

مقاله پژوهشی

بررسی هیدرولیک جریان دو فازي با استفاده از سرعت سنج داپلر

محمد رضا زایری^{۱*} و مهدی قمشی^۲

چکیده

جریان گل آلود به عنوان یک جریان چند فازي، با حجم قابل توجهی از رسوبات معلق رودخانه و آبریز همراه بوده و باتوجه به دارا بودن سرعت و غلظت قابل توجه، بخشی از رسوبات ته نشین شده در دوره های قبلی را نیز فرسایش داده و با خود حمل می کند. این جریان در خط القعر رودخانه، مسیرهای مستقیم یا پرپیچ و خمی را طی می کند؛ بنابراین در این تحقیق به مطالعه آزمایشگاهی اثر نسبت شعاع قوس به عرض کانال با نسبت های ۲، ۴ و ۶ بر نیمرخ سرعت و غلظت با استفاده از سرعت سنج داپلر پرداخته شد. با بررسی تأثیر افزایش شعاع انحنا بر نیمرخ سرعت جریان غلیظ در راستای قائم در انتهای قوس مشاهده شد در یک غلظت و دبی ثابت با افزایش سه برابری شعاع انحنا، سرعت در محور مرکزی کانال به دلیل کاهش اثر نیروی گریز از مرکز ۴۰ درصد افزایش می یابد. همچنین نتایج نشان می دهد با ۲/۵ برابر شدن کدورت، حداکثر سرعت در نیمرخ سرعت جریان غلیظ در انتهای قوس ۳۷ درصد افزایش می یابد. همچنین برای اعداد فرود دنسیمیتریک جریان غلیظ در محدوده ۰/۵۵ تا ۱/۲ در پایین دست هر قوس، جهت چرخش جریان ثانویه به صورت نرمال همانند مجاری روباز خواهد بود، اما با افزایش عدد فرود دنسیمیتریک بالاتر از ۱/۲، جهت چرخش جریان ثانویه معکوس خواهد شد.

واژه های کلیدی: جریان چگال، سرعت سنج داپلر، شعاع انحنای نسبی، نیمرخ سرعت

ارجاع: زایری م.ر. و قمشی م. ۱۴۰۳ بررسی هیدرولیک جریان دو فازي با استفاده از سرعت سنج داپلر. مجله پژوهش آب ایران. ۵۳: ۱۱۷-۱۲۹.
<https://dx.doi.org/10.22034/IWRJ.2024.14686.2584>

۱- استادیار گروه سازه های آبی، دانشکده مهندسی آب و محیط زیست، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران.
۲- استاد گروه سازه های آبی، دانشکده مهندسی آب و محیط زیست، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران.

* نویسنده مسئول: m.zayri@scu.ac.ir

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۲/۲۹

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۱۱/۱۷

مقدمه

تعیین افزایش دقیق انتقال و نرخ ته نشینی رسوبات معلق در محیط‌های مختلف هیدرولیکی، برای مثال رودخانه‌ها، دریاچه‌ها، مصب‌ها و خلیج‌ها برای بسیاری از جنبه‌ها مانند ریخت‌شناسی خط ساحلی، ناوبری، کیفیت آب و آلاینده‌ها و مواد زیستی از اهمیت حیاتی برخوردار است. هم ذرات ماسه و هم ذرات ریزتر از آن ممکن است به صورت معلق در رودخانه‌ها، بسته به میزان انرژی در جریان، در کنار عوامل دیگری جابه‌جا شوند. در بسیاری از مطالعات مربوط به انتقال رسوب، به دلیل ماهیت بسیار متغیر رسوبات معلق، استفاده از کارآمدترین روش‌ها و تجهیزات ممکن هنگام اندازه‌گیری و ثبت غلظت جرمی رسوبات معلق ضروری است؛ برای مثال، از نظر نگرانی‌های زیست‌محیطی و اکوسیستمی، رسوبات می‌توانند منبع مواد مغذی و سمومی باشند که بر سلامت موجودات زنده تأثیر می‌گذارد (Shellenbarger et al., 2013). غلظت بالای مواد معلق می‌تواند هم انتقال نور و هم فتوسنتز را در یک محیط آبی محدود کند. از نظر ناوبری، ته نشینی رسوبات معلق در کانال‌های کشتیرانی باعث پرشدن آن شده و ممکن است برای حفظ یک آبراه قابل کشتیرانی نیاز به لایروبی گاه‌به‌گاه باشد (Gartner, 2004). روش‌های کمی‌سازی غلظت رسوبات معلق¹ (SSC) را می‌توان به دو گروه اصلی به‌عنوان روش‌های مستقیم و غیرمستقیم طبقه‌بندی کرد. روش‌های مستقیم که از بطری‌های نمونه‌برداری آب یا پمپ‌های شناور استفاده می‌کنند، بسیار زمان‌بر بوده و ممکن است نماینده دقیقی از غلظت رسوبات به دلیل ته نشینی مکانی و زمانی ذرات در ستون آب نباشند. از مزایای اصلی این روش می‌توان به سادگی و ارائه اطلاعات درباره ویژگی‌های رسوب مانند شکل، اندازه و کانی‌شناسی آن اشاره کرد (Poletto and Charlesworth, 2010). نقص اصلی روش‌های مستقیم دشواری در اندازه‌گیری‌های آن به‌ویژه زمانی که نمونه‌برداری مکرر مورد نیاز باشد، است (Betteridge et al., 2008). روش‌های غیرمستقیم که هیچکدام شامل جمع‌آوری نمونه‌های آب به جز کالیبراسیون دستگاه‌ها

نمی‌شود، ابزارهای دارای سنسورهای پژواک صوتی یا نوری یا روش‌های انکسار مسیر لیزر است. چون اندازه‌گیری‌ها در فاصله مشخصی جمع‌آوری می‌شوند، استفاده از این تجهیزات تغییرات زمانی غلظت سیال را بدون تحریف جریان ارائه می‌دهند. در برخی موارد، تغییرات غلظت سیال در فواصل مشخص نیز قابل‌سنجش است (Huang et al., 2019). ابزارهای سرعت‌سنج نظیر سیم داغ² نیز به‌واسطه برخورد ذرات و رسوبات معلق بر سنسورها در جریان حاوی رسوبات به‌خوبی کار نمی‌کنند. در سال‌های اخیر استفاده از روش‌های جدید اندازه‌گیری بر مبنای انکسار مسیر لیزر مانند لیزر داپلر³ اندازه‌گیری دقیق‌تر سرعت‌های لحظه‌ای را ممکن ساخته است؛ اما لیزر داپلر در جریان‌های کدر به‌خوبی کار نمی‌کند. استفاده از تکنیک لیزر تنها در جریان‌های چگال آب و نمک به‌خوبی جواب داده است. استفاده از لیزر داپلر برای چندین دهه با موفقیت برای اندازه‌گیری غلظت ذرات حجمی و توزیع اندازه ذرات، در محدوده اندازه‌های ذرات رسوبی بین ۲ تا ۵۰۰ میکرون استفاده می‌شد (Öztürk, 2017). با این حال، با استفاده از اندازه‌گیری پراکندگی مسیر لیزر، اگر خارج از این محدوده از اندازه ذرات باشد، خطاهایی را ایجاد می‌کند، چون شکل ذرات و چگالی مختلف رسوب در تبدیل غلظت حجمی به غلظت جرمی تأثیرگذار خواهد بود (Lin et al., 2020). روش‌هایی که از سیگنال‌های صوتی مانند دستگاه اندازه‌گیری سرعت صوتی داپلر⁴ (ADV) بهره می‌برند، از نظر کاربرد و دقت عملکرد بهتری دارند، زیرا ابزارهای با حسگر نوری معمولاً نسبت به رسوبات معلق در محیط‌های طبیعی بسیار حساس‌تر هستند و دامنه خطا در آن‌ها بیشتر است (Holland and Nielsen, 2022). سنسورهای صوتی چندفرکانسه نیز پتانسیل ارائه اطلاعاتی درباره توزیع اندازه رسوبات معلق را دارند (Pomázi and Baranya, 2020).

