 0/85U,0$) همراه با منحنی‌های تراز ورتیسیته در شرایط استغراق نسبی بالا، جریان از چپ به راست.

شکل و دور از بستر) و دیگری ناحیه با بردارهای منفی (سمت راست شکل و در نزدیکی بستر) قابل مشاهده است. در مرز بین این دو ناحیه نیز یک ناحیه با ورتیسیته‌ی منفی قابل توجه (ناحیه‌ی تیره رنگ در وسط شکل ۴-الف) تشکیل شده است، که بیانگر یک ناحیه‌ی برشی است، که نسبت به راستای جریان، زاویه‌ی انحراف حدود ۳۰ درجه دارد. چنین مشاهده‌یی می‌تواند بیانگر تشکیل ساختار گوه‌یی و پدیده‌های جهش و جاروب در شرایط مذکور باشد.[۱] ساختار گوه‌یی و پدیده‌های جهش و جاروب از گردابه‌های رایج در جریان لایه‌ی مرزی است، که در انتقال جرم و اندازه‌ی حرکت در کانال‌های روباز، اهمیت بالایی دارد.[۲۰] به منظور مقایسه‌ی ساختار جریان لحظه‌یی در شرایط استغراق نسبی کم (مطالعه‌ی حاضر) با ساختارهای آشفته‌ی لحظه‌یی جریان در شرایط طبیعی (بدون اثر سطح آب و زبری بستر) از اندازه‌گیری مطالعه‌ی آلویسیو و همکاران(۲۰۰۹)،[۲۱] استفاده شد. در شکل ۴- ب، میدان جریان لحظه‌یی به دست آمده در مطالعه‌ی اخیر،[۲۱] نمایش داده شده است. همانند مطالعه‌ی حاضر، بردارها در نوشتار مذکور براساس روش گالیله تفکیک شده‌اند و منحنی‌های کانتوری پشت صفحه، بیانگر ورتیسیته‌ی جریان هستند. همانند شکل ۴-الف، در شکل مذکور نیز ناحیه‌یی با بردارهای سرعت مثبت و دور از بستر همراه با ناحیه‌ی بردارهای سرعت منفی در نزدیکی بستر قابل مشاهده است. همچنین مشاهده می‌شود که در مرز بین نواحی مذکور، یک ناحیه با ورتیسیته‌ی شدید تشکیل می‌شود. با توجه به مشاهده‌ها می‌توان بیان کرد که شکل کلی ساختار لحظه‌یی جریان (و همچنین ساختارهای بزرگ‌مقیاس آشفتگی لحظه‌یی) نسبت به استغراق نسبی حساس نیست و با تغییر پارامتر استغراق نسبی، تفاوت محسوسی را نمی‌توان مشاهده کرد. همان طورکه اشاره شد، برای محاسبه‌ی ابعاد گردابه‌های بزرگ‌مقیاس از روش همبستگی دونقطه‌یی استفاده می‌شود. لذا در نخستین گام به بررسی نتایج همبستگی دونقطه‌یی پرداخته شده است. در شکل ۵، نتیجه‌ی همبستگی دونقطه‌یی مؤلفه‌ی طولی سرعت (رابطه‌ی ۳ با فرض $i = 1$) برای آزمایش ۲ و در صفحه‌ی اندازه‌گیری در مرکز کانال مشاهده می‌شود، که مطابق آن خطوط همتراز با کشیدگی بیشتر در راستایی مابین راستای قائم و افقی هستند. این کشیدگی می‌تواند ناشی از سرعت جابه‌جایی جریان در راستای طولی (راستای اصلی حرکت سیال در کانال) باشد.[۹] به بیان دقیق‌تر، سرعت جابه‌جایی جریان در راستای طولی بسیار بیشتر از سرعت جریان در راستای قائم است و لذا خطوط همتراز در راستای طولی گسترده شده‌اند. این بدان معنی است که به طور متوسط، نقاط با فاصله‌ی بیشتر در راستای طولی جریان در مقایسه با نقاط قرارگرفته در راستای قائم جریان، همبستگی بیشتری با یکدیگر دارند. از طرفی دیگر، مشاهده می‌شود که خطوط همتراز در راستای طولی به تنهایی گسترده نشده‌اند و با افق زاویه‌یی در حدود ۳۰ درجه تشکیل می‌دهند. این پدیده که چرا خطوط همتراز در راستای طولی با راستای افق زاویه پیدا کرده‌اند، ناشی از وقوع پدیده‌های جهش و جاروب[۱۲] درکانال است .[۲] در حقیقت پدیده‌های جهش و جاروب، که انتقال جریان با سرعت پائین در نزدیکی بستر به نقاط بالایی جریان (جهش) و همزمان حرکت انتقالی جریان با سرعت بالا و دور از بستر به سمت بستر کانال هستند،[۲۲] موجب افزایش همبستگی در راستای قائم می‌شوند. از آنجا که حرکت این دو پدیده هم‌زمان با حرکت به سمت پائین‌دست جریان همراه است، زاویه‌ی انحراف با خط قائم و افق مطابق آنچه در شکل ۵ نمایش داده شده است، ایجاد می‌شود.[۹] در شکل ۶، خطوط همتراز ضریب خود همبستگی مؤلفه‌ی قائم سرعت (رابطه‌ی ۳ با فرض $i = 2$) نمایش داده شده است. مشاهده می‌شود که خطوط تراز مذکور، کشیدگی محدودی در راستای طولی دارند، و این در حالی است که کشیدگی این نقاط در راستای قائم بسیار بیشتر است. این مشاهده بیانگر این موضوع است که

