



A Review on Interaction Between Hydrodynamics and Organisms in River Turbulent Flow

Mohammad Reza Majdzadeh Tabatabai¹  | Ali Moridi² 

1. Corresponding Author, Water and Environmental Engineerin Department, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran. E-mail: m_majdzadeh@sbu.ac.ir
2. Water and Environmental Engineerin Department, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran. E-mail: a_moridi@sbu.ac.ir

Article Info	ABSTRACT
Article type: Research Article	Most of methods to determine environmental flow in Iran have been dealt with the required depth for movement of target species whilst that interaction of flow and turbulence in river morphology should be paid more attention. Flow turbulence could be of significance in rivers, however, it has rarely been considered in river restoration and habitat evaluation, due to its complexity. In this paper, attempts have been made to review the interaction between hydrodynamics and organisms and their measurements in rivers to signify the turbulence investigation in river management. In this concern turbulence properties related to the flow environment (i. e. inclusive, intensity, frequency and flow structures) have been studied. In addition, role of vegetation cover and organisms have been investigated in-depth in the flow structures. In this connection, potential threats and opportunities have been put forward for river wildlife conservation. With regards to limited knowledge of this topic in Iran, this research could enable scientists and practitioners to understand the challenges for interaction of turbulence and restoration, particularly ecologically, in rivers.
Article history: Received: June 8, 2022 Received in revised form: October 07, 2022 Accepted: April 03, 2023 Published online: April 14, 2023	
Keywords: Hydrodynamics, organisms, river restoration, turbulence.	

Cite this article: Majdzadeh Tabatabai, M. R., and Moridi, A. (2023). A Review on Interaction Between Hydrodynamics and Organisms in River Turbulent Flow. *Journal of Water and Irrigation Management*, 13 (1), 83-104. DOI: <https://doi.org/10.22059/jwim.2023.344080.999>





مروری بر اندرکنش هیدرودینامیک جریان و زندگی آبریان در جریان آشفته رودخانه‌ها

محمد رضا مجدزاده طباطبائی^۱ | علی مریدی^۲

۱. نویسنده مسئول، دانشکده مهندسی عمران، آب و محیط زیست، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران. رایانامه: m_majdzadeh@sbu.ac.ir

۲. استادیار، دانشکده مهندسی عمران، آب و محیط زیست، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران. رایانامه: a_moridi@sbu.ac.ir

اطلاعات مقاله

چکیده

نوع مقاله: مقاله پژوهشی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۳/۱۸

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۱/۰۷/۱۵

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۱/۱۴

تاریخ انتشار: ۱۴۰۲/۰۱/۲۵

کلیدواژه‌ها:

آبریان،

آشفستگی،

احیای رودخانه،

هیدرودینامیک.

بیش تر روش‌های تعیین دبی محیط زیستی مورد استفاده در ایران تنها به عمق آب مورد نیاز برای تردد گونه‌های شاخص ماهیان توجه دارند، در صورتی که برای حفظ تنوع زیستی در رودخانه‌ها باید اثر آشفستگی جریان بر مورفولوژی و بستر رودخانه مورد توجه قرار گیرد. خواص آشفستگی جریان در رودخانه‌ها برای آبریان بسیار دارای اهمیت است، اما به دلیل ماهیت پیچیده‌شان به ندرت در ارزیابی‌های متداول زیستگاه رودخانه‌ها و طرح‌های احیا مورد بررسی قرار می‌گیرند. در این مقاله، به مرور اندرکنش دوطرفه هیدرودینامیک و موجودات آبری در رودخانه‌ها و نیز روش‌های کلیدی اندازه‌گیری آن‌ها پرداخته شده است تا مشوقی باشد برای توجه به اهمیت بررسی آشفستگی در علم و مدیریت رودخانه. همچنین، به بررسی روش‌های اندازه‌گیری خواص آشفستگی مرتبط با محیط‌زیست جریان شامل تعیین شدت، تناوب، جهت‌گیری، و مقیاس ساختارهای جریان آشفته پرداخته شده است. این تحلیل، علاوه بر تأکید بر روش‌های مختلف اصلاح میدان جریان توسط گیاهان و جانوران، به تأثیر مفید این روش‌ها پرداخته است. تهدیدهای بالقوه برای رشد و بقا مرتبط با آشفستگی شامل آسیب، جابه‌جایی، افزایش مصرف انرژی ارائه شده است. با توجه به دانش فنی محدود این موضوع بین‌رشته‌ای در ایران، در این مقاله سعی شده تا تجربیات جهانی در این رابطه بحث و جمع‌بندی شود و با شناسایی برخی موانع جهت ادغام آشفستگی با علم احیای رودخانه، به توان به درک مفاهیم در این زمینه پیچیده تحقیقاتی، پی برد.

استناد: مجدزاده طباطبائی، م. ر. و مریدی، ع (۱۴۰۲). مروری بر اندرکنش هیدرودینامیک جریان و زندگی آبریان در جریان آشفته رودخانه‌ها. نشریه

مدیریت آب و آبیاری، ۱۳ (۱)، ۸۳-۱۰۴. DOI: <https://doi.org/10.22059/jwim.2023.344080.999>



۱. مقدمه

با توجه به این که دبی زیست‌محیطی مقدار آبی است که از یک رودخانه، باید به سمت پایین‌دست و سیلابدشت آن جریان یابد، تا ویژگی‌های زیستی هم‌زمان با ویژگی‌های ارزشمند اکوسیستم حفظ شود (Nikora, 2010)، لذا به‌کارگیری روش مناسب جهت برآورد این دبی از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است که تاکنون بسیار به آن پرداخته شده است. در این میان به نقش این دبی و اندرکنش آن با بستر رودخانه و تأثیر بستز بر ساختار جریان کم‌تر مورد ملاحظه قرار گرفته است. در واقع دبی زیست‌محیطی تنها عامل جهت نگهداری حیات آبزیان نمی‌باشد بلکه مورفودینامیک بستر و ساختار جریان در نگهداری و حفظ زیست‌گاه‌های رودخانه‌ها نیز نقش به‌سزایی دارند. تغییر شکل بستر در امتداد پروفیل طولی آن نه تنها حاکی از تغییرات مورفولوژیکی رودخانه است بلکه به‌طور صریح روشنگر تغییرات زیست‌گاهی رودخانه و اندرکنش آن با ساختار جریان می‌باشد که خود در شکل‌گیری چرخه آبزیان و تغییرات مکانی آن در امتداد پروفیل طولی می‌تواند نقش کلیدی را ایفا نماید.

وقوع جریان‌های آشفته و نقش ساختار آن در احیا و ابقای حیات وحش رودخانه‌های کوهستانی می‌تواند نقطه عطفی در علم مکانیک سیالات و اندرکنش آن با جداره‌های متحرک و زیست‌بوم رودخانه باشد. ارتباط رهاسازی جریان در پایین‌دست سدها و مدیریت پایدار زیست‌گاه‌ها از عواملی هستند که تحت تأثیر مستقیم آشفته‌گی جریان قرار دارند. شدت آشفته‌گی در شرایط سیلابی و غیرسیلابی در حفظ و نگهداری زیست‌گاه‌های رودخانه‌ای به‌منظور حفاظت و نگهداری زیست‌بوم رودخانه می‌تواند بسیار مؤثر باشد.

مکانیک جریان سیال تأثیر اساسی بر گیاهان و جانوران در رودخانه داشته و آبزیان خواص هیدرودینامیکی جریان را تغییر می‌دهند (Vogel, 1994). در دینامیک سیالات، تفاوت اساسی بین رژیم‌های جریان آرام و آشفته وجود دارد. رژیم جریان آرام متشکل از لایه‌های موازی سیال است که روی یکدیگر بدون اختلاط می‌لغزند. رژیم جریان آشفته شامل اختلاط و انتقال مومنتوم توسط ساختارهای چرخشی جریان است که گردابه یا جریان چرخشی نام دارند. رژیم‌های جریان آشفته از نظر ریاضی پیچیده‌تر بوده و در رودخانه‌ها وجود دارند. رژیم جریان به کمک عدد رینولدز تعیین می‌شود که یک پارامتر بی‌بعد بوده و نسبتی از نیروی اینرسی به نیروی لزجت است. عدد رینولدز برای توصیف اندرکنش آبزیان و نیروهای ویسکوز سیال با مورفولوژی‌های بزرگ‌تر و ناهموارتر از نظر هیدرودینامیکی در اعداد رینولدز بالاتر نیز مورد استفاده قرار می‌گیرد (شکل ۱). جریان‌های آشفته طیف گسترده‌ای از شرایط محیطی را در بر می‌گیرند و تعریف پذیرفته‌شده جهانی برای آن وجود ندارد. مجموعه‌ای از ویژگی‌های مشترک جریان‌های آشفته عبارتند از اختلاط افزایش‌یافته، حساسیت به شرایط اولیه و آشفته‌گی‌های کوچک (آشفته‌گی قطعی)، طیف وسیعی از ساختارهای مکانی و زمانی دارای اندرکنش، حرکت در جهت‌هایی غیر از برش اعمال‌شده، چرخش، تناوب، و بی‌نظمی (Clifford *et al.*, 1993; Davidson, 2004; Nikora, 2010; Warhaft, 2002).

$$Re = \frac{\rho UL}{\mu} \quad \text{رابطه ۱}$$

که در آن، Re : عدد رینالدز، ρ : چگالی سیال، U : سرعت متوسط سیال، L : طول و μ : لزجت دینامیکی سیال.

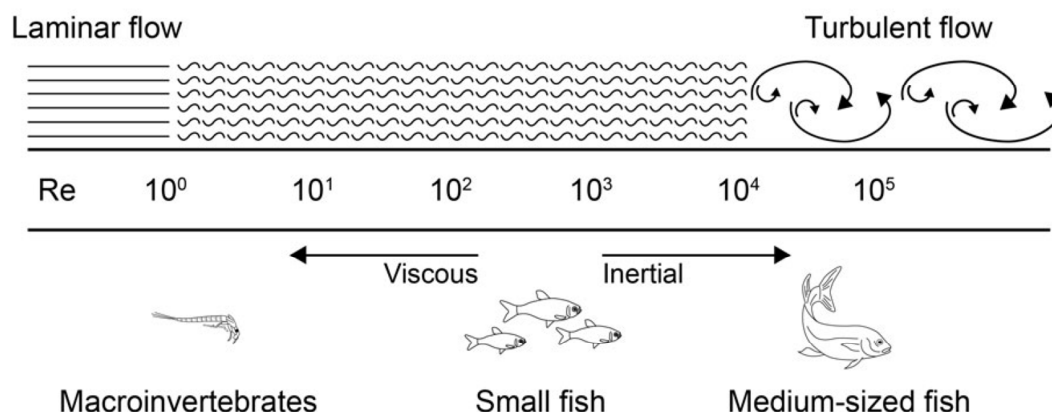


Figure 1. Definition of Reynolds number and laminar and turbulent flow, with example Reynolds numbers for different types of organisms interacting with the flow.

به دنبال انتشار مطالعات مهم و قابل دسترس در زمینه آشفتگی و تئوری لایه مرزی در دهه ۱۹۹۰ (Clifford *et al.*, 1993; Vogel, 1994)، مطالعات آزمایشگاهی و میدانی آشفتگی افزایش یافت. همچنین، توسعه و پیشرفت‌هایی در زمینه ابزارهای دقیق مانند سرعت‌سنجی داپلر آکوستیک (Chanson, 2008; Garcia *et al.*, 2005; Lane *et al.*, 1998; Liao, 2007; Voulgaris and Trowbridge, 1998) مشاهده شد و روش‌های تحلیلی برای تعیین خواص آشفتگی توسعه یافتند (Farge, 1992; Goring and Nikora, 2002; McLelland and Nicholas, 2000; Torrence and Compo, 1998).

ترکیب مطالعات آزمایشگاهی (Adrian, 2007; Hardy *et al.*, 2009; Jimenez, 2011; Nezu and Nakagawa, 1995) و اندازه‌گیری‌های میدانی با وضوح بالا در بازه‌های نسبتاً کوچک (کم‌تر از ۵ متر) در کانال‌های طبیعی، منجر به پیشرفت روش‌های اندازه‌گیری آشفتگی شده است (Buffin-Belanger and Roy, 1998). آشفتگی تأثیر قابل توجهی بر گیاهان و جانوران در رودخانه‌ها دارد. به عنوان مثال، وجود پوشش گیاهی تأثیر زیادی بر خواص متوسط آشفتگی جریان داشته (Nepf, 2012) و در نظر گرفتن آشفتگی منجر به ارزیابی بهتر انتخاب زیستگاه توسط ماهی‌ها (Smith *et al.*, 2014) و بی‌مهرگان (Morris *et al.*, 2015) می‌شود. با این وجود، میان بررسی دقیق هیدرودینامیک و روش‌های استاندارد ارزیابی زیستگاه (که اغلب بر مشاهدات بصری و یا ویژگی‌های متوسط جریان متکی هستند، مانند بررسی زیستگاه رودخانه، و شاخص ارزیابی زیستگاه رودخانه‌ای در رودخانه‌های مدیترانه (Pardo *et al.*, 2013; Raven *et al.*, 1998; Rinaldi *et al.*, 2013; Wilkes *et al.*, 2013))، گسستگی وجود دارد. این گسستگی منجر به عدم درک ارتباط موجود بین آشفتگی و آبیان در مقیاس مزو در رودخانه‌ها (Wilkes *et al.*, 2013) (که در آن‌ها باید بر ارزیابی زیستگاه و احیا تمرکز شود) می‌شود (Newson and Newson, 2000).