سرعت‌سنج ADV به‌منظور اندازه‌گیری سرعت‌های لحظه‌ای جریان در سه جهت مختلف استفاده می‌شود. استفاده از این دستگاه بسیار راحت بوده و به‌طور گسترده‌ای برای تحقیقات صحرایی و آزمایشگاهی مورد

² Hot Wire³ Laser doppler⁴ Acoustic Doppler Velocity meter¹ Suspended Sediment Concentration

(2020) با استفاده از سرعت‌سنج داپلر آکوستیک ۱۰ مگاهرتز (ADV) برای تعیین مقدار غلظت رسوب معلق در مخزنی حاوی پلی کربنات معلق در محدوده اندازه ۶۳-۵۰۰ میکرومتر مطالعه‌ای را انجام دادند. نتایج آنان نشان داد که اثر تلفات سیگنال برگشتی به‌طور قابل‌توجهی وابسته به اندازه و غلظت رسوبات معلق وابسته است که به‌ویژه در غلظت‌های بالا اهمیت می‌یابد. آنان با استفاده از روابط تجربی تأثیر مستقیم تضعیف سیگنال بر اندازه‌گیری رسوب معلق با استفاده از ADV را کمی‌سازی کردند.

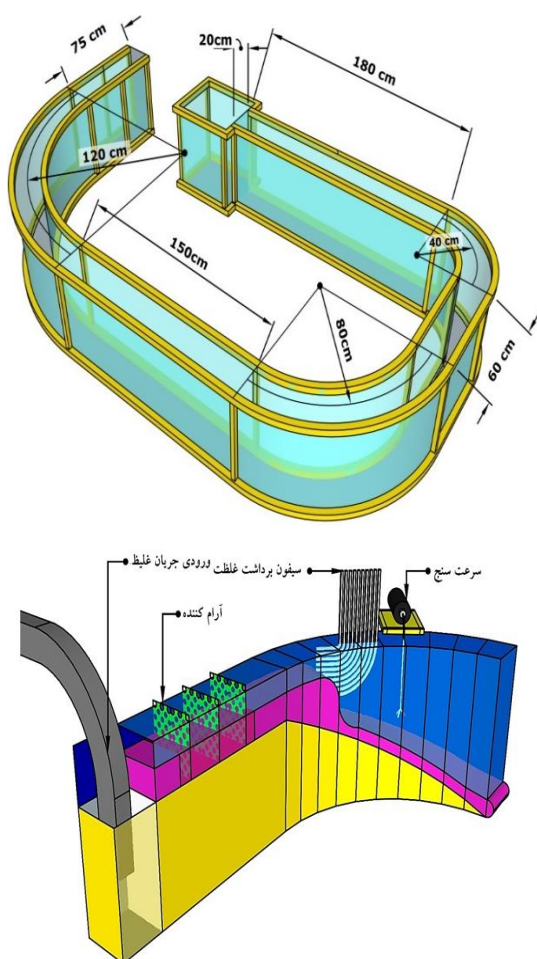
با توجه به اهمیت اندازه‌گیری رسوبات معلق که یکی از پارامترهای مهم در مطالعات هیدرولوژیکی حوضه آبریز است و تغییرات زمانی آن که وابسته به عوامل زیادی از جمله دبی جریان و ویژگی‌های هندسی رودخانه است، هدف این مقاله بررسی آزمایشگاهی ساختار جریان‌های غلیظ رسوبی با تأکید بر بررسی نیم‌رخ سرعت و غلظت با استفاده از ابزار سرعت‌سنج ADV است. مناسب بودن و دقت تکنیک ADV برای این نوع جریان در تحقیقات گذشته بررسی شده است، اما در این تحقیق اثر شعاع انحنای ماندر بر خصوصیات هیدرولیکی جریان غلیظ مورد توجه قرار گرفته است.

مواد و روش‌ها

مطابق با شکل ۱ سرعت‌سنج ADV شامل یک سنسور فرستنده صوتی و سه سنسور دریافت‌کننده فرکانس برگشتی است. سنسور فرستنده یک پالس کوتاه صوتی با سرعت صوت در یک فرکانس مشخص تولید می‌کند. انرژی پالس از داخل حجم نمونه‌گیری (یک حجم کوچک آب که دورتر از فرستنده قرار گرفته است) عبور می‌کند. قسمتی از انرژی به‌وسیله ذرات معلق پراکنده شده و منعکس می‌شود که این تغییر در فرکانس، توسط سرعت‌سنج، محاسبه شده و از روی آن سرعت نمونه به‌دست می‌آید. در مدل‌های آزمایشگاهی همراه با آب در حال حرکت (فلوم‌ها، کانال‌های باز و...) شوری جریان آب یا حتی حباب‌های میکروسکوپی در ستون آب می‌توانند به‌عنوان ذرات معلق کار کنند (Mori et al., 2007). از آنجا که سرعت صوت خروجی از سنسور فرستنده دستگاه ADV در جریان آب علاوه بر ذرات معلق، تابعی از فشار،

استفاده قرار می‌گیرد. مطالعه‌های فراوانی نشان می‌دهد که پراکندگی فرکانس صوتی ناشی از کدورت جریان می‌تواند معیار مناسبی برای جایگزینی با اندازه‌گیری مستقیم غلظت رسوبات معلق باشد (Chmiel et al., 2019; Pomázi and Baranya, 2020; Sahin et al., 2020). اصل اساسی برای اندازه‌گیری غلظت رسوبات معلق این است که امواج صوتی ساطع‌شده توسط دستگاه از طریق مخلوط آب و رسوب حرکت می‌کنند. درحالی‌که برخی از امواج صوتی به دستگاه منعکس می‌شوند، برخی از امواج به‌عنوان تابعی از رسوب، سیال و ویژگی‌های ابزار مانند فرکانس صوتی، غلظت رسوب و فاصله سفر از منبع صدا پراکنده و ضعیف می‌شوند. هر فرکانس صوتی دارای حداقل قطر ذره قابل تشخیص و حساسیت اوج برای یک ذره خاص است. ارتباط بین غلظت ذرات معلق و شدت پژواک صوتی توسط Chanson et al. (2008) بررسی و مشخص شد هر دو اندازه‌گیری تحت تأثیر ویژگی‌های مواد ذرات و خواص کیفیت آب قرار دارند. (Meral (2016 در مطالعه‌ای، نتیجه گرفت که از مقادیر کدورت و نسبت سیگنال به نویز دستگاه داپلر می‌توان برای پایش مستمر رسوب در مجاری روباز استفاده کرد. ایشان در آزمایشی اندازه ذرات مؤثر بر کدورت را با استفاده از چهار گروه اندازه رسوب مختلف (۵۰-۱۰۰، ۱۰۰-۲۰۰، ۲۰۰-۲۵۰ میکرون) بررسی کرد. بالاترین مقادیر کدورت جریان برای رسوبات با اندازه کوچک‌تر تعیین شد که وجود رس رابطه بین رسوبات و کدورت را کاهش داده و باعث خطای خواندن دستگاه داپلر برای غلظت‌های بالا (بیش از ۴ گرم در لیتر) می‌شود. (Fernández et al. (2021 در مطالعه‌ای پارامترهای اصلی توزیع آماری از فرکانس‌های برگشتی توسط ذرات معلق برآورد کردند. سپس، توانایی این پارامترها برای مشخص کردن میزان غلظت موجود در جریان آب را تجزیه و تحلیل کردند. همچنین از شبیه‌سازی‌ها برای مطالعه تأثیر نویز، تنوع دامنه سیگنال و پراکندگی اندازه ذرات استفاده کردند. کارایی الگوریتم توسعه‌داده‌شده آنان در اندازه‌گیری‌های تجربی نیز ارزیابی شد. این روش برای تعیین مقدار غلظت ذرات معلق در محدوده ۵ تا ۳۰۰۰ میکرومتر کارآمد بود و نتایج مشابهی را برای هر دو اندازه ذرات و نسبت سیگنال به نویزهای مختلف به‌دست آوردند. (Sahin et al.