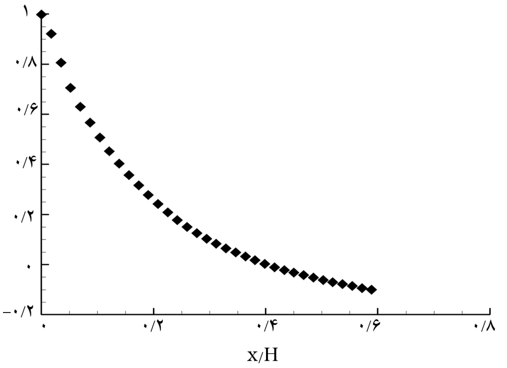


شکل ۵. خطوط همتراز ρ_{11} در صفحه‌ی قائم در مرکز کانال برای آزمایش ۲.

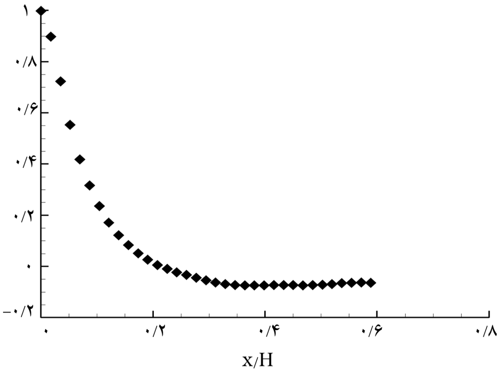


شکل ۶. خطوط همتراز ρ_{22} در صفحه‌ی قائم در مرکز کانال برای آزمایش ۲.

مؤلفه‌ی قائم سرعت در راستای طولی، کشیدگی ندارد و فقط در راستای قائم، خصوصیات حرکت سیال در بازه‌ی بزرگ‌تری باقی می‌ماند. به علاوه مقایسه‌ی مقادیر همبستگی دونقطه‌یی در شکل‌های ۵ و۶، نشانگر دو واقعیت است: نخست، اینکه مقادیر همبستگی دونقطه‌یی در راستای طولی ρ_{11} در نواحی نزدیک به مرکز مقادیر بزرگ‌تری را در فاصله‌ی بیشتری در مقایسه با همبستگی دونقطه‌یی در راستای طولی ρ_{22} حفظ می‌کند (مقایسه‌ی مقادیر همبستگی دونقطه‌یی بزرگ‌تر از ۰/۵ در خطوط همتراز شکل‌های ۵ و ۶). این در حالی است که همبستگی دونقطه‌یی در مقادیر پائین برای راستای طولی در فاصله‌ی بیشتری باقی می‌ماند (مقایسه‌ی مقادیر همبستگی دونقطه‌یی کمتر از ۰/۲ درخطوط همتراز شکل‌های ۵و ۶. مشابه مشاهدات شکل‌های ۵ و۶، در مطالعات پیشین نیزگزارش شده است. با مشاهده‌ی چنین ساختاری در مطالعه‌یی در سال ۲۰۰۰،[۱۴] نتیجه گرفته شده است که اثر پدیده‌های جهش و جاروب منجر به مشاهده‌ی چنین ساختارهایی شده است. همچنین در مطالعه‌ی دیگری(۲۰۱۰)،[۱۰] در زمینه‌ی جریان روی بستر زبر (سنگ‌دانه‌های شنی)، ساختارهای مشابهی مشاهده و با تحلیل ورتیسیته‌ی سیال نتیجه‌گیری شده است که این نوع همبستگی مکانی نوسان‌های سرعت، ناشی از تشکیل ساختارهای پیوسته‌یی در جریان مانند جهش و جاروب است. نتایج ارائه شده‌ی مطالعات اخیر، در مطالعات دیگری، نیزگزارش شده است.[۱۵و۲۳] البته در مطالعه‌ی اشاره‌شده‌ی اخیر،[۲۳] با بررسی ضریب خودمتشابهی در صفحات افقی اندازه‌گیری جریان همراه با صفحات قائم اندازه‌گیری جریان، وجود ساختارهای جهش و جاروب و اثر آن در ضریب خودمتشابهی بهتر توصیف شده است. در شکل ۷، ضریب خودمتشابهی در $z/H = 0/3$ نمایش داده شده است. این ضریب برای سرعت طولی (Ruu که از رابطه‌ی ۶ به دست آمده است)، در شکل ۷-