هدف از این مقاله، مروری بر وضعیت فعلی دانش در زمینه اندرکنش بین زیستگاه و هیدرودینامیک در رودخانه‌ها است تا مشوقی باشد برای توجه به اهمیت بررسی آشفتگی در علم و مدیریت رودخانه. جهت تحقق این امر، به مروری بر روش‌های طرح پژوهش در این زمینه پرداخته شده است. همچنین، به تئوری و پارامترهای لایه مرزی آشفتگی به طور خلاصه پرداخته شده و روش‌های اصلی اندرکنش ارگانیک‌های اصلی رودخانه (پوشش گیاهی آبی، بی‌مهرگان بزرگ، و ماهی‌ها) با خواص آشفتگی جریان مورد بررسی قرار گرفته‌اند که شامل روش‌های اصلاح هیدرودینامیک رودخانه‌ها توسط حیوانات و گیاهان، مزایای جریان‌های آشفتگی، و تهدیدات رشد و بقا ایجاد شده توسط آشفتگی می‌باشد.

۲. بررسی روش‌های طرح موجود

در روش‌های پژوهشی به‌کاررفته در مطالعه اندرکنش بین آشفتگی و آبزیان تنوع زیادی وجود دارد که منابع مختلف آن عبارتند از ۱- مطالعات و اندازه‌گیری میدانی، انجام آزمایش در آزمایشگاه‌ها، یا مدل‌سازی هیدرولیکی، ۲- شبیه‌سازی آشفتگی در مطالعات آزمایشگاهی با استفاده از مکانیسم‌های مختلف، ۳- به‌کارگیری موجودات زنده یا مصنوعی در انجام آزمایش در آزمایشگاه‌ها و ۴- اندازه‌گیری اثرات اکوفیزیولوژیکی و هزینه‌های انرژی شنا و رفتارهای ایجادشده به‌واسطه آشفتگی. از میان روش‌های ذکرشده، رایج‌ترین روش، انجام مطالعات آزمایشگاهی است که منجر به مشاهده دقیق رفتار موجودات و پاسخ به آشفتگی‌ها، و مهم‌تر از همه، بهره‌گیری از مزایای کنترل دقیق در آزمایشگاه می‌شود. از آنجاکه عوامل متعدد دیگری غیر از آشفتگی بر انتخاب زیستگاه و انرژی زیستی آبزیان در رودخانه‌های واقعی تأثیر می‌گذارند مانند عوامل درونی (مانند مرحله/ اندازه چرخه زندگی، وضعیت فیزیولوژیکی، میزان بار انگل و بیماری) و عوامل زیست‌محیطی (مانند سطوح نور، دما، در دسترس بودن اکسیژن و مواد مغذی، وجود مواد سمی و رقابت) (Hockley *et al.*, 2012; Shuter *et al.*, 2010; McKenzie and Claireaux, 2010; Liao, 2007; *al.*, 2014)، کنترل دقیق بسیار موردتوجه بوده و در نظر گرفتن این اثرات تحت شرایط میدانی امری چالش‌برانگیز است.

در انجام تنظیمات فلوم آزمایشگاه، روش‌های متعددی برای شبیه‌سازی و اندازه‌گیری آشفتگی وجود دارد و مقایسه نتایج حاصل از طرح‌های آزمایشی مختلف می‌تواند امری دشوار باشد. از مکانیسم‌های تولید آشفتگی در محیط‌های آزمایشگاهی می‌توان به تغییر درجه زبری در مرز فلوم (Nikora *et al.*, 2003)، مدولاسیون پمپ‌های جریان (Enders *et al.*, 2003)، و قرارگیری موانع استوانه‌ای یا کروی (اجسام غیر باریک) در میدان جریان (Liao *et al.*, 2003; Maia *et al.*, 2015) اشاره کرد. خواص آشفتگی از طریق اندازه‌گیری‌های نقطه‌ای سرعت که با فرکانس (به‌عنوان مثال ۲۰ هرتز) با استفاده از انواع حس‌گرها (Lane *et al.*, 1993; Clifford and French, 1998; Buffin-Belanger and Roy, 1998; Wilkes *et al.*, 2013; Sulaiman *et al.*, 2013; Stewart and Fox, 2015; *al.*, 1999) بالا نمونه‌برداری شده است و یا سرعت سنجی تصویری ذرات (PIV) که انجام آن در آزمایشگاه در مقایسه با شرایط میدانی ساده‌تر است، قابل‌اندازه‌گیری هستند (Adrian, 2005; Creutin *et al.*, 2003; Fox and Patrick, 2008; Tritico *et al.*, 2007). پیشرفت‌های اخیر در زمینه به‌دست‌آوردن پروفیل جریان به‌روش داپلر آکوستیک، منجر به ارائه سه‌بعدی و دقیق هیدرولیک جریان از طریق ثبت پروفیل‌های عمودی با وضوح بالا از نقاط نیمه‌پیوسته سرعت شده است (Chanson, 2006; Rusello *et al.*, 2005; Garcia *et al.*, 2008) که طیفی از خواص هیدرودینامیکی از این روش قابل استخراج است (به بخش بعد مراجعه کنید). فناوری‌های مشابه در شرایط میدانی نیز قابل‌استفاده می‌باشند. در انجام هر دو مطالعات میدانی و آزمایشگاهی باید منابع احتمالی خطا به هنگام نمونه‌برداری در نظر گرفته شوند که عبارتند از درجه آشفتگی ورودی به جریان توسط تجهیزات نمونه‌برداری، جهت‌گیری پروب، حجم نمونه‌برداری، تکرار اندازه‌گیری و طول زمان ثبت داده‌ها، و دقت پس‌پردازش (Buffin-Belanger and Roy, 1998; Wilkes *et al.*, 2013).

در پژوهش‌های اخیر، به مطالعه نقش مدل‌سازی عددی در اکو هیدرولیک (Tonina and Jorde, 2013) و شبیه‌سازی جریان آشفته (Argyropoulos and Markatos, 2015) پرداخته شده است. در مدل‌سازی عددی آشفتگی، به حل معادلات دیفرانسیل پاره‌ای شامل معادلات مونتوم و بقای جرم (معادلات ناویر-استوکس) پرداخته می‌شود. شبیه‌سازی عددی مستقیم (DNS)، به حل معادلات در کوچک‌ترین مقیاس‌های آشفتگی می‌پردازد، اما این روش هزینه محاسباتی بالایی داشته و کاربردهای اکوهیدرولیکی آن به دلیل عدم وجود درک اکولوژیکی و ژئومورفولوژیکی در این مقیاس، نسبتاً محدود است (Tonina and Jorde, 2013). لذا در بسیاری از موارد، به حل معادلات ناویر-استوکس به

روش میانگین‌گیری رینولدز (RANS) با هزینه محاسباتی کم‌تر پرداخته شده است. روش‌های جایگزین دیگر مانند روش شبه‌سازی گردابی بزرگ (LES)، با برقراری تعادل بین دقت، کاربری، و هزینه محاسباتی (Argyropoulos and Markatos, 2015) جهت حل معادلات ناویر-استوکس برای اکثر مقیاس‌های موردنظر قابل استفاده هستند (Rodi et al., 2013). روش‌های مدل‌سازی عددی اطلاعات مفیدی مانند ساختار آشفتگی در محل تلاقی رودخانه‌ها (Bradbrook et al., 1998; Bradbrook et al., 2000; Constantinescu et al., 2011; Rhoads and Sukhodolov, 2004)، چرخش جریان ثانویه ناشی از وجود موانع (Brevis et al., 2014; Ramon et al., 2015) و دینامیک رسوب (Duc et al., 2004; Wu et al., 2000) ارائه می‌کنند.

در مطالعات آزمایشگاهی، از موجودات زنده یا مدل‌های فیزیکی (جانشین‌های بی‌جان) جهت بررسی اندرکنش بین هیدرودینامیک و زندگی آبزیان استفاده شده است. این در حالی است که در مطالعات میدانی، تمرکز بر روی موجودات زنده است. در مدل‌های فیزیکی مورداستفاده برای پوشش‌های گیاهی مستغرق و بیرون‌زده از آب، از میله‌ها یا تیغه‌های پلاستیکی سخت یا انعطاف‌پذیر استفاده شده است که هندسه و صلیبیت مشابه با گونه‌های موردنظر، با شاخ‌وبرگ یا بدون شاخ‌وبرگ، دارند و معمولاً به یک تخته یا به بستر فلوم متصل هستند (Li et al., 2014; Nepf and Vivoni, 2000; Ortiz et al., 2013; Wilson et al., 2003). مدل‌های فیزیکی برای جانوران نیز در مطالعات آزمایشگاهی مورداستفاده قرار گرفته‌اند، مانند استفاده از قزل‌آلای مصنوعی جهت ارزیابی هیدرودینامیک رفتار هوادهی (Przybilla et al., 2010) و استفاده از لارو مگس سیاه ساخته‌شده از لوله‌های مویرگی (Chance and Craig, 1986). استفاده از جانشین‌های فیزیکی دارای مزایایی از جمله کاهش مشکلات عملی در خصوص دامپروری و سازگاری با آب‌وهوای جدید، هزینه، تکرار، فراوانی/چگالی، موقعیت قرارگیری در میدان جریان، و نیز امکان انجام اندازه‌گیری‌های بسیار دقیق در نزدیکی موجودات دارند (Johnson et al., 2014). جانشین‌های فیزیکی، ساختارهای فیزیکی ساده‌ای از موجودات زنده هستند که ویژگی‌های مورفولوژیکی مشابهی دارند، اما اندرکنش‌های مهم بیومکانیکی، فیزیولوژیکی و رفتاری با میدان جریان و با سایر موجودات در آن‌ها نادیده گرفته شده است (جهت مطالعه بیشتر در مورد استفاده از جانشین‌ها و جانوران زنده در آزمایش‌ها، به پژوهش Johnson et al. (2014) مراجعه کنید). به‌عنوان مثال، در جانوران زنده، انجام مطالعات بیوانرژیک دقیق امکان‌پذیر است و گزینه‌هایی برای تخمین هزینه‌های انرژی مرتبط با آشفتگی وجود دارد. نرخ جریان بحرانی (سرعتی که ماهی در آن خسته می‌شود) (Lupandin, 2005) می‌تواند از طریق مشاهدات بصری تعیین شود، این در حالی است که فیلم‌برداری زیر آب، رفتار و پاسخ به آشفتگی را به‌طور پیوسته ثبت می‌کند (Standen and Lauder, 2007; Tritico and Cotel, 2010) و آزمایش‌های تنفسی می‌تواند میزان مصرف اکسیژن و در نتیجه تلفات انرژی را به‌طور مستقیم مشخص کند (Enders et al., 2003). از محدودیت‌های روش‌های تجربی می‌توان به هزینه‌های راه‌اندازی، مناسب‌بودن تجهیزات برای هدف مطالعاتی، وجود تفاوت در ترکیبات بیوژئوشیمیایی آب و مشکلات برون‌یابی نتایج در مطالعات کوتاه‌مدت و کوچک‌مقیاس به مقیاس‌های زمانی و مکانی بزرگ‌تر اشاره کرد (Thomas et al., 2014).

۲.۱. تئوری آشفتگی و پارامترها

تعاریف متنوعی از جریان‌های آشفته در مطالعات انجام‌شده بر روی اثرات جریان آشفته بر آبزیان ارائه شده است. توصیف کمی آشفتگی به دو روش اصلی صورت می‌گیرد (Cotel and Webb, 2015; Wilkes et al., 2013)؛ ۱- توصیف آماری [۲] و ۲- استفاده از خواص مکانی و زمانی آشفتگی جهت توصیف ساختارهای منطقی جریان سه‌بعدی (CFS) یا گردابه‌ها

(Ferguson *et al.*, 1996; Richards, 1979; Roy *et al.*, 2004) در روش اول، آشفتگی به‌عنوان یک پدیده تصادفی در نظر گرفته می‌شود و خواص جریان در آن شناسایی می‌شود. در بررسی حرکت سیال با دیدگاه اویلری (قرارگیری در یک مکان خاص در فضایی که سیال از درون آن عبور می‌کند)، جریان آشفته با یک بردار سرعت با سه مؤلفه متعامد نمایش داده می‌شود (u در جهت جریان، v عمود بر جهت جریان، و w راستای قائم) که هر کدام از آن‌ها به دو بخش میانگین (U ، V و W) و نوسان‌کننده (u' ، v' و w') تجزیه می‌شوند. CFS از طریق تحلیل سری‌های زمانی، بصری‌سازی جریان، یا مدل‌سازی عددی (Best *et al.*, 2001; Hardy *et al.*, 2007; Roy *et al.*, 2004; Shvidchenko and Pender, 2001) ساختارهای کوچک‌مقیاس شامل المان‌های مجزای زبری مانند دانه‌های مواد بستر (Clifford *et al.*, 2001; Best *et al.*, 2001; Roy *et al.*, 1996; Hardy *et al.*, 1992)، تا خروج مایع از بستر رودخانه، و هجوم سیال به سمت بستر در مقیاس بزرگ (Hardy *et al.*, 2009)، را در بر می‌گیرد. این ساختارهای کلان آشفتگی، می‌تواند در آغاز حرکت بستر رودخانه‌ها و اصلاح شکل بستر، دارای اهمیت باشد (MacVicar and Roy, 2007; Thompson *et al.*, 1998).