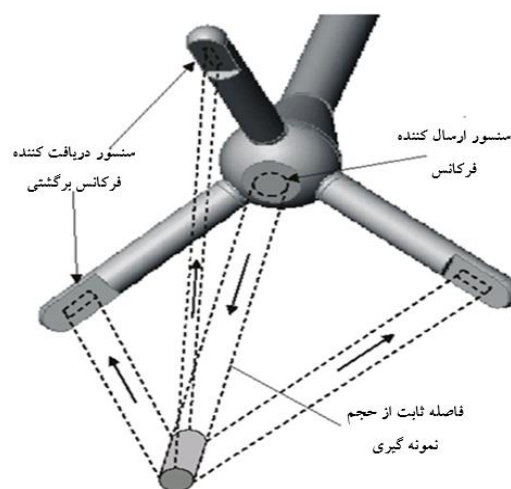
و آب ساکن توسط یک دریچه کشویی آرام کننده از هم جدا و با گشودن دریچه جریان غلیظ به درون آب ساکن هدایت می شود. برای ثابت نگه داشتن سطح آب ساکن، آب بدون غلظت با دبی مورد نیاز از انتهای فلوم به درون فلوم وارد می شود.



شکل ۲- شمای مدل آزمایشگاهی و تجهیزات مورد استفاده

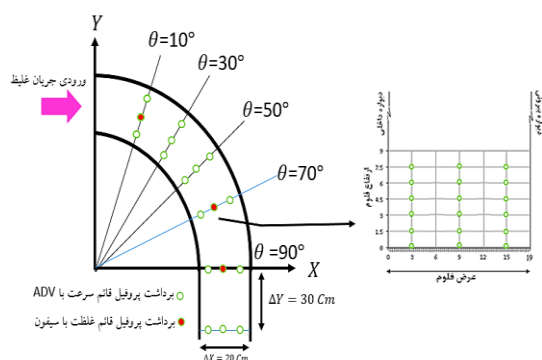
از آنجایی که در جریان غلیظ به ویژه در مقیاس آزمایشگاهی، اختلاف چگالی سیال غلیظ و سیال پیرامون بسیار کم است؛ بنابراین کنترل اختلاف دمای سیال غلیظ و سیال پیرامون بسیار حائز اهمیت است تا تفاوت جرم مخصوص سیال غلیظ و سیال ساکن محیطی فقط به دلیل سیال گل آلود باشد و تفاوت دما در به وجود آمدن جریان غلیظ نقشی نداشته باشد. در تحقیق حاضر از یک دماسنج دیجیتال استفاده شد تا تفاوت دما بیش از دو درجه سلسیوس نباشد. اندازه گیری غلظت و سرعت پس از خروج کامل رأس جریان و یکنواخت شدن بدنه جریان صورت گرفته است. با توجه به زیر بحرانی بودن جریان در

دما و شوری است، در مطالعه ای Mosquera and Pedocchi (2019) با ارائه روابط پیشنهادی بیان کردند که می توان میزان غلظت شوری آب را تا فاصله ۵ سانتی متری از سنسور دستگاه ADV محاسبه کرد. در مطالعه ای در یک مدل آزمایشگاهی Hejazi et al. (2016) به منظور کاهش نوسانات فرکانسی بازگشتی از سرعت سنج ADV از جریانی با غلظت های نمکی بین ۲۰ تا ۱۲۰ میلی گرم در لیتر با روش میانگین متحرک استفاده کردند و با این روش توانستند نسبت سیگنال به نویز را تا ۴۷ درصد بهبود ببخشند.



شکل ۱- شماتیک دستگاه سرعت سنج ADV

آزمایش های این تحقیق در فلومی با طول کلی ۸/۵ متر، عمق ۷۰ سانتی متر، عرض ۲۰ سانتی متر و شیب کف ۰/۰۰۱، دارای سه قوس متوالی ۹۰ درجه به شعاع انحنای ۴۰، ۸۰ و ۱۲۰ در آزمایشگاه مدل های فیزیکی و هیدرولیکی دانشکده مهندسی آب و محیط زیست دانشگاه شهید چمران انجام شد. برای انجام آزمایش ها، از نمک و کائولن با چگالی ۲/۶۳ و اندازه متوسط ذرات ۴ میکرون به عنوان ماده رسوبی غیر چسبنده و ماده رنگی به نام پودر رنگریزی به منظور ایجاد سیال غلیظ استفاده شد. آزمایش ها در چهار دبی ۰/۵، ۰/۷، ۰/۹ و ۱/۱ لیتر در ثانیه و در غلظت ۸، ۱۲، ۱۶ و ۲۰ گرم در لیتر انجام شد. سیال غلیظ تهیه شده، توسط یک پمپ از مخزن سیال غلیظ به یک مخزن از جنس گالوانیزه به ابعاد ۱۰۰×۵۰×۱۲۵ سانتی متر و با ارتفاع ثابت انتقال داده می شد. مطابق شکل ۲ در کانال آزمایشگاهی سیال غلیظ



شکل ۳- نمایی از محل نقاط اندازه‌گیری مؤلفه‌های سرعت و غلظت در پلان و یک مقطع عرضی

آن به یک سرنگ ۶۰ سی‌سی ختم می‌شود. طول لوله‌ها و شیلنگ پیزومتر طوری در نظر گرفته شد که با یک بار کشیدن سرنگ همه حجم آن‌ها خالی شود. شکل ۴-ب نحوه نمونه‌برداری غلظت برداشتی از داخل سیفون به‌منظور قرائت EC آب را نشان می‌دهد.

همه آزمایش‌ها و سرعت بسیار کم جریان غلیظ، بعد از عبور از هر قوس و وارد شدن به مسیر مستقیم، بیشینه سرعت جریان به مرکز کانال بازگشته و اثر قوس قبلی از بین می‌رود؛ بنابراین فاصله کم بین قوس‌ها خللی در آزمایش وارد نخواهد کرد.

به‌منظور اندازه‌گیری سرعت مطابق با شکل ۴ از سرعت‌سنج داپلر آکوستیک مدل Vectrino+ استفاده شده است. در هر مقطع در ۶ نقطه سرعت نقطه‌ای در مرکز کانال اندازه‌گیری شد (شکل ۳).