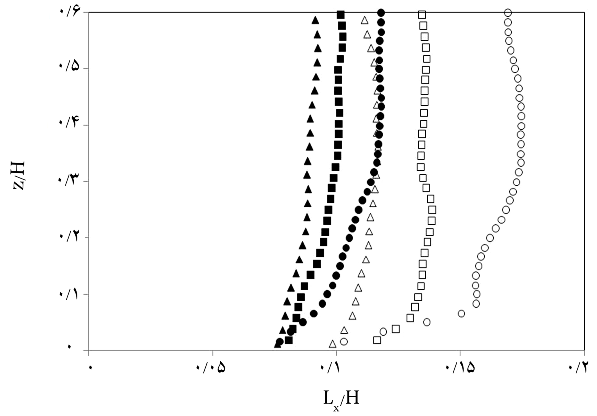
الف) در راستای افقی R_{uu}؛



ب) در راستای قائم R_{ww}.

شکل ۷. پروفیل ضریب خودمتشابهی در $z/H = ۰/۳$.

الف و ضریب خودمتشابهی برای سرعت قائم (Rww که از رابطه‌ی ۷ به دست آمده است) در شکل ۷- ب نمایش داده شده است. مشاهده می‌شود که هر دو ضریب مذکور در مبدأ مقداری مساوی ۱ دارند، که همان بیشینه‌ی همبستگی نیز است. علت برابرشدن با ۱ مقدار ضریب مذکور در نقطه‌ی مبدأ این است که Δ برابر با صفر است. لذا صورت روابط ۶ و ۷ نیز برابر با واریانس نوسان سرعت می‌شود، که در مخرج روابط ۶ و ۷ حضور دارد و لذا از نظر تئوری این روابط در مبدأ برابر با ۱ هستند.[۲۳] با زیادشدن فاصله‌ی طولی، هر دو نمودار کاهش می‌یابند. این مشاهده بیان می‌کند که با افزایش فاصله از مبدأ، میزان خاصیت خودمتشابهی کاهش می‌یابد و نقاط دور از مبدأ مشابهت خود را به‌صورت تدریجی از دست می‌دهند. بررسی دقیق‌تر شکل ۷ (الف و ب) نشان می‌دهد که میزان افت ضریب خودمتشابهی سرعت قائم (شکل ۷- ب) به مراتب شدیدتر از میزان افت ضریب خودمتشابهی سرعت طولی (شکل ۷-الف) است. در حقیقت ضریب خودمتشابهی در راستای افقی در $x/H = ۰/۴$ به صفر می‌رسد، این در حالی است که ضریب خودمتشابهی در راستای قائم در $x/H = ۰/۲۵$ به صفر می‌رسد. مشابه این نوع رفتار و نمودار در مطالعات پیشین نیز مشاهده شده است. ضریب خودمتشابهی سرعت قائم در مطالعه‌ی ولینو و همکاران (۲۰۰۷)،[۲۳] نیز همانند مطالعه‌ی حاضر زودتر از سرعت طولی به صفر می‌رسد. اما مقادیر طولی هر دو ضریب خودمتشابهی طولی و عرضی (x/H) متفاوت از مطالعه‌ی حاضر است. این تفاوت از آنجا ناشی می‌شود که اولاً عمق جریان در مطالعه‌ی حاضر، با ارتفاع لایه‌ی مرزی در مطالعه‌ی اخیر(۲۰۰۷)،[۲۳] که در تونل باد انجام شده است، متفاوت است. از آنجا که ساختارهای بزرگ آشفته و میزان همبستگی در مقیاس‌های بزرگ به عمق آب و ارتفاع لایه‌ی مرزی مربوط است،[۳] بنابراین مقادیر طولی ضریب



(●: آزمایش ۳ □: آزمایش ۲ △: آزمایش ۱).