تعریف ریاضی گردابه، چالش‌برانگیز است و منجر به توسعه الگوریتم‌های مختلف جهت بررسی ماهیت گردابه‌ها در جریان شده است. کاربردهای گردابه در اکوهیدرولیک، ترکیبی از روش‌های تشخیص گردابه اویلری مانند معیار Q (مبتنی بر بزرگی گردابه) و روش‌های لاگرانژی مانند روش زمان-محدود لیاپانوف (FTLE) (ردیابی مسیرهای مجزای سیال در طول زمان)، را در برمی‌گیرد (Marjoribanks *et al.*, 2016).

به‌تازگی، در پژوهش Lacey *et al.* (2012)، چهارچوبی برای مطالعه خواص آشفتگی مرتبط با محیط‌زیست در کانال‌های رودخانه، با تمرکز ویژه بر روی ماهی‌ها، پیشنهاد شده است. چهارچوب IPOS (Lacey *et al.*, 2012)، چهار دسته‌بندی برای خواص آشفتگی ارائه می‌کند؛ شدت، تناوب، جهت‌گیری، و مقیاس (جدول ۱). شدت نوسانات سرعت در راستای سه مؤلفه (u ، v و w) با محاسبه ریشه میانگین مربع نوسانات ($RMSu$ ، $RMSv$ و $RMSw$) تعیین شده و با برش و سرعت میانگین نرمال می‌شوند تا اندازه‌ای نسبی از شدت نوسانات آشفتگی به‌دست آید. در انرژی جنبشی آشفتگی، هر سه مؤلفه با هم ترکیب می‌شوند تا اندازه کلی انرژی جنبشی گردابه‌های جریان به‌دست آید، این در حالی است که تنش‌های برشی رینولدز، نیروهای اصطکاکی جریان را توصیف می‌کنند که مشخص‌کننده حرکت و انتقال رسوبات است (Davidson, 2004; Pope *et al.*, 2006; Wilkes *et al.*, 2013).

تناوب، به قابلیت پیش‌بینی جریان، و وقوع فرکانس‌های غالب در رکورد سرعت اشاره دارد. یکی از شاخص‌های ساده قابلیت پیش‌بینی، از طریق بررسی کشیدگی باقیمانده‌های آشفتگی یعنی u' ، v' و w' به‌دست می‌آید (Wilkes, 2014). با اعمال مدل‌سازی خود رگرسیون مرتبه دوم بر سری‌های زمانی سرعت با فرکانس بالا، می‌توان یک مقیاس طولی برای گردابه غالب به‌دست آورد. در این روش، سری‌ها باید شرط شبه‌تناوبی را برآورده سازند (Richards, 1979) که این شرط یک شاخص اولیه از قابلیت پیش‌بینی سری‌های زمانی است. دو روش دیگر که در شناسایی ساختار تناوبی غالب (اندازه گردابه) یا طیف ساختارهای موجود مورد استفاده قرار می‌گیرند، عبارتند از تحلیل چگالی طیفی و تحلیل موجک. در تحلیل چگالی طیفی، سیگنال سرعت با استفاده از تبدیل فوریه به فرکانس‌هایی تجزیه شده و برای به‌دست‌آوردن اطلاعات کلی در خصوص پیوند غالب (که با ضرب‌شدن در سرعت متوسط، به اندازه گردابه یا "مقیاس طولی" تبدیل شده است) مورد استفاده قرار می‌گیرد. در مقابل، در تحلیل موجک، از تبدیل موجک پیوسته (CWT) برای تجزیه هم‌زمان سری‌های زمانی به دامنه‌های زمان و فرکانس، شناسایی و استخراج سیگنال‌های متناوب در رکورد، و نحوه تغییر آن‌ها در طول زمان، استفاده می‌گردد (Torrence and Compo, 1998). استفاده از روش دوم برای CFS که متناوب بوده و در طول زمان و مکان تکامل می‌یابد، مناسب‌تر است (Lacey *et al.*, 2012).

یک شاخص اولیه برای جهت‌گیری جریان از میزان چولگی مؤلفه‌های u' ، v' و w' به دست می‌آید که نشان‌دهنده شکل توزیع فرکانس اندازه نوسانات آشفتگی است. باقیمانده‌های آشفتگی با چولگی مثبت، نشان‌دهنده نوسانات کم با اندازه زیاد است که شرایط مطلوبی را برای انتقال رسوب ایجاد می‌کند (Bagnold, 1966; Leeder, 1983). تنش‌های برشی رینولدز $\overline{\rho u'v'}$ ، $\overline{\rho v'w'}$ و $\overline{\rho u'w'}$ نشان‌دهنده شار آشفتگی مومنتوم بوده و بر شنای ماهی‌ها، و توانایی حفظ موقعیت‌شان درون جریان تأثیر دارد، اما به‌ندرت در آزمایش‌های اکوهیدرولیک گزارش شده است (Lacey et al., 2012). تحلیل‌های پیچیده‌تر می‌توانند سرعت لحظه‌ای دوبعدی اندازه‌گیری‌شده (u' و w') را براساس تحلیل ربع دایره و با استفاده از علامت نسبی جفت‌های u' و w' ، به یکی از چهار "رویداد" آشفتگی اختصاص دهد (Lu and Willmarth, 1973). برای تشخیص قوی‌ترین رویدادها از رویدادهایی که سهم ناچیزی در تنش رینولدز دارند، از یک آستانه یا «حفره» که معمولاً دو برابر انحراف استاندارد $u'w'$ است، استفاده می‌شود (Clifford and French, 1993; Harvey and Clifford, 2009; Wilkes et al., 2013). سپس، مدت زمان تجمعی و سهم تنش از هر نوع رویداد آشفتگی موردبررسی قرار می‌گیرد.

معمولاً ابعاد (مقیاس) گردابه با طول و قطر نمایش داده می‌شوند که بیانگر میزان گسترش و حداکثر دوران جریان چرخشی هستند. مقیاس طول گردابی انتگرالی از ضرب سرعت میانگین (U) در مقیاس زمانی انتگرالی (t) به دست می‌آید که مقیاس زمانی انتگرالی پربودی است که سرعت در آن، دارای خودهمبستگی است (Lacey and Roy, 2008). مطابق نظریه "آشفتگی منجمد" تیلور، دنباله‌ای از تغییرات سرعت در یک مکان ثابت می‌تواند نشان‌دهنده حرکت یک الگوی تغییرناپذیر آشفتگی باشد که از آن مکان عبور می‌کند (Taylor, 1938). روش‌های مدل‌سازی خود رگرسیون ارائه‌شده، روش‌هایی برای محاسبه مقیاس زمانی انتگرالی (پربود) در ساختار گردابی غالب در سری‌های زمانی هستند (Clifford and French, 1993) که از مقایسه آن با اندازه آبیان (به‌عنوان مثال طول ماهی) نسبت مومنتوم به دست می‌آید (Cotel and Webb, 2015; Lacey et al., 2012) که از نظر اکولوژیکی معنی‌دار است. قطر گردابه، برابر حداکثر اندازه ساختار جریان چرخشی است که اغلب به‌طور مستقیم از طریق مشاهدات آزمایشگاهی قابل اندازه‌گیری است.

۱.۱.۲. تأثیر آبیان بر آشفتگی

علاوه بر بررسی تأثیر جریان آشفته بر آبیان (گیاهان، بی‌مهرگان، ماهی‌ها)، بررسی تأثیر آبیان بر میدان جریان نیز دارای اهمیت است (شکل ۲). از میان تمامی اندرکنش‌های ارائه‌شده، مهم‌ترین اندرکنش در راستای پژوهش حاضر، تأثیر خواص بیومکانیکی پوشش گیاهی آبی بر آشفتگی است (شکل ۲). در مقیاس ساقه‌ها و شاخه‌ها، گیاهان آبی با تولید ویک، انرژی جنبشی متوسط را به انرژی جنبشی آشفتگی تبدیل می‌کنند که ماهیت و سهم آن‌ها در آشفتگی به مورفولوژی و انعطاف‌پذیری ساقه‌ها بستگی دارد (Nepf, 1999). برای گیاهان منعطف و دارای برگ‌های کشیده (مانند گیاه آبی گالی گونه emersum)، توسعه ویک در اطراف ساقه‌های مجزا به‌طور موضعی در ناحیه نزدیک به بستر مهم است، اما مکانیسم غالب تولید آشفتگی مربوط به ریزش گردابه، در ناحیه برشی در سطوح برگ می‌باشد (Naden et al., 2006; Nikora, 2010). ماکروفیت‌ها با شکستن گردابه‌های بزرگ‌تر به گردابه‌های کوچک‌تر باعث "تغییر مقیاس" آشفتگی می‌شوند (Madsen et al., 2001) که انعکاس آن در پایه‌های گیاهان موجود در گردابه‌های کوچک‌تر دیده می‌شود (Nepf, 1999). شدت آشفتگی در پوشش گیاهی پراکنده افزایش می‌یابد، اما با افزایش تراکم و کاهش میانگین جریان در میان پوشش‌های گیاهی، شدت آشفتگی کاهش می‌یابد (Green, 2005; Nepf, 1999) که این ارتباط، از مورفولوژی گیاه نیز به دست می‌آید. هم‌چنین، برگ‌های بلندتر و انعطاف‌پذیرتر قادر به ایجاد شدت آشفتگی بیش‌تری هستند (Sand-Jensen and Pedersen, 1999). ارتعاش و به لرزش درآمدن ساقه‌ها نیز از منابع دیگر تولید آشفتگی به حساب می‌آیند (Nikora, 2010).

Table 1. IPOS (Intensity, Periodicity, Orientation, and Scale) categories identified by Lacey *et al.* (81) with example variables and descriptions

	Parameter	Description
Intensity	Turbulence intensity (absolute)	Root mean square of the turbulent fluctuations (Reynolds normal stresses in the u, v, and w dimension) $RMS_x = \sqrt{\frac{1}{N}(x_1^2 + x_2^2 + \dots + x_N^2)}$
	Turbulence intensity (relative)	Normalized (by shear or mean velocity) values for u, v, and w: $TI_x = \frac{\sigma_x}{U}$
	Turbulent kinetic energy	Combines RMSu, RMSv, and RMSw: $TKE = \frac{1}{2}\rho(RMS_u^2 + RMS_v^2 + RMS_w^2)$
	Reynolds shear stresses	Represent the turbulent flux of momentum—may affect organisms but rarely reported $\tau_{uv} = \rho u'v'\tau_{uv} = \overline{\rho u'v'}\tau_{uv} = \overline{\rho v'w'}$
	Vorticity	$\omega = 2\Omega$ Where Ω represents the angular velocity or rotational speed of the fluid.
Periodicity	Predictability	Kurtosis* of the turbulent residuals (u' , v' , and w') used as an initial indicator $K = \frac{\sum_{i=1}^N \left(\frac{x_i - \bar{x}}{\sigma}\right)^4}{N}$ AR(2) models applied and the condition for pseudo-periodicity* derived.70 Average eddy frequency/period (the integral time scale) can be derived (where R(t) is the normalized autocorrelation function and t is the time lag): $ITS_{u,v,w} = \int_0^\infty R(t)dt$
	Energy spectra	Fourier transform (spectral density/wavenumber spectra) traditionally applied to qualitatively explore the shape of spectra and derive the kinetic energy maximum. Involves conversion of the frequency spectra into wave number spectra (k) using the frequency domain (f_n): $E(k) = \frac{U}{2\pi} S(f_n)$ $k = \frac{2\pi f_n}{U}$ Wavelet analysis—a more sophisticated method, better for intermittent/evolving flow structures (dominant frequency)
Orientation	Skewnes*	An initial, basic indicator of flow 'orientation' can be derived from the skewness of the u_0 , v_0 , and w_0 components,83 describing the asymmetry of the frequency distribution of the magnitude of turbulent fluctuations on each of the three planes: $K = \frac{\sum_{i=1}^N \left(\frac{x_i - \bar{x}}{\sigma}\right)^4}{N}$
	Event structure*	Duration and/or contribution to stress of each type of 'event': Q1 ($u_0 > 0$, $w_0 > 0$; outward interactions), Q2 ($u_0 < 0$, $w_0 > 0$; ejections of fluid away from the bed), Q3 ($u_0 < 0$, $w_0 < 0$; inward interactions), and Q4 ($u_0 > 0$, $w_0 < 0$; inrushes of fluid toward the bed).
	Direction dominant fluctuation	Axis of eddy rotation—angle between the direction of dominant fluctuation and the streamwise direction.
	Reynolds shear stresses	Indicating the magnitude of stress on the different planes ($u'v'$, $u'w'$ and $v'w'$)—see above.
Scale	Eddy length scale	Average eddy length or spatial extent of the region of correlation ('wedges' of fluid). The integral time scale (see above) can be converted to an average eddy length (L) using mean velocity (U) and t (time): $L = Ut$
	Fish momentum: wedge momentum ratio	Derived from the length scale (Lu) and fish length (Lf) and convection velocity of the wedge (ue) and fish velocity (uf): $\frac{\text{Wedge momentum}}{\text{Fish momentum}} = \frac{L_u \cdot u_e}{L_f \cdot u_f}$
	Eddy diameter	Spatial extent of rotating fluid, often directly measured using PIV techniques in the laboratory.