به‌منظور صحت‌سنجی رابطه به‌دست‌آمده مربوط به انرژی صوتی پالس برگشتی با غلظت نیاز به نمونه‌برداری و برداشت نیم‌رخ قائم غلظت از بدنه جریان غلیظ، سه سری سیفون نمونه‌گیری در مقاطع مختلف هر قوس نصب شد. مطابق با شکل ۴-الف هر سیفون نمونه‌گیری شامل ۱۴ تا ۲۸ لوله قوس‌دار مسی به قطر ۴ میلی‌متر بوده و فاصله مرکز آن‌ها در جهت قائم ۱۵ میلی‌متر است. در انتهای هر لوله مسی یک شیلنگ پیزومتری متصل شده و سر دیگر

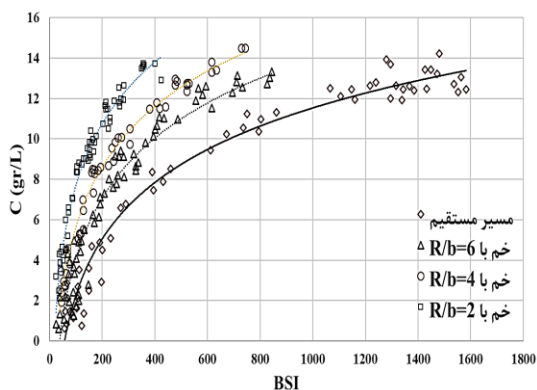


شکل ۴- سیفون نمونه‌گیری غلظت جریان غلیظ، (الف) موقعیت قرارگیری سیفون، (ب) ظرف نمونه‌برداری (ج) دستگاه سرعت‌سنج ADV

جدول ۱- خلاصه روابط بین شدت سیگنال برگشتی و مقدار غلظت جریان بار معلق

محقق	رابطه	توضیحات
(Kawanisi and Yokosi, 1997)	$SSC(mg/l) = 3 \times BSI$ $BSI \propto 10^{0.043 \times Ampl}$ $0 \leq SSC \leq 80 mg/l$	کانال اتا در هیروشیما، ژاپن
(SonTek, 1997)	$BSI \propto 10 \times \log_{10}(SSC); SSC(mg/l)$	Sontek ADV
(Nortek, 2001)	$SSC \propto BSI$	Nortek ADVs
(Nikora and Goring, 2000)	$SSC(mg/l) = 0.56 \times BSI$ $BSI \approx 0.00003 \times (10^{0.0434 \times Ampl_1} + 10^{0.0434 \times Ampl_2} + 10^{0.0434 \times Ampl_3})$	کانال آبیاری بالموال، نیوزیلند
(Voulgaris and Meyers, 2004)	$\log_{10}(SSC) = 10.8 \times \log_{10}(BSI) - 17.8$	رودخانه بلی، آمریکا
(Merckelbach, 2006)	$BSI = 10 \times \log_{10}(SSC) + K_0$	مطالعه آزمایشگاهی
(Chanson et al., 2008)	$SSC = 0.9426 \times [1 - \exp(-0.1109 \times BSI)]$ $BSI = 10^{-5} \times 10^{0.043 \times Ampl}$	رودخانه اپراف در استرالیا
(Meral, 2016)	$SSC = 0.9426 \times [1 - \exp(-0.1109 \times BSI)]$	مطالعه آزمایشگاهی

در هر مقطع با استفاده از دستگاه سرعت سنج ADV ابتدا از داده های خروجی مقدار دامنه سیگنال برگشتی برای هر موقعیت و در سه جهت x، y و z میانگین زمانی گرفته شد، سپس با استفاده از رابطه (۱) مقدار شدت سیگنال برگشتی (BSI) محاسبه شد. به منظور محاسبه غلظت جریان غلیظ و به دست آوردن رابطه آن با شدت سیگنال برگشتی برای هر آزمایش جریان غلیظ در مقاطع پایین دست کانال اقدام به نمونه برداری و برداشت مقدار غلظت جریان غلیظ با استفاده از نمونه گیر سیفون شد. در شکل ۵ مقادیر محاسبه شده شدت سیگنال برگشتی توسط سرعت سنج ADV در مقابل مقادیر برداشت شده غلظت با استفاده از نمونه گیر در کانال با مسیر مستقیم و قوس با شعاع نسبی مختلف نشان داده شده است.



شکل ۵- مقایسه شدت سیگنال برگشتی از دستگاه ADV با

غلظت جریان غلیظ برداشت شده در مسیرهای مختلف

همان گونه که بیان شد، دستگاه سرعت سنج ADV می تواند نیمرخ های غلظت جریان را با استفاده از روش تفرق و انعکاس امواج صوتی (ABS) محاسبه کند. اصول اساسی و پایه ای روش انعکاس امواج بدین صورت است که یک پالس صوتی به وسیله سنسور مربوط ارسال می شود. هنگامی که پالس صوتی از سنسور منتشر و پخش شد، هرگونه مصالح و ذرات معلق در حجم نمونه گیری را شناسایی می کند و این ذرات انرژی صوتی را منعکس می کنند که بخشی از آن به سنسور گیرنده منعکس می شود. رابطه بین شدت امواج صوتی دریافتی و مشخصات ذرات معلق می تواند بیان کننده غلظت جریان غلیظ در آن نقطه باشد. (Kawanisi 2004) و (Nikora et al. 2002) رابطه بین دامنه سیگنال (Ampl) در سه جهت مختصاتی و شدت سیگنال برگشتی (BSI) را به صورت زیر نشان دادند:

$$BSI \approx 0.00001 \times (10^{0.0434 \times Ampl_1} + 10^{0.0434 \times Ampl_2} + 10^{0.0434 \times Ampl_3}) \quad (1)$$

مطالعات متعددی ارتباط بین شدت سیگنال برگشتی (در واحد دسی بل) به مقدار غلظت جریان بار معلق (در واحد گرم به لیتر) بررسی کرده اند که تعدادی از آن ها در جدول ۱ آورده شده است.

نتایج و بحث

در این تحقیق به منظور برآورد مقدار غلظت جریان غلیظ

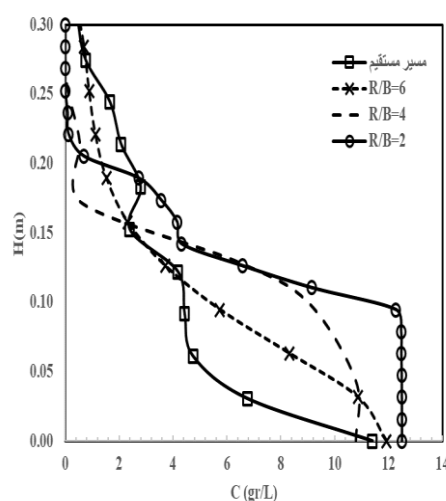
متوسط خطای مطلق (MAE) و ضریب تعیین (R^2) نیز بیان شده که نشان‌دهنده دقت بالای روابط در برآورد مقدار غلظت جریان غلیظ است. با توجه به جدول ۲ می‌توان بیان داشت با افزایش نسبت شعاع به عرض شیب منحنی در رابطه به‌دست‌آمده بیشتر شده است. پس از به‌دست‌آوردن روابط محاسبه غلظت جریان غلیظ از شدت سیگنال برگشتی دستگاه ADV می‌توان نیم‌رخ عمود غلظت را برای دیگر مقاطع عرضی در مسیرهای مختلف (مستقیم و منحنی) محاسبه کرد. در شکل ۶ نیم‌رخ غلظت جریان غلیظ در راستای قائم در انتهای قوس و میانه کانال با شعاع نسبی مختلف و مسیر مستقیم در مرکز کانال به‌ازای دبی ۲/۵ لیتر در ثانیه و غلظت بالادست ۱۲/۵ گرم در لیتر نمایش داده شده است.