شکل ۸. پروفیل اندازه‌ی مقیاس‌های بزرگ آشفتگی در راستای عمق جریان.

خودمتشابهی (x/H) می‌تواند متفاوت باشد. به علاوه ابعاد المان‌های زبر پخش شده در بستر تونل باد در مطالعه‌ی اخیر(۲۰۰۷)،[۲۳] با ابعاد المان‌های ذکرشده در مطالعه‌ی حاضر نیز متفاوت است و این تفاوت می‌تواند از این موضوع نیز ناشی شود. لذا به منظور در نظر گرفتن توأم این دو عامل، عمق استغراق نسبی تعریف و اثر تغییرات آن در ساختارهای بزرگ آشفتگی مطالعه شده است.

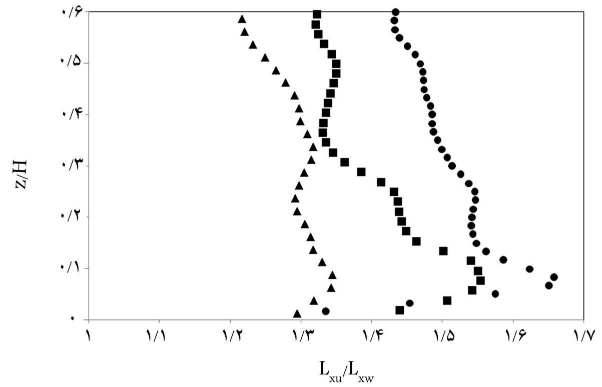
به منظور محاسبه‌ی ابعاد مقیاس‌های بزرگ آشفتگی از نمودارهایی مشابه نمودارهای نمایش داده‌شده در شکل ۷ استفاده شده است. در حقیقت براساس روابط ۶ و۷، مقدار اندازه‌ی مقیاس‌های بزرگ آشفتگی برابر با سطح زیر این نمودارها خواهد بود. از آنجا که روابط ۶ و ۷ مربوط به منحنی‌های پیوسته هستند و در اینجا مقادیر نمایش داده‌شده در شکل ۷، مربوط به منحنی‌های گسسته هستند و فقط در نقاط اندازه‌گیری شده‌ی مقادیر موجود هستند، سطح زیر نمودار باید به کمک روش‌های عددی محاسبه شود. به این منظور، سطح زیر هر یک از نمودارهای مذکور به کمک روش ذوزنقه‌یی[۱۳] محاسبه شده است،[۲۴] و برابر با اندازه‌ی مقیاس‌های بزرگ آشفتگی در نظرگرفته شده‌اند. این تذکر لازم است که به جهت سادگی، سطح زیر منحنی تا نقطه‌ی برخورد با محور افقی برابر با سطح کل زیر منحنی در نظرگرفته شده است (از سطح زیر منحنی پس از اولین نقطه‌ی برخورد با محور افقی صرف نظر شده است). از آنجا که سطح زیر منحنی پس از نقطه‌ی برخورد با محور افقی بسیارکوچک است، این فرض کاملاً معقول است و می‌توان به مقادیر محاسبه شده اعتماد کرد. همچنین در بسیاری از مطالعات پیشین، چنین روشی برای محاسبه‌ی ابعاد مقیاس‌های بزرگ آشفتگی استفاده شده است.[۲۶،۲۵،۳]

درشکل ۸، پروفیل‌های اندازه‌ی مقیاس‌های بزرگ آشفتگی درکلیه‌ی آزمایش‌های مطالعه‌ی حاضر مشاهده می‌شود. در این شکل نقاط تو پر مربوط به مقیاس به‌دست آمده از مولفه قائم سرعت و نقاط تو خالی مربوط به اندازه مقیاس به‌دست آمده از مولفه افقی سرعت است. پروفیل‌های با نشانه‌های توپر مربوط به اندازه‌ی مقیاس‌های بزرگ آشفتگی به دست آمده از سرعت قائم و نشانه‌های توخالی مربوط به اندازه‌ی مقیاس‌های آشفتگی به دست آمده از سرعت طولی هستند. به طورکلی، تمامی پروفیل‌ها در نزدیکی بستر و تا نقطه‌ی $z/H = ۰/۰۵$ رشد قابل توجهی را نشان می‌دهند. در بالای موقعیت ذکرشده، با وجود تغییرات جزئی می‌توان فرض کرد که مقیاس‌های بزرگ آشفتگی تقریباً ثابت می‌مانند. هر چند که باید توجه کرد اندازه‌ی مقیاس‌های بزرگ آشفتگی ثابت نیست و با تغییر عمق استغراق تغییر می‌کند. به بیان