* denotes additional variables to those directly identified in (Lacey *et al.*, 2012) Where $x = u, v,$ and w components, N are the number of observations and ρ is the water density, u' , v' , and w' are the turbulent residuals, and $U, V,$ and W the mean velocities along the three components.

در مقیاس کانوپی، اندرکنش بین پایه گیاه و جریان، منجر به ایجاد یک لایه برشی شده و نواحی مختلف آشفته‌گی در آن قابل شناسایی است. Nepf and Vivoni (2000) در مطالعات خود، بین رژیم‌های مستغرق و بیرون‌زده از آب تمایز قائل شده‌اند. رژیم‌های مستغرق متشکل از دو ناحیه تبادل قائم و ناحیه تبادل طولی هستند، درحالی‌که در رژیم‌های بیرون‌زدن از آب فقط ناحیه تبادل طولی وجود دارد. ناحیه تبادل قائم پوشیده از آب است که توسط برش ایجاد می‌شود و در ناحیه تبادل طولی فرایند انتقال غالب است. Siniscalchi *et al.* (2012) در آزمایش‌های خود بر روی گیاهان مصنوعی در فلوم جریان، سه ناحیه شناسایی کرده‌اند. در بالادست و در سطح کانوپی، نواحی دارای انرژی آشفته‌گی زیاد وجود دارند که در اثر برش ایجاد شده‌اند (شدت آشفته‌گی زیاد مربوط به برخی گونه‌ها می‌باشد) (Green, 2005; Sand-Jensen and Pedersen, 1999)، مناطق همگن طولی دارای تنش‌های منفی رینولدز (در صفحه قائم یا در راستای جریان) هستند و یک ناحیه خروجی در شرایط تبدیل به کانال روباز وجود دارد. مورفولوژی‌های مختلف گیاهی نیز می‌تواند با مکانیسم‌های مختلف منجر به تولید آشفته‌گی شود. پوشش گیاهی صلب و بیرون‌زده از آب، جریان را در صفحه افقی منحرف می‌کند و منجر به ایجاد الگوهای متناوبی از گردابه‌های پیچشی و کاهش شدت آشفته‌گی در پایین‌دست می‌شود که خیابان گردابه‌ای ون کارمن نام دارد. این در حالی است که پوشش گیاهی مستغرق انعطاف‌پذیر، در اثر جریان قائم قوی، لایه‌های برشی قائم و افقی در پایین‌دست ایجاد می‌کند (Ortiz *et al.*, 2013). در نتیجه، تغییرات ناشی از پوشش گیاهی بر روی آشفته‌گی بسته به مورفولوژی، تراکم گیاهان و شرایط محیطی، می‌تواند منجر به تغییر فرایندهای انتقال رسوب شود و انباشته‌شدن رسوبات ریزدانه را افزایش یا کاهش دهد. جانوران نیز میدان جریان را تغییر می‌دهند که این اثرات در مقایسه با سایر المان‌های زبری، کم‌تر موردتوجه هستند (Cotel and Webb, 2015). جداشدگی جریان در اطراف بی‌مهرگان موج‌زی گرادیان‌های سرعت و نیروهای برآ و پسا را تغییر می‌دهد (Statzner *et al.*, 1988). هم‌چنین، بی‌مهرگانی که از مواد معلق در آب تغذیه می‌کنند، ممکن است به‌طور فعال و یا غیرفعال میدان جریان را تغییر دهند. به‌عنوان مثال، آشفته‌گی در اطراف زائده‌های تغذیه لارو مگس سیاه، نرخ حرکت ذرات و مسیرهای جریان گرفته‌شده توسط ذرات را تغییر داده (Hart *et al.*, 1996) و تغییرات موضعی قابل‌توجهی در میدان جریان ایجاد می‌کند (Thomson *et al.*, 2004)، درحالی‌که لارو مگس می‌تواند گردابه‌هایی تولید کند که منجر به افزایش فرصت‌های تغذیه‌ای شود (شکل ۲). ماهی‌ها در اثر اندرکنش باله‌های خود به هنگام شنا، گردابه‌هایی را تولید و استفاده می‌کنند و از این طریق می‌توانند جریان‌های زیستی تولید کنند (Liao, 2007). در ادامه، روش‌های اصلی به‌کارگیری این اندرکنش‌ها توسط جانوران، بیش‌تر موردبررسی قرار گرفته است.

۲.۱.۲. استفاده از خواص جریان آشفته

جریان آشفته باعث تسهیل دسترسی به غذا، حفظ سطح اکسیژن کافی، حذف مواد زائد، جابه‌جایی و فرار از شکارچیان می‌شود (Ferner and Weissburg, 2005; Hart *et al.*, 1996; Vogel, 1994; Webb *et al.*, 2010). بدین ترتیب، آشفته‌گی در بسیاری از شرایط به‌جای محدودیت، مزیت به‌حساب می‌آید (Liao, 2007) و می‌تواند یکی از ملاحظات مهم کاهش بیماری‌ها در محیط آبی باشد (Liao and Cotel, 2013). براساس تعدادی از مطالعات، برخی از شرایط هیدرودینامیکی که انتظار می‌رود عامل محدودکننده باشند، برای برخی ارگانسیم‌ها مفید هستند. به‌عنوان مثال، در محیط‌های دریایی، صدف‌های حلزونی سیگنال‌های مربوط به بوی طعمه را در جریان‌های دارای شدت آشفته‌گی زیاد تشخیص می‌دهند، این در حالی است که سخت‌پوستان بزرگ‌تر در جریان‌های با شدت آشفته‌گی زیاد سردرگم می‌شوند (Ferner and Weissburg, 2005). در رودخانه‌ها، سرعت متوسط بیش‌تر می‌تواند به‌طور غیرمستقیم منجر به کاهش دریافت در برخی از گونه‌های بی‌مهرگان شود که نشان‌دهنده افزایش راندمان تغذیه و کاهش فشار شکار در این مناطق

است (Fenoglio *et al.*, 2013). در گیاهان آبزی، آشفتگی مطلوب برای هر گیاه براساس مورفولوژی آن متفاوت است (Tonetto *et al.*, 2015; Tonetto *et al.*, 2014)، اما جریان‌های آشفته با تسهیل تبادل املاح بین گیاهان و آب اطراف آن‌ها به رشدشان کمک کرده و باعث تحریک جوامع اپی‌فیتیک باکتری‌ها، ریزجلبک‌ها و بی‌مهرگان روی سطوح گیاهان می‌شود (Sand-Jensen and Pedersen, 1999).

تعدادی از جانوران یا گردابه می‌سازند و یا گردابه‌های تولیدشده توسط سایر المان‌های زبری را برای حرکت و تغذیه مورد استفاده قرار می‌دهند (Vogel, 1994). بزرگ‌ترین بخش مطالعات صورت گرفته جهت بررسی اهمیت آشفتگی برای آبزیان، بر روی ماهی‌ها متمرکز است که ترکیبی از فاکتورها مانند کاربردی بودن اثرات اندازه‌گیری برای جانوران بزرگ‌تر، جمعیت گسترده‌تر و منافع تجاری، در آن‌ها دخیل است. ماهی‌های رئوفیل طی دو مکانیسم اصلی از جریان آشفته بهره می‌برند (Liao, 2007): در مکانیسم اول، ماهی‌های منفرد از نواحی کم‌سرعت در پشت اجسام غیر باریک استوانه‌ای یا کروی به‌عنوان پناهگاه جریان و برای حباب‌زایی (برای حفظ موقعیت خود در میدان جریان؛ شکل ۲) استفاده می‌کنند.

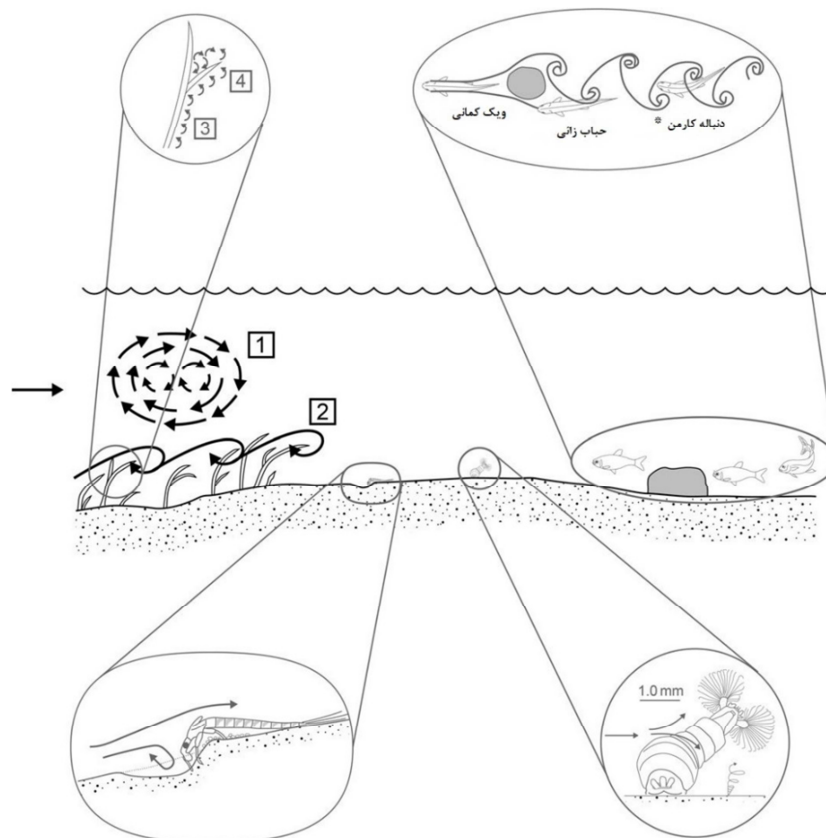


Figure 2. Interactions between flow hydrodynamics and aquatic organisms at small scales in rivers. For aquatic plants, this includes: (1) depth-scaled shear generated turbulence formed above vegetation, (2) canopy scale shear generated turbulence, (3) turbulence generated at the scale of individual stems and (4) at the scale of individual leaves. (Reprinted with permission from Ref 5. Copyright 2010 John Wiley and Sons). Additional sources of turbulence associated with plant motion occurring at scales intermediate between the stem and canopy are not shown here. Also showing exploitation of turbulent flow structures for feeding by mayfly larvae (Reprinted with permission from Ref 97. Copyright 1990 John Wiley and Sons) and blackfly larvae (Reprinted with permission from Ref 63. Copyright 1986 NRC Research Press), and by trout (Reprinted with permission from Ref 28. Copyright 2007. The Royal Society) for efficient locomotion in the vicinity of bluff bodies—*denotes that Kármán gaiting in trout has been observed in laboratory flumes with D-shaped cylinders rather than natural river channels. Main diagram not to scale.