جدول ۲- روابط بین شدت سیگنال برگشتی از دستگاه ADV با غلظت جریان غلیظ برداشت‌شده

نوع مسیر	رابطه	R^2	MSE	MAE
$\frac{R}{B} = 2$	$C(\text{gr/L}) = 10.335 \times \log_{10}(\text{BSI}) - 12.997$	0.96	9.472	2.984
$\frac{R}{B} = 4$	$C(\text{gr/L}) = 10.023 \times \log_{10}(\text{BSI}) - 14.454$	0.98	9.416	2.935
$\frac{R}{B} = 6$	$C(\text{gr/L}) = 9.792 \times \log_{10}(\text{BSI}) - 15.329$	0.93	8.163	2.699
مستقیم	$C(\text{gr/L}) = 9.178 \times \log_{10}(\text{BSI}) - 16.289$	0.97	9.488	2.887

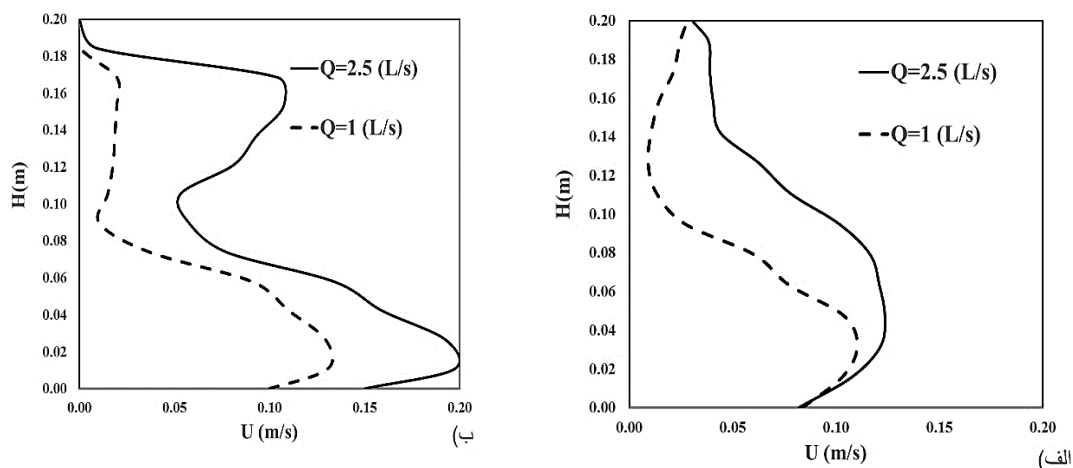
ورودی ثابت در قوس با نسبت شعاع به عرض ۲، در نزدیکی سطح مشترک با سیال پیرامون قرار گرفته و با افزایش نسبت شعاع به عرض، موقعیت حداکثر غلظت در نزدیکی بستر قرار می‌گیرد. در شکل‌های ۷ تا ۹ تأثیر افزایش دبی بر نیم‌رخ سرعت جریان غلیظ در راستای قائم در انتها و همچنین رئوس قوس در میانه کانال به‌ازای دو دبی ۱ و ۲/۵ لیتر در ثانیه و غلظت بالادست ۱۲/۵ گرم در لیتر نمایش داده شده است. با توجه به نتایج نشان داده شده می‌توان بیان داشت که در همه مسیرها با افزایش دبی سرعت جریان غلیظ افزایش و مکان حداکثر سرعت نزدیک به بستر جریان شکل می‌گیرد. مقایسه نیم‌رخ‌های طولی سرعت جریان غلیظ در انتهای مسیر نشان می‌دهد که مقدار سرعت بیشینه با کاهش نسبت شعاع به عرض کانال (تندتر شدن قوس) کمتر شده و ارتفاع بدنه جریان غلیظ افزایش داشته است.

با توجه به شکل ۵ می‌توان به این نکته اشاره کرد که منحنی مقدار غلظت برآوردشده از دستگاه سرعت‌سنج ADV تا غلظت ۱۰ گرم در لیتر روند خطی داشته و برای غلظت‌های بیشتر از آن تا غلظت ۱۵ گرم در لیتر از منحنی لگاریتمی پیروی می‌کند که این روند نیز در نتایج Hosseini et al. (2006) در مسیر مستقیم مشاهده شده است. همچنین در این شکل رابطه به‌دست‌آمده از نتایج Voulgaris and Meyers (2004) در مسیر رودخانه با نتایج به‌دست‌آمده مقایسه شده است. در جدول ۲ روابط بین شدت سیگنال برگشتی از دستگاه ADV با غلظت جریان غلیظ برداشت شده در نسبت شعاع انحنای به عرض‌های مختلف و همچنین مسیر مستقیم آورده شده است. در این جدول مقادیر متوسط مربع خطا (MSE)،

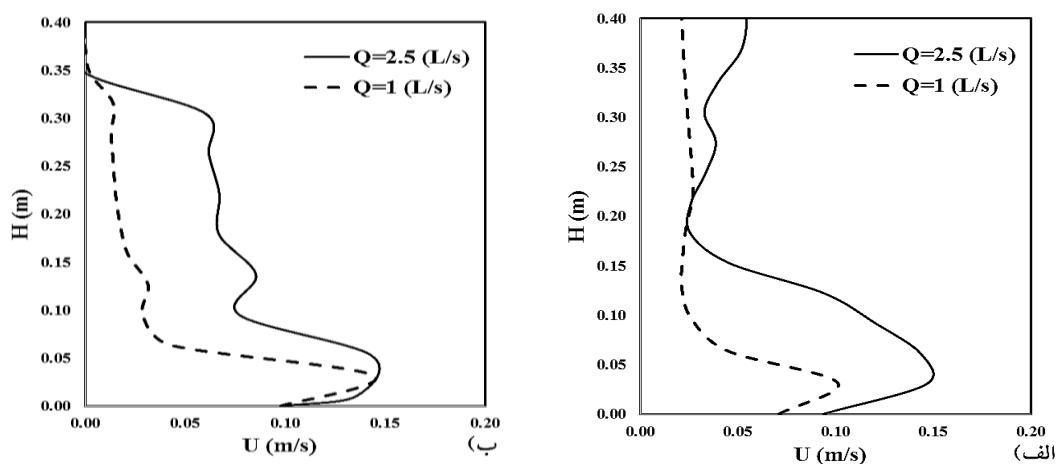


شکل ۶- نیم‌رخ غلظت جریان غلیظ در پایین‌دست مسیر به‌ازای دبی ۲/۵ (L/s) و غلظت ورودی ۱۲/۵ (g/L)

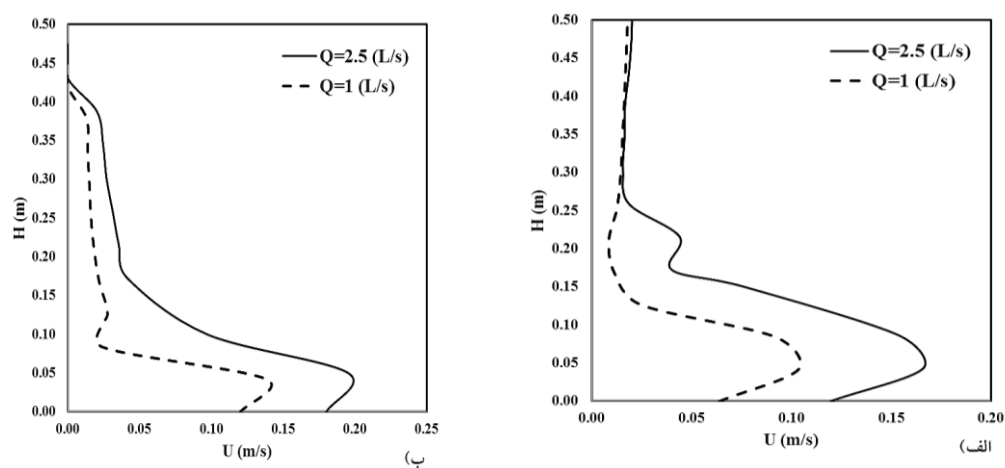
همان‌گونه که در شکل ۶ مشاهده می‌شود موقعیت حداکثر غلظت جریان غلیظ به‌ازای یک دبی و غلظت



شکل ۷- نیمرخ سرعت جریان غلیظ در یک غلظت ثابت در الف) انتهای قوس ب) مرکز قوس با نسبت شعاع انحنا دو