دقیق‌تر، اندازه‌ی مقیاس‌های بزرگ آشفتگی در آزمایش ۱، که عمق استغراق پائین است، کوچک است. در آزمایش ۲، با عمق استغراق متوسط، اندازه‌ی مقیاس‌های بزرگ آشفتگی بزرگ‌تر از آزمایش ۱ است؛ و در آزمایش ۳، که عمق استغراق از سایر آزمایش‌ها بیشتر است، اندازه‌ی مقیاس‌های بزرگ آشفتگی از سایر آزمایش‌ها بیشتر است. بنابراین می‌توان نتیجه‌گیری کرد که با افزایش استغراق نسبی، اندازه‌ی مقیاس‌های بزرگ آشفتگی افزایش می‌یابد. چنین مشاهده‌یی در مطالعات پیشین و در شرایط بستر صاف گزارش شده است.[۲۶] در حقیقت در شرایط بستر صاف مشاهدات پیشین نشان داده شده است که اندازه‌ی مقیاس‌های بزرگ آشفتگی با افزایش عمق آب و یا با افزایش ارتفاع لایه‌ی مرزی افزایش می‌یابد.[۳،۲۶] در مطالعه‌ی حاضر نیز نشان داده شده است که در شرایط حضور المان‌های زبر در بستر، اندازه‌ی ساختارهای بزرگ آشفتگی با عمق جریان و افزایش استغراق نسبی (در آزمایش‌های مطالعه‌ی حاضر، زبری بستر ثابت بوده و افزایش عمق استغراق نسبی مساوی با افزایش عمق آب است) افزایش پیدا کرده است.

یکی دیگر از موارد قابل ارائه و ارزشمند در مطالعه‌ی حاضر، بحث نسبت تغییر اندازه‌ی مقیاس‌های بزرگ آشفتگی به دست‌آمده از مؤلفه‌ی طولی و قائم سرعت است. در حقیقت این نسبت می‌تواند بیانگر نحوه‌ی توسعه‌ی ساختارهای پیوسته و مقیاس‌های آشفتگی در راستای طولی جریان باشد. در شکل ۹، نسبت اندازه‌ی مقیاس بزرگ آشفتگی به دست آمده از مؤلفه‌ی طولی سرعت نسبت به مؤلفه‌ی عرضی سرعت نمایش داده شده است. مشاهده می‌شود که پروفیل این نسبت در هر ۳ آزمایش، شکل کلی یکسانی دارند. در حقیقت در هر آزمایش، از نقاط نزدیک بستر تا $z/H = ۰/۰۵$، نسبت اندازه‌ی مقیاس مؤلفه‌ی طولی به مؤلفه‌ی عرضی افزایش پیدا کرده است. در ارتفاعات بالای این موقعیت، رابطه تغییر پیدا کرده و نسبت اندازه‌ی مقیاس مؤلفه‌ی طولی به مؤلفه‌ی قائم کاهش یافته است. همچنین در شکل مذکور می‌توان نحوه‌ی تغییر این نسبت را برای هر ۳ عمق استغراق بررسی کرد. مشاهده می‌شود از آزمایش ۱ الی ۳ (نشانه‌ی مثلث تا نشانه‌ی دایره) که نسبت استغراق افزایش می‌یابد، نسبت اندازه‌ی مقیاس مؤلفه‌ی طولی به اندازه‌ی مقیاس مؤلفه‌ی قائم افزایش می‌یابد. به بیان دیگر، با افزایش استغراق نسبی، طول بیشتری تحت تأثیر مؤلفه‌ی طولی سرعت قرار می‌گیرد، ولی طول تحت تأثیر مؤلفه‌ی قائم سرعت، با تغییر استغراق نسبی چندان تغییر پیدا نمی‌کند. این پدیده بیانگر این واقعیت است که اندازه‌ی مقیاس‌های بزرگ آشفتگی به دست آمده از مؤلفه‌ی طولی سرعت، با میزان عمق بیشتر تغییر می‌کند و اندازه‌ی مقیاس‌های بزرگ آشفتگی به دست آمده از مؤلفه‌ی قائم، نیز کمتر تغییر می‌کند. بنابراین می‌توان پیش‌بینی کرد که ساختارهای بزرگ آشفتگی در چنین شرایطی با افزایش استغراق نسبی، گستردگی طولی بیشتری پیدا می‌کنند و نسبت عمق به طول یک گردابه‌ی تشکیل‌شده در راستای جریان، کاهش می‌یابد. متأسفانه در مطالعه‌ی حاضر، زبری بستر ثابت در نظر گرفته شده است و نمی‌توان اثر تغییرات آن را در نتایج و ابعاد اندازه‌ی مقیاس‌های بزرگ آشفتگی بررسی کرد. توصیه می‌شود در مطالعات آتی زبری بستر تغییر داده شود تا بهتر و کامل‌تر بتوان اثر استغراق نسبی را در ابعاد گردابه‌ها بررسی کرد.