برخی از گونه‌ها با کج کردن بدن خود با زوایای خاص در جهت متوسط جریان، برای دوره‌های زمانی کوتاه می‌توانند موقعیت خود را در نزدیکی موانع جریان، بدون نیاز به حرکت اصلاحی بدن یا باله‌ها حفظ کنند و در نتیجه انرژی مصرفی را به حداقل می‌رسانند (Przybilla *et al.*, 2010). به‌طور مشابه، حرکت باله‌ها باعث ایجاد ویک‌های جانبی می‌شود که به ماهی‌ها در حفظ تعادل کمک کرده و از چرخیدن آن‌ها جلوگیری می‌کند (Gazzola *et al.*, 2014; Maia and Wilga, 2016). در مکانیسم دوم، از گردابه‌های گسسته، انرژی گرفته می‌شود که به اندرکنش بین اندازه گردابه و طول بدن ماهی بستگی دارد (Liao, 2007). الگوهای قابل پیش‌بینی ریزش گردابه (که خلاف جهت ویک‌های نامنظم است) (Lacey *et al.*, 2012) مانند الگوی تکرارشونده گردابه‌ها در خیابان گردابه‌ای ون کارمن که ممکن است در پایین دست جدایش جریان در اطراف استوانه‌های ثابت D شکل در فلوم‌های آزمایشگاهی ایجاد شود، در این مکانیسم مهم هستند (شکل ۲). تحت این شرایط، گردابه‌ها با فرکانس مشخصی تولید شده و به طیف نسبتاً کوچکی محدود هستند و به ماهی‌ها امکان شناسایی و پیش‌بینی ساختارهای جریان را می‌دهند (Liao and Cotel, 2013). آزمایش‌های انجام شده بر روی ماهی قزل‌آلا نشان داده است که این ماهی با انجام حرکت جدید (دنباله کارمن) خود را برای حرکت مارپیچی بین الگوهای گردابه‌ای قابل پیش‌بینی تولید شده از اجسام بالادست، هماهنگ می‌کند (Liao *et al.*, 2003). در این نوع حرکت، ماهی‌ها به فرکانس ضربان - دم کم‌تری نیاز داشته و فقط از عضلات محوری جلویی استفاده می‌کنند که با کاهش میزان انرژی مصرفی در حین حرکت همراه است (Liao *et al.*, 2003). آشفستگی تولید شده از حرکات سایر ماهی‌ها نیز به روش مشابه مورد استفاده قرار می‌گیرد (Liao, 2007).

مطالعه نحوه بهره‌مندی بی‌مهرگان از ساختارهای جریان آشفته، به دلیل سختی اندازه‌گیری جریان در مقیاس ارگان‌های منفرد (Blanckaert *et al.*, 2013) و در ناحیه نزدیک به بستر که محل سکونت ارگان‌های کفزی است (Hart *et al.*, 1996)، امری چالش‌برانگیز است. با این وجود، نمونه‌های زیادی از اهمیت خواص جریان آشفته برای بی‌مهرگان در دسترس است که تغذیه‌کننده‌های غیرفعال یکی از این نمونه‌ها هستند که تأمین مواد غذایی توسط آن‌ها به خواص هیدرودینامیکی جریان وابسته است. بنابراین اندرکنش میان زائده‌های تغذیه و سایر اعضای بدن و همچنین، اندرکنش میان جریان و انتقال مواد معلق بسیار مهم است (Hart and Fineli, 1999). به‌عنوان مثال، لاروهای مگس سیاه می‌توانند با چرخاندن بدن خود، بادبزن‌های مخصوص تغذیه‌شان را در نقاط مختلف میدان جریان قرار دهند (شکل ۲). این کار، امکان بهره‌مندی از جفت گردابه‌های تولید شده در اثر جریان در طول بدنشان را فراهم می‌کند، به طوری که یکی از بادبزن‌ها مواد وارد شده به گردابه را از لایه زیری گرفته و دیگری، آب را از بالای لایه مرزی فیلتر می‌کند (Chance and Craig, 1986). لاروهای مگس می‌توانند از آشفستگی جریان تولید شده توسط بدنشان، برای حفاری و تغذیه از گودال‌های بستر رودخانه استفاده کنند (Soluk and Craig, 1990). به‌عنوان مثال، گونه‌ای از مگس‌ها به نام سودیرون سانترالیس، می‌تواند با قرارگیری رو به بالادست جریان در حالت قوسی، گردابه‌های نعل اسبی پرانرژی تولید کند که باعث حفر گودال شده و طعمه‌های پنهان مانند بی‌مهرگان بینابینی را آشکار می‌سازد (Soluk and Craig, 1990) (شکل ۲). در مقابل، گونه دیگری به نام نایوی آمتروپوس، با جهت‌گیری به سمت بالادست، گودالی حفر کرده و به همراه سر، شاخک‌ها و پاهای جلویی بالآمده خود، از آن برای ایجاد گردابه استفاده می‌کنند که جریان را به سمت پایین منحرف می‌کند (Soluk and Craig, 1988). این امر، تغذیه را به دو جهت افزایش می‌دهد که عبارتند از به دام انداختن مواد درون گردابه‌های در حال چرخش و در نتیجه افزایش احتمال صید و معلق‌سازی مجدد مواد از داخل گودال‌ها. این مکانیسم‌ها می‌توانند در رودخانه‌های دارای رسوبات ریز و فاقد بسترهای سخت، فرصت تغذیه‌ای را افزایش دهند (Soluk and Craig, 1990). ارگان‌های متعدد با قرارگیری در مجاورت یا در جهت جریان می‌توانند از شرایط

هیدرودینامیکی ایجادشده به‌طور مشترک استفاده کنند، به‌عنوان مثال، با متمرکز کردن جریان نرخ تغذیه خود را افزایش می‌دهند (Chance and Craig, 1986) و یا دسته‌های ماهی با استفاده از مسیرهای ون کارمن تولیدشده توسط ماهی‌های منفرد در بالادست، میزان مصرف انرژی شنا را کاهش می‌دهند (Shaw, Munoz-Mas *et al.*, 2015; Svendsen *et al.*, 2003; 1978).

۳.۱.۲. آشفته‌گی به‌عنوان تهدیدی برای رشد و بقا

هزینه‌های انرژی و فیزیولوژیکی آشفته‌گی در مطالعات، بهتر از مزایای آن برای آبزیان ارائه شده‌اند. از نظر اثرات فیزیولوژیکی، آشفته‌گی شدید بر گیاهان آبی تأثیراتی چون آسیب‌های بافتی، افزایش هزینه تنفس در نتیجه حرکت برگ‌ها (Sand-Jensen and Pedersen, 1999) و منع فعالیت‌های متابولیک و رشد (Asaeda and Rashid, 2016) دارد. آشفته‌گی در جانوران ممکن است منجر به جابه‌جایی غیرفعال آن‌ها از زیستگاه‌ها شود. بی‌مهرگان کف‌زی (به‌عنوان مثال، ایشنا سیانیا و سوماتوکلورا فلووماکولانا) نسبت به مقادیر پیک تنش برشی در رویدادهای آشفته‌گی گسسته، حساس هستند به‌ویژه در خروج سیال از بستر (که نیروهای برآ روبه‌بالا ایجاد می‌کند)، هجوم سیال به سمت بستر (که نیروهای پسا و برآ ایجاد می‌کند) و در جاهایی که ساختارهای جریان از اندازه بدن بی‌مهرگان بزرگ‌تر هستند (Blanckaert *et al.*, 2013). در حالت‌های حدی، تنش برشی زیاد ممکن است باعث انحراف، آسیب، و یا مرگ‌ومیر ماهی‌ها شود (Deng *et al.*, 2005; Odeh *et al.*, 2002; Silva *et al.*, 2012)، اما معمولاً آشفته‌گی باعث انتقال خطی بدن (جابه‌جایی یا رانش به سمت پایین‌دست) و یا تغییر شکل می‌شود که سینماتیک را، مثلاً از طریق افزایش دامنه ضربه-دم، تغییر می‌دهد (Liao, 2007). همچنین، آشفته‌گی می‌تواند باعث تغییر روابط بین طعمه و شکارچی به طرق پیچیده شود. آشفته‌گی شدید می‌تواند به‌دلیل کاهش قابلیت پیش‌بینی موقعیت شکارچی و طعمه، دقت صید موفقیت‌آمیز را کاهش دهد (Higham *et al.*, 2015). متقابلاً، آشفته‌گی می‌تواند سیستم خطوط جانبی ماهیان را که جهت شناسایی شکارچیان از آن‌ها استفاده می‌کنند، مختل کند و از این‌رو، احتمال صید آن‌ها افزایش می‌یابد (Higham *et al.*, 2015). شایان‌ذکر است افزایش کدورت ناشی از آشفته‌گی می‌تواند به‌طور غیرمستقیم قابلیت شناسایی طعمه‌ها را کاهش دهد. هنگامی که لاروهای کادیس در معرض آشفته‌گی با شدت بالا و تنش‌های برشی زیاد قرار گیرند، ممکن است سرعت و فاصله خزیدن آن‌ها کاهش یابد (Rice *et al.*, 2008). همچنین، سایر طعمه‌های کوچک نیز در شرایط آشفته نسبت به شکارشدن آسیب‌پذیرتر می‌شوند (Havskum *et al.*, 2005; Joensuu *et al.*, 2013; Rothschild and Osborn, 1988).

تأثیر آشفته‌گی بر انرژی زیستی (مصرف، متابولیسم و رشد) ماهی‌ها و عملکرد آن‌ها در شنا، موردتوجه مطالعات زیادی قرار گرفته است و در نگاه اول، نتایج متناقضی در آن‌ها دیده می‌شود (Cotel and Webb, 2015). به‌عنوان مثال، شدت زیاد آشفته‌گی ممکن است حساسیت ماهی سوف فلوویاتیلیس را نسبت به جابه‌جایی به پایین‌دست افزایش دهد c، منجر به افزایش هزینه شنای ماهی قزل‌آلای سالمون اقیانوس اطلس شود (Enders *et al.*, 2003) و بر پایداری دینامیکی قزل‌آلای قهوه‌ای تأثیر منفی بگذارد. اما در مطالعات (Nikora *et al.*, 2003)، هیچ تأثیری از شدت آشفته‌گی بر ماهی اینانگا مشاهده نشده است. بررسی دقیق‌تر نشان می‌دهد که این تناقضات احتمالاً منعکس‌کننده تفاوت در جنبه‌های مختلف طرح پژوهش هستند که عبارتند از مکانیسم ایجاد آشفته‌گی، خواص دقیق موردبررسی، ارتباط آن‌ها با خواص فیزیولوژیکی (مثلاً مقیاس) گونه‌ها، و تأثیر پاسخ‌های رفتاری مانند سازگاری و یادگیری (Cotel and Webb, 2015; Lacey *et al.*, 2012; Maia *et al.*, 2015; Smith *et al.*, 2014). همچنین، چرخه زندگی، جنسیت و سلامت نیز ممکن است تأثیرگذار باشد. ماهی‌های آب‌نوس بزرگ و کوچک سطوح متفاوتی از سرعت متوسط و آشفته‌گی را ترجیح

می‌دهند، این در حالی است که نرها، احتمالاً به دلیل پسای ناشی از باله‌ها، نواحی با سرعت کم‌تر را انتخاب می‌کنند. ماهی‌های کوچک‌تر آلوده به انگل، پایدارترین و قابل‌پیش‌بینی‌ترین نواحی دارای شدت آشفتگی و تنش‌های رینولدز کم را انتخاب می‌کنند که نشان‌دهنده نیاز آن‌ها به جبران هزینه‌های انرژی ناشی از این آلودگی است (Hockley *et al.*, 2014).

درحالی‌که در تعدادی از مطالعات، بر روی تأثیر شدت آشفتگی یا انرژی جنبشی آشفتگی بر روی ماهی‌ها متمرکز شده‌اند، شواهد فزاینده‌ای وجود دارد که نشان می‌دهد نسبت اندازه گردابه‌ها به اندازه ماهی‌ها، یکی از عوامل کلیدی تأثیرگذار بر هزینه انرژی است (Cotel and Webb, 2015; Silva *et al.*, 2012; Webb *et al.*, 2010) (شکل ۳). معمولاً از طول ماهی برای نشان‌دادن اندازه آن استفاده می‌شود که نشان‌دهنده اهمیت سیستم خطوط جانبی و اندام‌های حسی است که از آبشش‌ها تا دم کشیده شده و برای جهت‌گیری، شکار و شنای هماهنگ دسته‌های ماهی ضروری است. Cotel and Webb (2015) در مطالعات خود به رابطه معکوس بین اندازه و فرکانس گردابه اشاره کرده و بیان کرده‌اند که بزرگ‌ترین و کوچک‌ترین گردابه‌ها ممکن است دارای اهمیت کم‌تری برای ماهی‌ها باشند، زیرا بزرگ‌ترین ساختارهای جریان مشابه آب ساکن عمل کرده و کوچک‌ترین آن‌ها، مشکلات پایداری ایجاد نمی‌کنند. گردابه‌های متوسط (بسته به نسبت اندازه آن‌ها به طول بدن ماهی) ممکن است نیاز به اصلاحاتی جهت پایداری موقعیت داشته باشند و حتی ممکن است توانایی ماهی برای پایداری را تحت تأثیر قرار دهد (Cotel and Webb, 2015). به‌عنوان مثال، Silva *et al.* (2011) بر اهمیت گردابه‌های تقریباً هم‌اندازه با هالتر ایبری بالغ تأکید کردند، درحالی‌که گردابه‌های با اندازه تقریباً دو سوم طول ماهی بر تعادل ماهی سوف تأثیر می‌گذارند که منجر به تثبیت حرکات باله، افزایش مقاومت هیدرولیکی، و کاهش سرعت شنا می‌شود (Lupandin, 2005). به‌طور مشابه Tritico and Cotel (2010) در مطالعات خود دریافته‌اند که تا زمانی‌که طول بزرگ‌ترین گردابه‌ها به ۷۶ درصد طول بدن ماهی نرسد، چالش‌های پایداری قابل تشخیص نیستند. در این شرایط، ماهی‌ها کنترل وضعیت، چرخش و انتقال به پایین‌دست در امتداد محور چرخش بزرگ‌ترین گردابه‌ها، را از دست می‌دهند (ریزش). یک کمیت مهم دیگر، طول مدت زمانی است که یک ماهی در معرض گردابه قرار می‌گیرد که به‌عنوان "دوام" یا تعداد چرخش گردابه در مدت زمانی که طول می‌کشد تا یک ماهی به اندازه طول بدن خود درون جریان حرکت کند، در نظر گرفته می‌شود (Cotel and Webb, 2015).