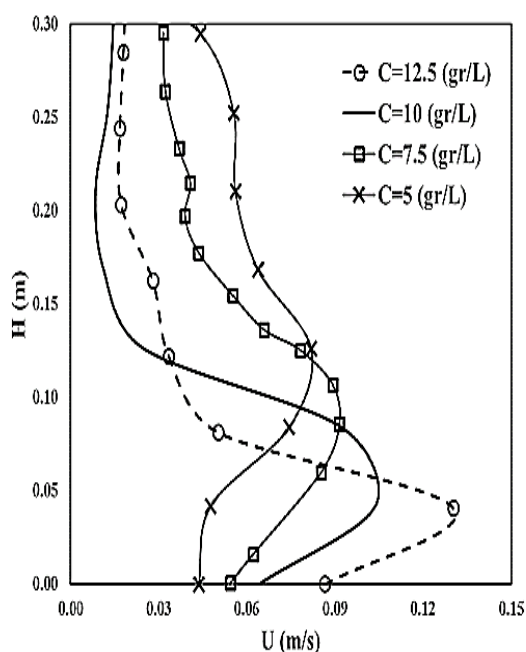
شکل ۸- نیمرخ سرعت جریان غلیظ در یک غلظت ثابت در الف) انتهای قوس ب) رأس قوس با نسبت شعاع انحنا چهار



شکل ۹- نیمرخ سرعت جریان غلیظ در یک غلظت ثابت در الف) انتهای قوس ب) رأس قوس با نسبت شعاع انحنا شش

۲/۵ لیتر در ثانیه و غلظت بالادست ۱۲/۵ گرم در لیتر نمایش داده شده است. همان گونه که مشاهده می شود در

در شکل ۱۰ تأثیر افزایش شعاع انحنا بر نیمرخ سرعت جریان غلیظ در راستای قائم در انتهای قوس به ازای دبی

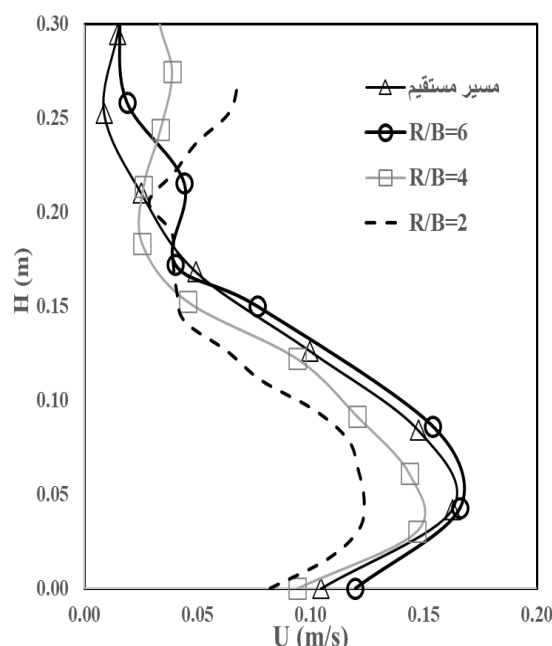


شکل ۱۱- تأثیر افزایش غلظت بر نیمرخ سرعت جریان غلیظ به‌ازای دبی ۲/۵ (L/s)

در شکل ۱۲ نیمرخ سرعت طولی جریان غلیظ در عرض کانال در فواصل ۵، ۱۰ و ۱۵ سانتی‌متر از ابتدای دیواره داخلی نشان داده شده است. نیمرخ‌های سرعت نشان داده شده مربوط به دبی ۲/۵ لیتر بر ثانیه و غلظت ۱۰ گرم در لیتر در انتهای قوس‌های اول، دوم و سوم است. همان‌گونه که نشان داده شده است، با فاصله‌گرفتن از دیواره داخلی سرعت طولی و همچنین ضخامت جریان غلیظ افزایش پیدا کرده است که دلیل آن تأثیر نیروی گریز از مرکز بوده و باعث اختلاف تراز سطح جریان غلیظ بین دیواره داخلی و خارجی می‌شود.

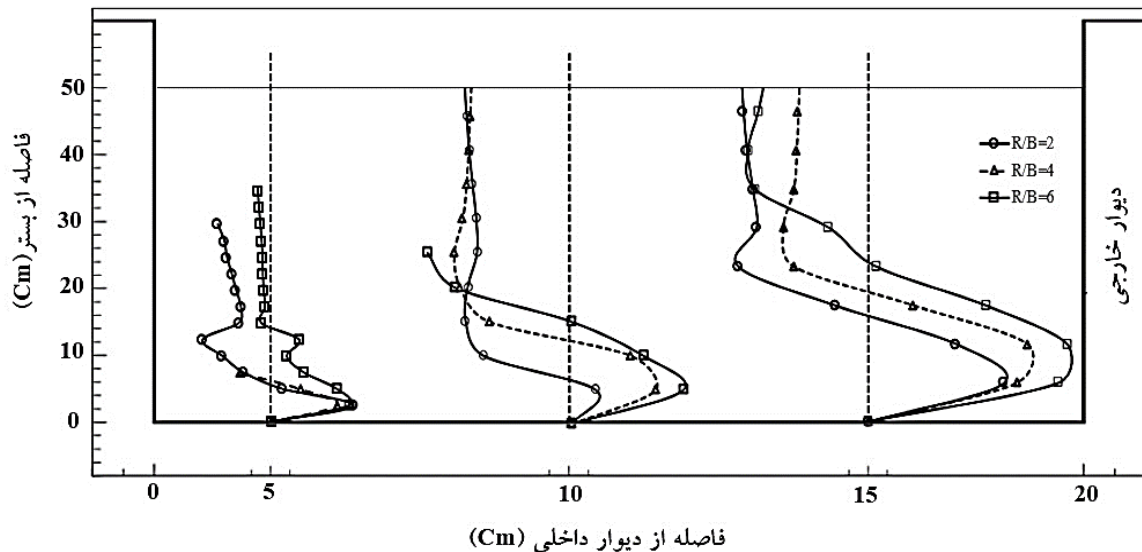
در شکل ۱۳ نیمرخ بی‌بعد سرعت برای همه قوس‌ها در مرکز کانال برای دبی‌های ۱، ۱/۵، ۲ و ۲/۵ برای غلظت ۱۰ گرم در لیتر ترسیم شده است. در جریان‌های غلیظ نمکی و رسوبی نیمرخ سرعت طولی جریان غلیظ دارای دو ناحیه قابل تفکیک است.

یک غلظت و دبی ثابت با افزایش شعاع انحناء، سرعت در محور مرکزی کانال به دلیل کاهش اثر نیروی گریز از مرکز افزایش می‌یابد. براساس نتایج به دست آمده سرعت در قوس $R/B=4$ نسبت به سرعت در قوس $R/B=2$ به طور متوسط ۱۵ درصد و سرعت در قوس $R/B=6$ نسبت به سرعت در قوس $R/B=2$ به طور متوسط ۴۰ درصد افزایش نشان می‌دهد.



شکل ۱۰- نیمرخ سرعت جریان غلیظ در پایین دست مسیر شیب‌دار به‌ازای دبی ۲/۵ (L/s) و غلظت ورودی ۱۲/۵ (g/L)

در شکل ۱۱ تأثیر افزایش غلظت بر نیمرخ سرعت جریان غلیظ در راستای قائم در انتهای قوس به‌ازای دبی ۲/۵ لیتر در ثانیه در قوس با نسبت شعاع به عرض ۶ نمایش داده شده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود با افزایش R/B برابری غلظت، حداکثر نیمرخ سرعت جریان غلیظ در انتهای قوس ۳۷ درصد افزایش می‌یابد علت این امر را می‌توان به افزایش مؤلفه وزن سیال در اثر افزایش غلظت نسبت داد. همچنین به دلیل بالا بودن غلظت جریان غلیظ در نزدیکی بستر موقعیت حداکثر سرعت جریان با افزایش غلظت به سمت بستر منتقل می‌شود.