مشاهدات انجام شده در شکل ۹ برای بسیاری از مطالعات آشفتگی، مهم و کاربردی است. به عنوان نمونه می‌توان به بحث نحوه‌ی صحیح اندازه‌گیری جریان اشاره کرد. مشاهده شد که با افزایش استغراق نسبی، اندازه‌ی مقیاس‌های بزرگ آشفتگی افزایش یافته و همچنین نسبت مقیاس به دست آمده از مؤلفه‌ی طولی به مؤلفه‌ی قائم نیز بزرگ‌تر شده است. از آنجا که مقیاس‌های کوچک آشفتگی برای هر دو شرایط مذکور، یکسان است (در حقیقت استهلاک انرژی و مقیاس‌های



(●: آزمایش ۳ ■: آزمایش۲ ▲: آزمایش ۱).

شکل ۹. نسبت اندازه‌ی مقیاس‌های بزرگ آشفتگی مؤلفه‌ی افقی به مؤلفه‌ی قائم.

کوچک آشفتگی، ابعاد یکسانی دارند و با شرایط هیدرولیکی جریان تغییر نمی‌کنند)، و از طرفی ابعاد گردابه‌های بزرگ آشفتگی با افزایش استغراق نسبی گسترش پیدا کرده‌اند، می‌توان نتیجه گرفت که طیف آشفتگی در شرایط استغراق نسبی بزرگ‌تر، طیف وسیع‌تری خواهد بود. بنابراین برای اندازه‌گیری صحیح و کامل در شرایط استغراق نسبی بیشتر باید ابعاد اندازه‌گیری (از محدوده‌ی مکانی موردمطالعه) گسترده‌تر شود. همچنین در صورت برقراری فرض تیلور (فرضی است که براساس آن جابه‌جایی ناشی از جریان‌های گردابه‌یی صرف نظر می‌شود)، جابه‌جایی جریان آشفته‌ی عبوری از یک نقطه‌ی خاص، تماماً ناشی از جریان متوسط خواهد بود.[۳] باید مدت زمان برداشت سری زمانی سرعت را گسترش داد، تا بتوان کاملاً کلیه‌ی ابعاد گردابه‌های آشفتگی را (از گردابه‌های کوچک‌مقیاس تا گردابه‌های بزرگ‌مقیاس) پوشش داد. به بیان دیگر، در مطالعات با استغراق نسبی بالاتر، مدت زمان برداشت نوسان‌های سرعت باید طولانی‌تر انتخاب شود تا اثر ساختارهای بزرگ آشفتگی به خوبی مشاهده شوند. بر همین اساس توصیه می‌شود در مطالعات آتی جریان‌های آشفته در کانال روباز، قبل از انجام اندازه‌گیری سرعت و میدان جریان، براساس نسبت استغراق، شرایط اندازه‌گیری ابعاد نسبی گردابه‌ها (که معمولاً در کانال روباز برابر با عمق جریان در نظر گرفته می‌شود) را در نظر گرفت و در ادامه، با کمک فرض تیلور و سرعت انتقالی جریان با به دست آوردن مقیاس زمانی گردابه‌های بزرگ‌مقیاس، شرایط مناسب برداشت‌های آزمایشگاهی (مانند مدت زمان برداشت، بسامد برداشت، و محدوده‌ی مکانی لازم برای مطالعه) را تعیین کرد.