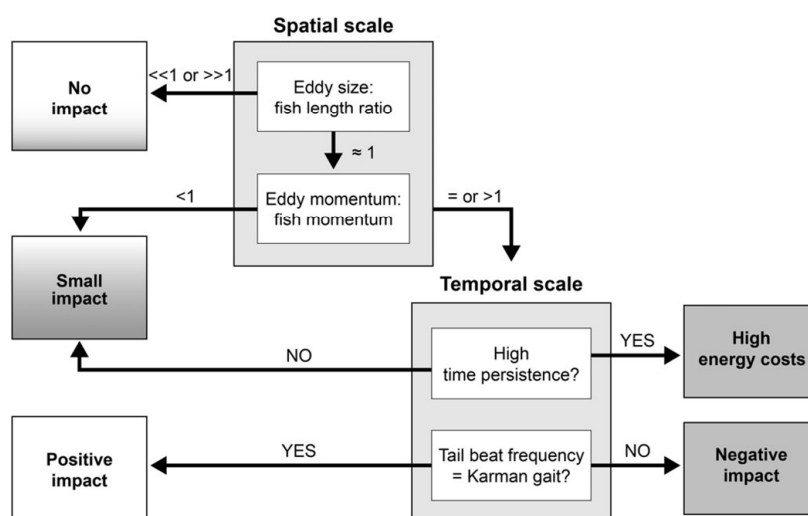


Figure 3. Decision tree illustrating how the spatial and temporal scales of eddies, combined with fish dimensions, influence the nature and magnitude of impacts on fish bioenergetics. (Reprinted with permission from Copyright 2015 Oxford University Press)

جهت‌گیری ساختارهای جریان نیز تأثیر مهمی بر رفتار و انرژی ماهی‌ها دارد (Lacey *et al.*, 2012). گردابه‌های هم‌جهت با جریان (که در آن‌ها محور چرخش در راستای جهت جریان اصلی است) باعث چرخش حول محور طولی (که پرهزینه‌ترین مورد است)، گردابه‌های افقی متقاطع با جریان باعث چرخش حول محور عرضی و گردابه‌های باعث چرخش حول محور قائم می‌شوند (Maia *et al.*, 2015). گردابه‌های هم‌جهت با جریان باعث ناپایداری موقعیت آفتاب ماهی آبشش‌دار می‌شود که باعث افزایش فرکانس ریزش و مانورهای ناپایدار شنا (مثلاً شتاب به سمت جلو و حرکات پهلوپهلوی) شده و در نتیجه، مصرف اکسیژن افزایش می‌یابد که ماهی پس از یک دوره زمانی می‌تواند با آن‌ها سازگار شوند (Maia *et al.*, 2015). مؤلفه افقی تنش‌های برشی رینولدز ($\rho u'v'$)، به‌عنوان یک پارامتر کلیدی در انتخاب زیستگاه هیدرولیکی برای هالتر ایبری کوچک‌تر شناخته شده است و می‌تواند به‌عنوان یک ملاحظه مهم در طراحی مسیر حرکت ماهی مصنوعی در نظر گرفته شود (Silva *et al.*, 2011).

۳. جهت‌گیری مطالعات آینده

مطالعه آشفته‌گی جریان در علم مکانیک سیالات غالباً به ساختار جریان منتهی می‌شود. پدیده ساختار جریان در مجاورت جداره‌های صلب و متحرک به‌ترتیب به دو صورت نقش شکل بستر در ساختار جریان و نقش ساختار جریان در تغییرات شکل بستر به‌طور گسترده مورد مطالعه قرار گرفته است (Cotel *et al.*, 2006; Legleiter *et al.*, 2007).

در شرایط سیلابی با توجه به این‌که دبی جریان رودخانه بزرگ‌تر است از دبی آستانه حرکت رسوبات است، پدیده نقش ساختار جریان در تغییرات شکل بستر بارسازی شده و تأثیر آن بر زیست‌گاه‌های رودخانه‌ای باید مورد توجه قرار گیرد، اما تاکنون مطالعات زیادی در این خصوص صورت نگرفته بلکه فقط مهندسی محیط‌زیست با اندازه‌گیری و جمع‌آوری داده‌های صحرائی و تحلیل‌های آماری به این نتیجه رسیده‌اند که سیلاب می‌تواند نقش مؤثری در احیای محیط‌زیست رودخانه داشته باشد، ولیکن تاکنون به مکانیزم عملکرد آن به لحاظ هیدرودینامیکی و ارتباط آن با زیست‌گاه‌های رودخانه‌ای کم‌تر توجه شده است. در این خصوص می‌توان آستانه‌های زیستی متعددی را فرض نمود که تحت تأثیر ساختار جریان در رودخانه ایجاد می‌شود، زیرا به‌واسطه این ساختارها بستر رودخانه دچار تغییرات در مدت زمان سیلاب شده و اندرکنش سیال و گونه‌های زیستی در حین سیلاب قابل پایش و بررسی خواهد بود (Nikora, 2010; Warhaft, 2002).

در شرایط غیرسیلابی، با توجه به این‌که در غالب اوقات دبی جریان کوچک‌تر از دبی آستانه حرکت رسوبات بستر است، تغییر شکل قابل‌ملاحظه ممکن است در بستر رودخانه پدیدار نشود. در این صورت جداره دارای تعادل استاتیکی بوده و ممکن است به مانند محیط صلب عمل کند که خود بر ساختار جریان تأثیرگذار است.

در این مقاله مروری، به اندرکنش‌های گسترده و مهم بین خواص پرکاربرد جریان و گیاهان و جانوران آبی در رودخانه‌ها پرداخته شده است که نشان‌دهنده اهمیت آشفته‌گی در ایجاد زیستگاه هیدرولیکی مناسب و بهره‌برداری آبزیان از خواص مختلف جریان برای به حداکثر رساندن تغذیه و راندمان انرژی است. با این‌حال، تعداد مطالعاتی که به‌ویژه به خواص آشفته‌گی در ارزیابی و بهبود زیستگاه رودخانه‌ای پرداخته‌اند، نسبتاً کم است (Hardy *et al.*, 2009; Harvey and Clifford, 2009; Lamarre and Roy, 2005; Legleiter *et al.*, 2007; Wilcox and Wohl, 2007; Wilkes, 2014). این امر نشان‌دهنده مشکلات اندازه‌گیری میدانی سرعت جریان با فرکانس و طول رکورد کافی جهت استخراج پارامترهای آشفته‌گی (Buffin-Belanger and Roy, 1998) و نیز در اشل‌های مختلف جریان و مقیاس‌های مرتبط با ارگانسیم‌های منفرد است (Blanckaert *et al.*, 2013; Hart *et al.*, 1996). در نتیجه، روش‌های ارزیابی

زیستگاه، به جای تمرکز بر خواص مراتب بالای جریان (Harvey and Clifford, 2009) در دبی‌های مختلف، بر شرایط مکانی و زمانی میانگین در یک نقطه معین زمانی (مثلاً سرعت متوسط، عمق جریان) متمرکز شده‌اند. روابط بین سرعت متوسط جریان و آشفتگی که شامل همبستگی‌های مثبت (Tullos and Walter, 2015; Wilkes, 2014) و منفی (Cotel *et al.*, 2006) است، پیچیده و نامشخص بوده و تحت تأثیر عواملی مانند زبری شکل بستر می‌باشد (Wilcox and Wohl, 2007). لذا متغیرهای هیدرولیکی استاندارد مانند سرعت و عمق در ارائه تخمین‌های قابل اعتماد برای خواص پیچیده‌تر جریان آشفتگی که به لحاظ اکولوژیکی ارتباط بیش‌تری دارند، قابل استفاده نیستند (Lacey *et al.*, 2012). در بررسی انتخاب زیستگاه‌ها و توزیع ماهی‌ها (Nepf, 2012) و بی‌مهرگان (Morris *et al.*, 2015)، در نظر گرفتن آشفتگی به طور مستقیم منجر به ادغام بهتر "هیدرودینامیک و اکوهیدرولیک" می‌شود (Wilkes *et al.*, 2013). در این مقاله، به پارامترهای چهارچوب IPOS پرداخته شده است که مجموعه‌ای گسترده از خواص آشفتگی را شامل شده که در برگزیده معیارهای ساده‌تر میانگین زمانی مانند انرژی جنبشی آشفتگی و تنش‌های رینولدز، تا تحلیل در دامنه زمان و فرکانس و استخراج خواص گردابه درون یک قاب مرجع لاگرانژی است. افزایش پیچیدگی توصیفگرهای آشفتگی با افزایش نیازهای تحلیلی مرتبط بوده و مجموعه‌ای از معیارهای مناسب برای یک مطالعه خاص به پرسش‌های مطرح شده بستگی دارد. امید است که پیشرفت در جمع‌آوری داده‌ها، کدهای عددی و سخت‌افزار رایانه‌ای (Tonina and Jorde, 2013)، منجر به تسهیل ارزیابی و احیای رودخانه و گسترش علم رودخانه شود.

وجود امکانات آزمایشگاهی با مشخصات فنی بالا، فرصت‌های مهمی را برای انجام آزمایش‌های کنترل شده در این زمینه فراهم می‌کند. علاوه بر انجام مطالعات کمی، انجام مطالعات مشاهداتی کیفی نیز ضروری است که می‌تواند منجر به فهم بیشتر رفتار و پاسخ‌های ارگانسیم‌ها شود. همچنین، توسعه بیش‌تر مطالعات میدانی با وجود چالش‌های ذاتی آن، بسیار ضروری است. در دسترس بودن حس‌گرهای قدرتمندی که کم‌ترین تداخل را با میدان جریان داشته باشند، در این زمینه بسیار کمک‌کننده است و توسعه پیوسته روش‌های PIV در استفاده گسترده در تحقیقات میدانی، نشان‌دهنده یک تغییر بالقوه است. در چنین روش‌هایی، امکان ثبت مستقیم خواص مکانی-زمانی در حال تکامل CFS در یک مکان واحد (برخلاف محاسبه آن‌ها از روی داده‌های سری زمانی که در یک مکان واحد امکان‌پذیر نیست)، وجود دارد. فیلم‌برداری زیر آب، یک روش کم‌هزینه برای پژوهش‌های مشاهده‌ای در شرایط میدانی است که با فناوری تلفن‌های هوشمند (Perks, 2017) می‌توان آن را بهبود بخشید، اما به دلیل ناتوانی بسیاری از نرم‌افزارها در ردیابی خودکار حرکت و فیلترکردن تداخل منابع محیطی، استخراج حرکت و رفتار ارگانسیم‌ها از این روش، مشکل است. مدل‌سازی عددی می‌تواند جزئیات حرکت آشفتگی و تأثیر کلی آن بر جریان متوسط را شبیه‌سازی کند. با این که DNS دقیق‌ترین توصیف را از آشفتگی ارائه می‌دهد، کاربرد وسیع‌تر آن نیازمند پیشرفت‌های اساسی در زمینه محاسبات است. در بسیاری از موارد، روش‌های LES یا روش ترکیبی LES-RANS با دستیابی به دقت LES و سرعت پردازش RANS (Argyropoulos and Markatos, 2015)، می‌تواند جایگزین خوبی برای روش DNS باشد. استفاده گسترده از روش‌های مدل‌سازی سه‌بعدی دقیق‌تر در اکوهیدرولیک، به درک عمیق‌تر ارتباط بین آشفتگی و زیستگاه آبی در مقیاس‌های کوچک وابسته است تا با استفاده از مجموعه داده‌های ارائه‌شده، امکان دستیابی به ابعاد واقعی فراهم شود (Tonina and Jorde, 2013). امیدواریم این مقاله با ارائه مروری کلی بر وضعیت فعلی پیشرفت علمی در زمینه اندرکنش بین هیدرودینامیک و آبیاری در رودخانه‌ها، به توسعه و پیشرفت این علم کمک کند.

۴. تعارض منافع

هیچ‌گونه تعارض منافع توسط نویسندگان وجود ندارد.