شکل ۱۲- نیمرخ سرعت جریان غلیظ در فواصل مختلف عرض کانال به ازای دبی ۲/۵ (L/s) و غلظت ورودی ۱۰ (g/L)

$$\frac{u}{U_{\max}} = 1 + 0.234 \ln(z/z_{\max}) \quad (2)$$

$$z/z_{\max} \leq 1$$

$$\frac{u}{U_{\max}} = \exp[-0.1758 (z/z_{\max} - 1)^2] \quad (3)$$

$$z/z_{\max} > 1$$

در تحقیقات متعدد، نمودارهایی به منظور پیش‌بینی جهت چرخش جریان ثانویه جریان‌های غلیظ تهیه شده که در آن جهت چرخش نرمال جریان ثانویه تابعی از عدد فرود دنسیمیتریک و مقدار ضریب شزی در بستر است (Abad et al., 2011; Mahdinia et al., 2012; Sequeiros et al., 2009). که در این نمودار مطابق با شکل ۱۴، مقادیر ضریب شزی (C_z) و مقدار ضریب اصطکاک بستر (C_f) و τ_b تنش برشی بستر از روابط زیر به دست خواهند آمد:

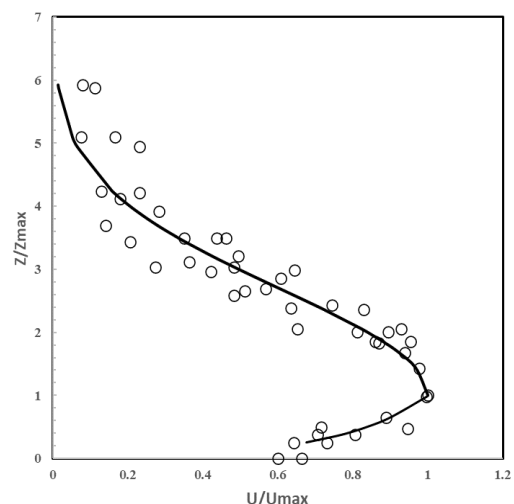
$$C_z = \frac{1}{\sqrt{C_f}} \quad (4)$$

$$C_f = \frac{\tau_b}{\rho U^2} \quad (5)$$

$$\tau_b = (\rho_1 - \rho_a) g z_p S \quad (6)$$

که در این روابط U مقدار سرعت متوسط لایه‌ای جریان غلیظ (m/s)، z_p نقطه که در آن حداکثر سرعت طولی جریان غلیظ تشکیل می‌شود (m) و ρ_1 مقدار متوسط چگالی (kg/m^3) جریان غلیظ از کف تا z_p است. از

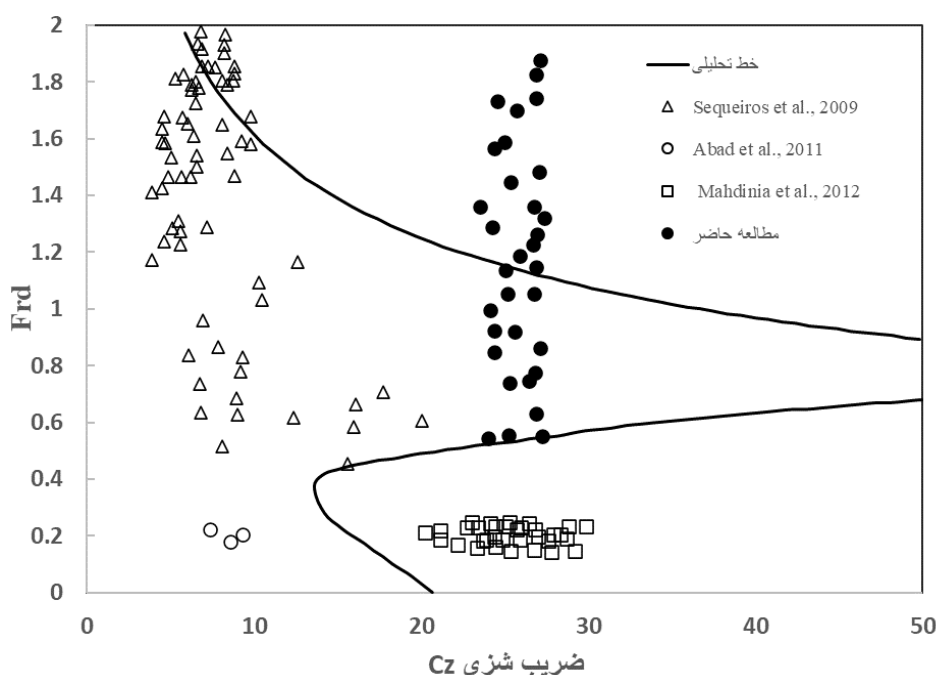
همان‌گونه که مشاهده می‌شود از بستر کانال تا نقطه‌ای که حداکثر سرعت جریان قرار گرفته است ($\frac{z}{z_{\max}} \leq 1$) جریان تحت تأثیر تنش برشی بستر قرار گرفته و الگوی جریان از یک تابع لگاریتمی یا سهمی با شیب مثبت پیروی خواهد کرد. در ناحیه بالایی آن ($\frac{z}{z_{\max}} > 1$) نیمرخ سرعت شبیه الگوی ناحیه جت آزاد بوده و از تابع نمایی با شیب منفی پیروی خواهد کرد. معادلات مربوط به این دو ناحیه در ادامه آورده شده است.



شکل ۱۳- نیمرخ بی‌بعد سرعت جریان غلیظ به ازای غلظت ورودی ۱۰ (g/L)

پایین دست همه خم‌ها در مقابل ضریب شزی نمایش داده شده و با نتایج دیگر محققان مقایسه شده است. با تجزیه و تحلیل نتایج مشاهده می‌شود برای اعداد فرود دنسیمتریک جریان غلیظ در محدوده ۰/۵۵ تا ۱/۲ در پایین دست هر قوس جهت چرخش جریان ثانویه به صورت نرمال همانند مجاری روباز خواهد بود؛ اما با افزایش عدد فرود دنسیمتریک بالاتر از ۱/۲ جهت چرخش جریان ثانویه معکوس خواهد شد که این روند در محدوده تعیین شده نیز صادق است.

آنجایی که نیروی گریز از مرکز تابع مقدار سرعت جریان است، در نزدیکی بستر نیروی گریز از مرکز برای جریان‌های غلیظ با عدد فرود بالا و در بسترهایی با زبری کم می‌تواند بر نیروی گرادیان فشار غلبه کرده و یک جریان ثانویه با جهت چرخش معکوس به وجود آورد. این پدیده به دلیل بالا بودن مقدار عدد فرود به دلیل شیب بستر و همچنین صاف بودن بستر به وقوع می‌پیوندد. در شکل ۱۴ به منظور بررسی جهت چرخش نرمال یا معکوس جریان ثانویه، مقادیر عدد فرود دنسیمتریک در



شکل ۱۴- بررسی جهت چرخش نرمال یا معکوس جریان ثانویه به ازای عدد فرود دنسیمتریک و ضریب شزی

گرم در لیتر می‌توان با استفاده از سرعت سنج ADV میزان نیم‌رخ غلظت را به صورت نقطه‌ای برداشت کرد. هرچقدر شعاع انحنای مسیر پیچان رود تندتر باشد، رابطه بین شدت سیگنال برگشتی با غلظت، خطی شده است. براساس نتایج به دست آمده تأثیر افزایش شعاع انحنای نیم‌رخ سرعت جریان غلیظ در راستای قائم در انتهای قوس نشان می‌دهد که سرعت در قوس $R/B=4$ نسبت به سرعت در قوس $R/B=2$ به طور متوسط ۱۵ درصد و سرعت در قوس $R/B=6$ نسبت به سرعت در قوس $R/B=2$ به طور متوسط ۴۰ درصد افزایش داشته است.