۵. نتیجه‌گیری

در مطالعه‌ی حاضر، به بررسی اثر استغراق نسبی در ابعاد و اندازه‌ی مقیاس‌های بزرگ آشفتگی در یک کانال مستطیلی با بستر زبر پرداخته شده است. بدین منظور مؤلفه‌های طولی و قائم سرعت با استفاده از روش سرعت‌سنجی تصویری ذرات اندازه‌گیری برداشت شدند. ساختار لحظه‌یی جریان توسط تفکیک بردارهای سرعت به روش گالیله و مفهوم ورتیسیته مطالعه شد. همچنین جهت محاسبه‌ی ابعاد گردابه‌های بزرگ‌مقیاس آشفتگی از روش همبستگی دونقطه‌یی استفاده شد. مشاهده‌ی ساختار لحظه‌یی جریان حاکی از این واقعیت است که شکل کلی ساختارهای آشفتگی لحظه‌یی با تغییر استغراق نسبی، تغییر چندانی نمی‌کند. براساس نتایج روش همبستگی دونقطه‌یی مشاهده شد که تطابق قابل قبولی مابین مشاهده‌های مطالعه‌ی حاضر و

مطالعات پیشین وجود دارد. خطوط همتراز مؤلفه‌ی طولی، کشیدگی در راستای افقی (همراه با زاویه‌ی انحراف ناشی از پدیده‌های جهش و جاروب) را نشان می‌دهند. خطوط همتراز مؤلفه‌ی قائم سرعت نیز کشیدگی در راستای قائم را نشان می‌دهند. همچنین مشاهده شد که اندازه‌ی گردابه‌های بزرگ‌مقیاس آشفتگی در راستای عمق برای هر دو مؤلفه‌ی طولی و قائم مشابه یکدیگر هستند و به جز افزایش شدید در نزدیکی بستر، در نقاط دور از بستر تقریباً ثابت هستند. این رفتار گردابه‌های بزرگ‌مقیاس آشفتگی، مستقل از استغراق نسبی است و در هر ۳ آزمایش مطالعه‌ی حاضر مشاهده شدند. هر چند که مقیاس پروفیل در عمق اندازه‌ی گردابه‌های بزرگ‌مقیاس آشفتگی به دست آمده از مؤلفه‌های طولی و قائم نشان داد که با افزایش استغراق نسبی، نسبت اندازه‌ی گردابه‌های بزرگ آشفتگی به دست‌آمده از سرعت طولی به اندازه‌ی به دست آمده از سرعت قائم افزایش می‌یابد. این مشاهده نشان می‌دهد که در شرایط استغراق نسبی بیشتر، طیف آشفتگی وسیع‌تر است و باید در اندازه‌گیری‌های آزمایشگاهی و میدانی به طیف مذکور گسترده‌تر، پیش از اندازه‌گیری توجه شود.

تقدیر و تشکر

مؤلفان بر خود لازم می‌دانند از دکتر ریگتی[14] و پروفسور رومانو[15]، که در تحلیل نتایج ارائه شده در نوشتار حاضر همکاری بسیار زیادی داشتند، تشکر کنند. همچنین از آقای مهندس نیکوهمت برای رسم شکل ۳ و اتحادیه‌ی اروپا، جهت تأمین منابع مالی برای انجام پروژه‌ی حاضر قدردانی می‌کنند.

پانوشت‌ها

1. Eddies
2. Energy cascade
3. Turbulence Energy Spectra
4. Galilian velocity decomposition
5. Reynolds velocity decompisition
6. Convection Velocity
7. Two-point correlation
8. Autocorrelation
9. Trento university
10. Ultrasonic
11. Contrast
12. Sweep and Ejection
13. Trapezoidal method
14. Dr. Righetti, University of Bozen, Italy.
15. Prof. Romano, University of Sapienza, Italy.

منابع (References)