۵. منابع

- Adrian, R. J. (2005). Twenty years of particle image velocimetry. *Exp Fluids*, 39, 159-169.
- Adrian, R. J. (2007). Hairpin vortex organization in wall turbulence. *Phys Fluids*, 19(041301).
- Argyropoulos, C. D., & Markatos, N. C. (2015). Recent advances on the numerical modelling of turbulent flows. *App Math Model*, 39, 693-732.
- Asaeda, T., & Rashid, M. (2016). Effects of turbulence motion on the growth and physiology of aquatic plants. *Limnologica*. <https://doi.org/10.1016/j.limnol.2016.05.001>.
- Bagnold, R. A. (1966). An approach to the sediment transport problem from general physics. *US Geological Survey Professional Paper*, 422.
- Best, J., Buffin-Bélanger, T., Kirkbride, A., & Reid, I. (2001). Visualization of coherent flow structures associated with particle clusters: temporal and spatial characterization revealed using ultrasonic Doppler velocity profiling. In *Gravel-Bed Rivers 2000*, NZ Hydrological Society.
- Blanckaert, K., Garcia, X. F., Ricardo, A. M., Chen, Q., & Pusch, M. (2013). The role of turbulence in the hydraulic environment of benthic invertebrates. *Ecohydrology*, 6, 700-712.
- Bradbrook, K., Biron, P., Lane, S., Richards, K., & Roy, A. (1998). Investigation of controls on secondary circulation in a simple confluence geometry using a three-dimensional numerical model. *Hydrol Process*, 12, 1371-1396.
- Bradbrook, K. F., Lane, S. N., Richards, K. S., Biron, P. M., & Roy, A. G. (2000). Large eddy simulation of periodic flow characteristics at river channel confluences. *Journal of Hydraulic Research*, 38, 207-215.
- Brevis, W., Garcia-Villalba, M., & Nino, Y. (2014). Experimental and large Eddy simulation study of the flow developed by a sequence of lateral obstacles. *Environ Fluid Mech*, 14, 873-893.
- Buffin-Belanger, T., & Roy, A. G. (1998). Effects of a pebble cluster on the turbulent structure of a depth-limited flow in a gravel-bed river. *Geomorphology*, 25, 249-267.
- Chance, M., & Craig, D. (1986). Hydrodynamics and behaviour of Simuliidae larvae (Diptera). *Can J Zool*, 64, 1295-1309.
- Chanson, H. (2008, 2008). *Acoustic Doppler velocimetry (ADV) in the field and in laboratory: practical experiences* International Meeting on Measurements and Hydraulics of Sewers IMMHS'08, Summer School GEMCEA/LCPC,
- Clifford, N., & French, J. (1993). *Monitoring and modelling turbulent flows: historical and contemporary perspectives* (N. J. Clifford, H. French, Jr., & J, Eds.). John Wiley and.
- Clifford, N., Robert, A., & Richards, K. (1992). Estimation of flow resistance in gravel bedded rivers: a physical explanation of the multiplier of roughness length. *Earth Surf Process Landf*, 17, 111-126.
- Clifford, N. J., JR., F., & French, H. J. (1993). *Turbulence: Perspectives on Flow and Sediment Transport*. John Wiley and Sons.
- Constantinescu, G., Miyawaki, S., Rhoads, B., Sukhodolov, A., & Kirkil, G. (2011). Structure of turbulent flow at a river confluence with momentum and velocity ratios close to 1: insight provided by an eddyresolving numerical simulation. *Water Resour Res*, 47 05507.
- Cotel, A., & Webb, P. (2015). *Living in a turbulent world-impacts on fish habitat choices and swimming*. *Integr Comp Biol* 2015 (Vol. 55). Oxford University Press Inc Journals Department.
- Cotel, A. J., Webb, P. W., & Tritico, H. (2006). Do brown trout choose locations with reduced turbulence? *Trans Am Fish Soc*, 135, 610-619.

- Creutin, J., Muste, M., Bradley, A., Kim, S., & Kruger, A. (2003). River gauging using PIV techniques: a proof of concept experiment on the Iowa River. *J Hydrol*, 277, 182-194.
- Davidson, P. (2004). *Turbulence: An Introduction for Scientists and Engineers*. Oxford University Press.
- Deng, Z., Guensch, G. R., McKinstry, C. A., Mueller, R. P., Dauble, D. D., & Richmond, M. C. (2005). Evaluation of fish-injury mechanisms during exposure to turbulent shear flow. *Can J Fish Aquat Sci*, 62, 1513-1522.
- Duc, B. M., Wenka, T., & Rodi, W. (2004). Numerical modeling of bed deformation in laboratory channels. *J Hydraul Eng*, 130, 894-904.
- Enders, E. C., Boisclair, D., & Roy, A. G. (2003). The effect of turbulence on the cost of swimming for juvenile Atlantic salmon (*Salmo salar*). *Can J Fish Aquat Sci*, 60, 1149-1160.
- Farge, M. (1992). Wavelet transforms and their applications to turbulence. *Annu Rev Fluid Mech*, 24, 395-458.
- Fenoglio, S., Boano, F., Bo, T., Revelli, R., & Ridolfi, L. (2013). The impacts of increasing current velocity on the drift of *Simulium monticola* (Diptera: Simuliidae): a laboratory approach. *Ital J Zool*, 80, 443-448.
- Ferguson, R., Kirkbride, A., & Roy, A. (1996). *Markov analysis of velocity fluctuations in gravel-bed rivers* (P. Ashworth, S. J. Bennett, J. L. Best, and S. McLelland, Eds.). John Wiley and Sons.
- Ferner, M. C., & Weissburg, M. J. (2005). Slow-moving predatory gastropods track prey odors in fast and turbulent flow. *J Exp Biol*, 208, 809-819.
- Fox, J., & Patrick, A. (2008). Large-scale eddies measured with large scale particle image velocimetry. *Flow Meas Instrum*, 19, 283-291.
- Garcia, C. M., Cantero, M. I., Nino, Y., & Garcia, M. H. (2005). Turbulence measurements with acoustic Doppler velocimeters. *J Hydraul Eng*, 131, 1062-1073.
- Gazzola, M., Argentina, M., & Mahadevan, L. (2014). Scaling macroscopic aquatic locomotion. *Nat Phys*, 10, 758-761.
- Goring, D. G., & Nikora, V. I. (2002). Despiking acoustic Doppler velocimeter data. *J Hydraul Eng*, 128, 117-126.
- Green, J. C. (2005). Velocity and turbulence distribution around lotic macrophytes. *Aquat Ecol*, 39, 01-10.
- Hardy, R. J., Best, J. L., Lane, S. N., & Carbonneau, P. E. (2009). Coherent flow structures in a depth-limited flow over a gravel surface: the role of near-bed turbulence and influence of Reynolds number. *J Geophys Res Earth*, 114:F01003.
- Hardy, R. J., Lane, S. N., Ferguson, R. I., & Parsons, D. R. (2007). Emergence of coherent flow structures over a gravel surface: a numerical experiment. *Water Resour Res*, 43, 03422.
- Hart, D. D., Clark, B. D., & Jasentuliyana, A. (1996). Fine-scale field measurement of benthic flow environments inhabited by stream invertebrates. *Limnol Oceanogr*, 41, 297-308.
- Hart, D. D., & Fineli, C. M. (1999). Physical-biological coupling in streams: the pervasive effects of flow on benthic organisms. *Annu Rev Ecol Syst*, 30, 363-395.
- Harvey, G. L., & Clifford, N. J. (2009). Microscale hydrodynamics and coherent flow structures in rivers: implications for the characterization of physical habitat. *River Res Appl*, 25, 160-180.
- Havskum, H., Hansen, P. J., & Berdlet, E. (2005). Effect of turbulence on sedimentation and net population growth of the dinoflagellate *Ceratium tripos* and interactions with its predator. *Fragilidium subglobosum*. *Limnol Oceanogr*, 50, 1543-1551.
- Higham, T. E., Stewart, W. J., & Wainwright, P. C. (2015). Turbulence, temperature, and turbidity: the ecomechanics of predator-prey interactions in fishes. *Integr Comp Biol*, 55, 6-20.
- Hockley, F. A., Wilson, C., Brew, A., & Cable, J. (2014). Fish responses to flow velocity and turbulence in relation to size, sex and parasite load. *J R Soc Interface*, 11(20130814).
- Jimenez, J. (2011). Cascades in wall-bounded turbulence. *Annu Rev Fluid Mech*, 44, 27-45.

- Joensuu, L., Pekcan-Hekim, Z., Hellen, N., & Horpila, J. (2013). Turbulence disturbs vertical refuge use by *Chaoborus flavicans* larvae and increases their horizontal dispersion. *Freshw Biol*, 58, 1997-2006.
- Johnson, M. F., E, T. R., Dijkstra, J. T., Paul, M., Penning, W. E., Rice, S. P., Rice, S. P., & McLelland, S. (2014). *Using surrogates, including scaling issues, in laboratory flumes and basins*. CRC Press.
- Lacey, R. W. J., Neary, V. S., Liao, J. C., Enders, E. C., & Tritico, H. M. (2012). The IPOS Framework: linking fish swimming performance in altered flows from laboratory experiments to rivers. *River Res Appl*, 28, 429-443.
- Lacey, R. W. J., & Roy, A. G. (2008). Fine-scale characterization of the turbulent shear layer of an instream pebble cluster. *J Hydraul Eng*, 134, 925-936.
- Lamarre, H., & Roy, A. G. (2005). Reach scale variability of turbulent flow characteristics in a gravel-bed river. *Geomorphology*, 68, 95-113.
- Lane, S., Biron, P., Bradbrook, K., Butler, J., Chandler, J., Crowell, M., McLelland, S., Richards, K., & Roy, A. (1998). Three dimensional measurement of river channel flow processes using acoustic Doppler velocimetry. *Earth Surf Process Landf*, 23, 1247-1267.
- Lane, S., Bradbrook, K., Richards, K., Biron, P., & Roy, A. (1999). The application of computational fluid dynamics to natural river channels: three-dimensional versus two dimensional approaches. *Geomorphology*, 29, 1-20.
- Leeder, M. R. (1983). On the dynamics of sediment suspension by residual Reynolds stresses—confirmation of Bagnold's theory. *Sedimentology*, 40, 485-491.
- Legleiter, C. J., Phelps, T. L., & Wohl, E. E. (2007). Geostatistical analysis of the effects of stage and roughness on reachscale spatial patterns of velocity and turbulence intensity. *Geomorphology*, 83, 322-345.
- Li, Y., Wang, Y., Anim, D. O., Tang, C., Du, W., Ni, L., Yu, Z., & Acharya, K. (2014). Flow characteristics in different densities of submerged flexible vegetation from an open-channel flume study of artificial plants. *Geomorphology*, 204, 314-324.
- Liao, J. C. (2007). A review of fish swimming mechanics and behaviour in altered flows. *Philos Trans R Soc Lond B Biol Sci*, 362, 1973-1993.
- Liao, J. C., Beal, D. N., Lauder, G. V., & Triantafyllou, M. S. (2003). Fish exploiting vortices decrease muscle activity. *Science*, 302, 1566-1569.
- Liao, J. C., & Cotel, A. (2013). *Effects of turbulence on fish swimming in aquaculture* (A. P. Palstra and J. V. Planas, Eds.). Springer.
- Lu, S., & Willmarth, W. (1973). Measurements of the structure of the Reynolds stress in a turbulent boundary layer. *J Fluid Mech*, 60, 481-511.
- Lupandin, A. (2005). Effect of flow turbulence on swimming speed of fish. *Biol Bull*, 32, 461-466.
- MacVicar, B., & Roy, A. (2007). Hydrodynamics of a forced riffle pool in a gravel bed river: 2. Scale and structure of coherent turbulent events. *Water Resour Res*, 43, 12402.
- Madsen, J. D., Chambers, P. A., James, W. F., Koch, E. W., & Westlake, D. F. (2001). The interaction between water movement, sediment dynamics and submersed macrophytes. *Hydrobiologia*, 444, 71-84.
- Maia, A., Sheltzer, A. P., & Tytell, E. D. (2015). Streamwise vortices destabilize swimming bluegill sunfish (*Lepomis macrochirus*). *J Exp Biol*, 218, 786-792.
- Maia, A., & Wilga, C. (2016). Dorsal fin function in spiny dogfish during steady swimming. *J Zool*, 298, 139-149.
- Marjoribanks, T. I., Hardy, R. J., Lane, S. N., & Parsons, D. R. (2016). Does the canopy mixing layer model apply to highly flexible vegetation? Insights from numerical modelling. *Environ Fluid Mech*, 16, 1-25.
- McKenzie, D., & Claireaux, G. (2010). *The effects of environmental factors on the physiology of aerobic exercise* (P. Domenici and B. Kapoor, Eds.). CRC Press.