نتیجه‌گیری

جریان گل‌آلود در مسیر حرکت خود در رودخانه‌ها یا مخازن می‌تواند بستر مستقیم یا پیچان‌رود را طی کند. در این تحقیق رفتار جریان غلیظ نمکی در یک فلوم با سه خم متوالی با شعاع انحنای نسبی ۲، ۴ و ۶، طول کلی ۸/۵ متر، عمق ۷۰ سانتی‌متر و عرض ۲۰ سانتی‌متر مطالعه شده است. برای اندازه‌گیری سرعت جریان از سرعت‌سنج داپلر آکوستیک (ADV) استفاده شد. این دستگاه سرعت آب را براساس پدیده داپلر اندازه‌گیری می‌کند. همچنین براساس مقدار شدت پالس برگشتی، قابلیت اندازه‌گیری غلظت جریان را نیز دارا است. نتایج نشان می‌دهد در همه آزمایش‌ها، تا محدوده غلظت ۱۵

سپاسگزاری

این مقاله با حمایت واحد پژوهشی دانشگاه شهید چمران اهواز از طریق پژوهانه نویسنده اول به شماره SCU.WH1402.43525 تهیه شده است که بدین وسیله نویسندگان از معاونت پژوهشی دانشگاه شهید چمران اهواز تشکر و قدردانی می کنند.

منابع

- turbidity currents using an Acoustic Doppler Velocimeter. *Flow Measurement and Instrumentation*, 17: 59-68.
- Huang, R., Zhang, Q., Qi, P. and Liu, W., 2019. Concentration Measurement of Uniform Particles Based on Backscatter Sensing of Optical Fibers. *Water*, 11, 1955. <https://doi.org/10.3390/w11091955>.
- Kawanisi, K., 2004. Structure of Turbulent Flow in a Shallow Tidal Estuary. *Journal of Hydraulic Engineering*, 130: 360-370.
- Kawanisi, K. and Yokosi, S., 1997. Characteristics of suspended sediment and turbulence in a tidal boundary layer. *Continental Shelf Research*, 17: 859-875.
- Lin, J., He, Q., Guo, L., Van Prooijen, B.C. and Wang, Z.B., 2020. An integrated optic and acoustic (IOA) approach for measuring suspended sediment concentration in highly turbid environments. *Marine Geology*, 421, 106062. <https://doi.org/10.1016/j.margeo.2019.106062>
- Mahdinia, M., Firoozabadi, B., Farshchi, M., Varnamkhasti, A.G. and Afshin, H., 2012. Large Eddy Simulation of Lock-Exchange Flow in a Curved Channel. *Journal of Hydraulic Engineering*, 138: 57-70.
- Meral, R., 2016. A study on the estimating of sediment concentration with turbidity and acoustic backscatter signal for different sediment sizes. *Hydrology Research*, 47: 305-311.
- Merckelbach, L.M., 2006. A model for high-frequency acoustic Doppler current profiler backscatter from suspended sediment in strong currents. *Continental Shelf Research*. 26: 1316-1335.
- Mori, N., Suzuki, T. and Kakuno, S., 2007. Experimental study of air bubbles and turbulence characteristics in the surf zone. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 112 (C5). <https://doi.org/10.1029/2006JC003647>
- Mosquera, R. and Pedocchi, F., 2019. Salinity estimation from Acoustic Doppler Velocimeter measurements. *Continental Shelf Research*, 180: 59-62.
- Nikora, V. and Goring, D., 2000. Flow Turbulence over Fixed and Weakly Mobile Gravel Beds. *Journal of Hydraulic Engineering*. 126: 679-690.
- Nikora, V., Goring, D. and Ross, A., 2002. The Structure and Dynamics of the Thin Near-bed Layer in a Complex Marine Environment: A Case Study in Beatrix Bay, New Zealand. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 54(5): 915-926.
- Abad, J.D., Sequeiros, O.E., Spinewine, B., Pirmez, C., Garcia, M.H. and Parker, G., 2011. Secondary Current of Saline Underflow In A Highly Meandering Channel: Experiments and Theory. *Journal of Sedimentary Research*, 81: 787-813.
- Betteridge, K.F.E., Thorne, P.D. and Cooke, R.D., 2008. Calibrating multi-frequency acoustic backscatter systems for studying near-bed suspended sediment transport processes. *Continental Shelf Research*. 28: 227-235.
- Chanson, H., Takeuchi, M. and Trevethan, M., 2008. Using turbidity and acoustic backscatter intensity as surrogate measures of suspended sediment concentration in a small subtropical estuary. *Journal of Environmental Management*, 88: 1406-1416.
- Chmiel, O., Baselt, I. and Malcherek, A., 2018. Applicability of Acoustic Concentration Measurements in Suspensions of Artificial and Natural Sediments Using an Acoustic Doppler Velocimeter. *Acoustics*, 1: 59-77.
- Fernández, A., Ibáñez, A., Parrilla, M., Elvira, L., Bassat, Q. and Jiménez, J., 2021. Estimation of the concentration of particles in suspension based on envelope statistics of ultrasound backscattering. *Ultrasonics*, 116, 106501. <https://doi.org/10.1016/j.ultras.2021.106501>
- Gartner, J.W., 2004. Estimating suspended solids concentrations from backscatter intensity measured by acoustic Doppler current profiler in San Francisco Bay, California. *Marine Geology*, 211: 169-187.
- Hejazi, K., Falconer, R.A. and Seifi, E., 2016. Denoising and despiking ADV velocity and salinity concentration data in turbulent stratified flows. *Flow Measurement and Instrumentation*, 52: 83-91.
- Holland, C.W. and Nielsen, P., 2022. Ocean acoustic boundary characterization multi-national experiments. *Journal of the Acoustical Society of America*, 151: A138-A138.
- Hosseini, S.A., Shamsai, A. and Ataie-Ashtiani, B., 2006. Synchronous measurements of the velocity and concentration in low density

26. Sequeiros, O.E., Cantelli, A., Viparelli, E., White, J.D.L., García, M.H. and Parker, G., 2009. Modeling turbidity currents with nonuniform sediment and reverse buoyancy. *Water Resources Research*, 45. <https://doi.org/10.1029/2008WR007422>
27. Shellenbarger, G.G., Wright, S.A. and Schoellhamer, D.H., 2013. A sediment budget for the southern reach in San Francisco Bay, CA: Implications for habitat restoration. *Marine Geology*. 345: 281-293.
28. SonTek., 1997. SonTek Doppler current meters- Using signal strength data to monitors suspended sediment concentration. *SonTek San Diego*.
29. Voulgaris, G. and Meyers, S.T., 2004. Temporal variability of hydrodynamics, sediment concentration and sediment settling velocity in a tidal creek. *Continental Shelf Research*, 24: 1659-1683.
21. Nortek, A., 2001. Monitoring sediment concentration with acoustic backscattering instruments. *Nortek Technical Note*, 3: 1-5.
22. Öztürk, M., 2017. Sediment Size Effects in Acoustic Doppler Velocimeter-Derived Estimates of Suspended Sediment Concentration. *Water*, 9, 529. <https://doi.org/10.3390/w9070529>
23. Poleto, C. and Charlesworth, S., 2010. Sedimentology of aqueous systems. Wiley-Blackwell, Chichester, West Sussex, UK Hoboken, NJ.
24. Pomázi, F. and Baranya, S., 2020. Comparative Assessment of Fluvial Suspended Sediment Concentration Analysis Methods. *Water*, 12, 873. <https://doi.org/10.3390/w12030873>.
25. Sahin, C., Ozturk, M. and Aydogan, B., 2020. Acoustic doppler velocimeter backscatter for suspended sediment measurements: Effects of sediment size and attenuation. *Applied Ocean Research*, 94, 101975. <https://doi.org/10.1016/j.apor.2019.101975>.