1. Adrian, R. and Marausic, I. “Coherent structures in flow over hydraulic engineering surfaces”,*Journal of Hydraulic Research*, **50**(5), pp. 451–464 (2012).
2. Nezu, I. and Nakagawa, H. “Turbulence in Open-Channel Flows”, A.A. Balkema (1993).
3. Pope, S. “Turbulent Flows”, Cambridge University Press (2000).
4. Shvidchenk, A. and Pender, G. “Macroturbulent structure of open channel flow over gravel beds”, *Journal of Water Resources Research*, **37**(3), pp. 709–719 (2001).
5. Best, J. “Linking Sediment Transport to Coherent Flow Structures: First Results Using 2-Phase PIV and Considerations of the Origin of Large-Scale Turbulence”, American Geophysical Union (2004).
6. Bouma, T.J., Van Duren, L.A., Temmerman, S.andetal. “Spatial flow and sedimentation patterns within patches of epibenthic structures: Combining field, flume and modeling experiments”, *Continental Shelf Research*,**27**(8), pp. 1020–1045 (2007).
7. Nepf, H. “Flow and transport in regions with aquatic vegetation”, *Annual Review of Fluid Mechanics*, **44**, pp. 123–142 (2012).
8. Venditti, J., Hardy, R., Church, M. andetal. “What is a Coherent Flow Structure in Geophysical Flow”, *Proccedding of Coherent Flow Structures at Earth Surface*, Vancouver, Canada (2011).
9. Hardy, R.J., Best, J.L., Lane, S.N. andetal. “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**, p.F1 (2009).
10. Mohajeri, S.H., Grizzi, S., Righetti, M. andetal. “The structure of gravel bed flow with intermediate submergence: A laboratory study”, *Journal of Water Resources Research*, **51**(11), pp. 9232–9255 (2015).
11. Nikora, V., Goring, D. and Biggs, B. “Silverstream eco-hydraulics flume: hydraulic design and tests”, *Journal of Marine and Freshwater Research*, New Zealand, **32**(4), pp. 607-620 (1998).
12. Koll, K. “Parameterisation of the vertical velocity profile in the wall region over rough surfaces”,*Proceeding of International Conference, Fluvial Hydraulics, River FlowLisbon Portugal*, edited by R.M.L. Ferreira, et al., pp. 163–171,*Taylor&Francis*, London U.K,. (2006).
13. Manes, C., Pokrajac, D. and McEwan, I. “Double-averaged open-channel flows with small relative submergence”, *Journal of Hydraulic Engineering*, **133**(8), pp. 896–904 (2007).
14. Adrian, R., Christensen, K. and Liu, Z. “Analysis and interpretation of instantaneous turbulent velocity fields”,*Experiments in Fluids*, **29**(3), pp. 275–290 (2000).
15. Detert, M., Nikora, V. and Jirka, G. “Synoptic velocity and pressure fields at the water–sediment interface of streambeds”, *Journal of Fluid Mechanics*, **660**, pp. 55-86 (2010).
16. Mohajeri, S.H. “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(2014).

17. Nikora, V.,; Goring, D., McEwan, I. and etal. "Spatially Averaged Open-Channel Flow over Rough Bed",*Journal of Hydraulic Engineering*, **127**(2), pp. 123-133 (2001).
18. Cooper, J. and Tait, S. "Spatially representative velocity measurement over water-worked gravel beds",*Water Resources Researc*, **46**(11), p.W11559 (2010).
19. Prasad, A., Adrian, R., Landreth, C. andetal. "Effect of resolution on the speed and accuracy of particle image velocimetry interrogation", *Experiments in Fluids*, **13**(2-3), pp.105-116 (1992).
20. Mohajeri, S.H., Righetti, M., Wharton, G. andetal. "On the structure of turbulent gravel bed flow: Implications for sediment transport", *Advances in Water Resources*, **92**, pp. 90-104 (2016).
21. Aloisio, G., De Felice, F. and Romano, G. "Experimental analysis of a turbulentboundary layer at high Reynoldsnumbers", *Journal of Turbulence*, **10**(31), pp. 1-19 (2009).
22. Willmarth, W. and Lu, S. "Structure of the Reynolds stress near the wall",*Journal of Fluid Mechanics*, **55**(1), pp.55- 65 (1972).
23. Volino, R.J., Schultz, M.P. and Flack, K.A. "Turbulence structure in rough- and smooth-wall boundary layers",*Journal of Fluid Mechanics*, **592**, pp. 263-293 (2007).
24. Nikoukar, M. and Darvishi, M.T. "Numerical Calculations", Gostaresh (2013).
25. O'Neill, P.; Nicolaides, D.; Honnery, D. and Soria J. "Autocorrelation Functions and the Determination of Integral Length with Reference to Experimental and Numerical Data", *15th Australasian Fluid Mechanics Conference, The University of Sydney*, Sydney, Australia (2004).
26. Swamy, N., Gowda, B. and Lakshminath, V. "Auto- correlation measurements and integral time scales in three-dimensional turbulent boundary layers",*Applied Scientific Research*, **35**(4), pp. 237-249 (1979).