- McLelland, S. J., & Nicholas, A. P. (2000). A new method for evaluating errors in high frequency ADV measurements. *Hydrol Process*, 14, 351-366.
- Morris, M., Mohammadi, M. H., Day, S., Hondzo, M., & Sotiropoulos, F. (2015). Prediction of Glossosoma biomass spatial distribution in Valley Creek by field measurements and a three-dimensional turbulent open channel flow model. *Water Resour Res*, 51, 1457-1471.
- Munoz-Mas, R., Martinez-Caperl, F., Alcaraz-Hernandez, J. D., & Mouton, A. (2015). Can multilayer perceptron ensembles model the ecological niche of freshwater fish species? *Ecol Model*, 309, 72-81.
- Naden, P., Rameshwaran, P., Mountford, O., & Robertson, C. (2006). The influence of macrophyte growth, typical of eutrophic conditions, on river flow velocities and turbulence production. *Hydrol Process*, 20, 3915-3938.
- Nepf, H. (1999). Drag, turbulence, and diffusion in flow through emergent vegetation. *Water Resour Res*, 35, 479-489.
- Nepf, H., & Vivoni, E. (2000). Flow structure in depth-limited, vegetated flow. *J Geophys Res Oceans*, 105, 28547-28557.
- Nepf, H. M. (2012). Flow and transport in regions with aquatic vegetation. *Annu Rev Fluid Mech*, 44, 123-142.
- Newson, M., & Newson, C. (2000). Geomorphology, ecology and river channel habitat: mesoscale approaches to basinscale challenges. *Prog Phys Geogr*, 24, 195-217.
- Nezu, I., & Nakagawa, H. (1995). Turbulence measurements in unsteady free-surface flows. *Flow Meas Instrum*, 6, 49-59.
- Nikora, V. (2010). Hydrodynamics of aquatic ecosystems: an interface between ecology, biomechanics and environmental fluid mechanics. *River Res Appl*, 26, 367-384.
- Nikora, V., Aberle, J., Biggs, B., Jowett, I., & Sykes, J. (2003). Effects of fish size, time-to-fatigue and turbulence on swimming performance: a case study of *Galaxias maculatus*. *J Fish Biol*, 63, 1365-1382.
- Odeh, M., Noreika, J., Haro, A., Maynard, A., Castro-Santos, T., & Cada, G. (2002). Evaluation of the effects of turbulence on the behavior of migratory fish. Report prepared for U.S. In *Department of Energy, Bonneville Power Administration, and Division of Fish and Wildlife* (pp. -00000022-00000021).
- Ortiz, A. C., Ashton, A., & Nepf, H. (2013). Mean and turbulent velocity fields near rigid and flexible plants and the implications for deposition. *J Geophys Res Earth*, 118, 2585-2599.
- Pardo, I., Alvarez, M., Casas, J., Moreno, J., Vivas, S., Bonada, N., Alba-Tercedor, J., Jaimez-Cuellar, P., Moya, G., & Prat, N. (2002). The habitat of the Mediterranean rivers. *Design of the habitat diversity index. Limnetica*, 21, 115-133.
- Perks, J. (2017, 2017). *Filming freshwater fish (presentation* Institute of Fisheries Management Greater London and SE Branch Meeting, 1st February 2017,
- Pope, N., Widdows, J., & Brinsley, M. (2006). Estimation of bed shear stress using the turbulent kinetic energy approach a comparison of annular flume and field data. *Cont Shelf Res*, 26, 959-970.
- Przybilla, A., Kunze, S., Rudert, A., Bleckmann, H., & Brucker, C. (2010). Entraining in trout: a behavioural and hydrodynamic analysis. *J Exp Biol*, 213, 2976-2986.
- Ramon, C., Prats, J., & Rueda, F. (2015). Simulation of turbulent flows in river confluences and meandering channels with a Cartesian 3D free surface hydrodynamic model. *Int J Comput Methods*, 12(1550035).
- Raven, P., Holmes, N., Dawson, F., & Everard, M. (1998). Quality assessment using River Habitat Survey data. *Aquat Conservat Mar Freshwat Ecosyst*, 8, 477-499.
- Rhoads, B. L., & Sukhodolov, A. N. (2004). Spatial and temporal structure of shear layer turbulence at a stream confluence. *Water Resour Res*, 40, W06304.

- Rice, S.P., Buffin-Belanger, T., Lancaster, J., & Reid, I. (2008). *Movements of a macroinvertebrate species across a gravelbed substrate: effects of local hydraulics and microtopography under increasing discharge* (H. Habersack, H. Piegay, and M. Rinaldi, Eds.). From Process Understanding to River Restoration.
- Richards, K. S. (1979). *Stochastic processes in one-dimensional series: an introduction*. Geo Abstracts, University of East Anglia.
- Rinaldi, M., Belletti, B., Bund, W., Bertoldi, W., Gurnell, A., Bujse, T., & Mosselman, E. (2013). Review on ecohydromorphological methods. *Deliverable, D1(1)*, 2007-2013. <http://www.reformrivers.eu/deliverables/d1-1>.
- Rodi, W., Constantinescu, G., & Stoesser, T. (2013). *Large-Eddy Simulation in Hydraulics*. CRC Press.
- Rothschild, B., & Osborn, T. (1988). Small-scale turbulence and plankton contact rates. *J Plankton Res*, 10, 465-474.
- Roy, A.G., Buffin-Belanger, T., & Deland, S. (1996). *Scales of turbulent coherent flow structures in a gravel-bed river* (P. Ashworth, S. J. Bennett, J. L. Best, and S. McLelland, Eds.). John Wiley and Sons.
- Roy, A. G., Buffin-Belanger, T., Lamarre, H., & Kirkbride, A. D. (2004). Size, shape and dynamics of large-scale turbulent flow structures in a gravel-bed river. *J Fluid Mech*, 500, 1-27.
- Rusello, P. J., Lohrmann, A., Siegel, E., & Maddux, T. (2006, 2006/9/10). *Improvements in acoustic Doppler velocimetry* 7th International Conference on Hydroscience and Engineering (ICHE-2006,
- Sand-Jensen, K., & Pedersen, O. (1999). Velocity gradients and turbulence around macrophyte stands in streams. *Freshw Biol*, 42, 315-328.
- Shaw, E. (1978). Schooling fishes: the school, a truly egalitarian form of organization in which all members of the group are alike in influence, offers substantial benefits to its participants. *Am Sci*, 66, 166-175.
- Shuter, B. J., Finstad, A. G., Helland, I. P., Zweimüller, I., & Hölker, F. (2012). The role of winter phenology in shaping the ecology of freshwater fish and their sensitivities to climate change. *Aquatic Sci*, 74, 637-657.
- Shvidchenko, A. B., & Pender, G. (2001). Macroturbulent structure of open-channel flow over gravel beds. *Water Resour Res*, 37, 709-719.
- Silva, A. T., Katopodis, C., Santos, J. M., Ferreira, M. T., & Pinheiro, A. N. (2012). Cyprinid swimming behaviour in response to turbulent flow. *Ecol Eng*, 44, 314-328.
- Silva, A. T., Santos, J. M., Ferreira, M. T., Pinheiro, A. N., & Katopodis, C. (2011). Effects of water velocity and turbulence on the behaviour of Iberian barbel (*Luciobarbus bocagei*, Steindachner 1864) in an experimental pooltype fishway. *River Res Appl*, 27, 360-373.
- Sinisalchi, F., Nikora, A. V. I., & J. (2012). Plant patch hydrodynamics in streams: mean flow, turbulence, and drag forces. *Water Resour Res*, 4, W01513.
- Smith, D. L., Goodwin, R. A., & Nestler, J. M. (2014). Relating turbulence and fish habitat: a new approach for management and research. *Rev Fish Sci Aquaculture*, 22, 123-130.
- Soluk, D. A., & Craig, D. A. (1988). Vortex feeding from pits in the sand: a unique method of suspension feeding used by a stream invertebrate. *Limnol Oceanogr*, 33, 638-645.
- Soluk, D. A., & Craig, D. A. (1990). Digging with a vortex: flow manipulation facilitates prey capture by a predatory stream mayfly. *Limnol Oceanogr*, 35, 1201-1206.
- Standen, E., & Lauder, G. (2007). Hydrodynamic function of dorsal and anal fins in brook trout (*Salvelinus fontinalis*). *J Exp Biol*, 210, 325-339.
- Statzner, B., Gore, J. A., & Resh, V. H. (1988). Hydraulic stream ecology: observed patterns and potential applications. *J North Am Benthol Soc*, 7, 307-360.
- Stewart, R. L., & Fox, J. F. (2015). Role of macroturbulence to sustain turbulent energy in decelerating flows over a gravel bed. *Geomorphology*, 248, 147-160.

- Sulaiman, M., Sinnakaudan, S., & Shukor, M. (2013). Near bed turbulence measurement with acoustic doppler velocimeter (ADV). *KSCE J Civil Eng*, 17, 1515-1528.
- Svendsen, J. C., Skov, J., Bildsoe, M., & Steffensen, J. F. (2003). Intraschool positional preference and reduced tail beat frequency in trailing positions in schooling roach under experimental conditions. *J Fish Biol*, 62, 834-846.
- Taylor, G. I. (1938, 1938). *The spectrum of turbulence* Proceedings of the Royal Society of London A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences,
- Thomas, R. E., Johnson, M. F., Frostick, L. E., Parsons, D. R., Bouma, T. J., Dijkstra, J. T., Eiff, O., Gobert, S., Henry, P. Y., & Kemp, P. (2014). Physical modelling of water, fauna and flora: knowledge gaps, avenues for future research and infrastructural needs. *J Hydraul Res*, 52, 311-325.
- Thompson, D. M., Nelson, J. M., & Wohl, E. E. (1998). Interactions between pool geometry and hydraulics. *Water Resour Res*, 34, 3673-3681.
- Thomson, J., Clark, B., Fingerut, J., & Hart, D. (2004). Local modification of benthic flow environments by suspensionfeeding stream insects. *Oecologia*, 140, 533-542.
- Tonetto, A. F., Cardoso-Leite, R., Novaes, M. C., & Guillermo-Ferreira, R. (2015). The relationship between macroalgal morphological complexity and hydraulic conditions in stream habitats. *Hydrobiologia*, 747, 33-41.
- Tonetto, A. F., Cardoso-Leite, R., Peres, C. K., Bispo, P. D. C., & Branco, C. C. Z. (2014). The effects of habitat complexity and hydraulic conditions on the establishment of benthic stream macroalgae. *Freshw Biol*, 59, 1687-1694.
- Tonina, D., & Jorde, K. (2013). *Hydraulic modelling approaches for ecohydraulic studies: 3D, 2D, 1D and nonnumerical models* (I. Maddock, A. Harby, P. Kemp, and P. Wood, Eds.). John Wiley and Sons Ltd.
- Torrence, C., & Compo, G. P. (1998). A practical guide to wavelet analysis. *Bull Am Meteorol Soc*, 79, 61-78.
- Tritico, H., & Cotel, A. (2010). The effects of turbulent eddies on the stability and critical swimming speed of creek chub (*Semotilus atromaculatus*). *J Exp Biol*, 213, 2284-2293.
- Tritico, H., Cotel, A., & Clarke, J. (2007). Development, testing and demonstration of a portable submersible miniature particle imaging velocimetry device. *Meas Sci Technol*, 18(2555).
- Tullos, D., & Walter, C. (2015). Fish use of turbulence around wood in winter: physical experiments on hydraulic variability and habitat selection by juvenile coho salmon, *Oncorhynchus kisutch*. *Environ Biol Fishes*, 98, 1339-1353.
- Vogel, S. (1994). *Life in Moving Fluids: The Physical Biology of Flow*. Princeton University Press.
- Voulgaris, G., & Trowbridge, J. H. (1998). Evaluation of the acoustic Doppler velocimeter (ADV) for turbulence measurements. *J Atmos Oceanic Tech*, 15, 272-289.
- Warhaft, Z. (2002). Turbulence in nature and in the laboratory. *Proc Natl Acad Sci*, 99, 2481-2486.
- Webb, P., Cotel, A., Waves, M. L., Eddies, E. o. F. B., & Distribution, H. (2010). *Fish Locomotion: An Eco-Ethological Perspective*. Science Publishers.
- Wilcox, A. C., & Wohl, E. E. (2007). Field measurements of threedimensional hydraulics in a step-pool channel. *Geomorphology*, 83, 215-231.
- Wilkes, M. (2014). *The Hydrodynamics of River Ecosystems: Towards an Objective and Ecologically Relevant Classification of Mesohabitats*. University of Worcester.
- Wilkes, M. A., Maddock, I., Visser, F., & Acreman, M. C. (2013). *Incorporating hydrodynamics into ecohydraulics: the role of turbulence in the swimming performance and habitat selection of stream-dwelling fish* (I. Maddock, A. Harbym, P. Kemp, and P. Wood, Eds.). John Wiley and Sons.
- Wilson, C., Stoesser, T., Bates, P., & Pinzen, A. B. (2003). Open channel flow through different forms of submerged flexible vegetation. *J Hydraul Eng*, 129, 847-853.
- Wu, W., Rodi, W., & Wenka, T. (2000). 3D numerical modeling of flow and sediment transport in open channels. *J Hydraul Eng*, 126, 4-15.