

«یادداشت تحقیقاتی»

بررسی خصوصیات هیدرولیکی جریان در فلوم دوار با استفاده از سرعتسنج صوتی (ADV)

میلاذ خواستار بروجنی^{۱*}، حسین صمدی بروجنی^{۲*}

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد سازه‌های آبی دانشگاه فردوسی مشهد

۲- استادیار گروه مهندسی آب و رئیس مرکز تحقیقات منابع آب دانشگاه شهرکرد

* شهرکرد، صندوق پستی 115

Samadi153@yahoo.com

چکیده - فلوم دوار ابزار مفیدی برای مطالعه رسوبهای چسبنده است، اما خطاهای ناشی از جریانهای ثانویه باید در آن مورد توجه و مطالعه قرار گیرد. پژوهش حاضر در فلوم دوار آزمایشگاه هیدرولیک دانشگاه شهرکرد برای بررسی توزیع تنشبرشی انجام شد. نتایج اندازه‌گیری سرعت با استفاده از سرعتسنج صوتی نشان داد که اگر نسبت سرعت چرخش حلقه بالایی به سرعت چرخش فلوم برابر ۱/۱ باشد، توزیع تنشبرشی در عرض فلوم تقریباً یکنواخت است و مشخص شد که پروفیل سرعت در فلوم دوار در حد قابل قبولی شبیه به رابطه لگاریتمی سرعت است.

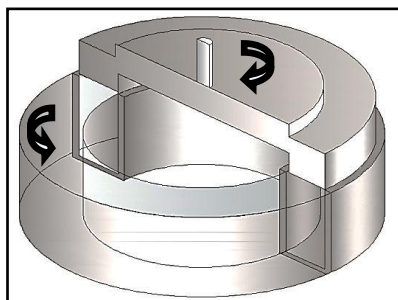
کلیدواژگان: فلوم دوار، تنشبرشی، رسوبات چسبنده، سرعتسنجصوتی.

۱- مقدمه

نیاز به پمپ باعث میشود که در فرایند همآوری رسوبهای چسبنده اختلال ایجاد شود و این نیز استفاده از فلومهای مستقیم را ناممکن می‌سازد (Huang et al., 2006). لذا محققان بسیاری برای حل این مشکل و برطرف ساختن این محدودیت، به ساخت فلوم دوار پرداخته‌اند و با چرخش این فلومها، تنشبرشی و سرعت مورد نیاز را به وجود آورده‌اند (کریشناپان و انجل، ۲۰۰۴، پارتندیس و همکاران، ۱۹۹۶، مهتا و پارتندیس، ۱۹۷۳). این محققان در بررسیهای خود در فلوم دوار به این نتیجه رسیده‌اند که توزیع سرعت و تنش برسی در فلوم دوار شباهت لازم را با جریان آب در کانالهای باز دارد.

استفاده از فلومهای معمول آزمایشگاهی که به صورت مستقیم طراحی و ساخته میشوند برای مطالعات حرکت رسوبهای چسبنده مناسب نیست، زیرا فرایندهای همآوری ذرات رسوبی چسبنده و تغییر وضعیت آنها از حالت معلق به ته‌نشینی یا برعکس، به زمان و در نتیجه پیمایش طول زیاد مسیر نیاز دارد. محدودیت در طول فلومهای مستقیم با توجه به محدودیت فضای آزمایش گاهی مانع از آن می‌شود که در این گونه فلومها بتوان به درستی حرکت رسوبهای چسبنده را مطالعه کرد. حتی اگر این محدودیت با چرخشی کردن جریان در فلوم مستقیم بر طرف شود،

جریانهای ثانویه در فلوم مطالعه و تمهیداتی در نظر گرفته شود تا این مسأله باعث بروز خطاهایی نشود. این جریانهای ثانویه باعث توزیع ناهمگون تنشبرشی در جهت شعاعی می‌شود. این نوع جریانها سبب میشود که ذرات جابهجا شده در منطقه جریان، تنشبرشی متفاوتی داشته باشد (کانترو و همکاران، ۲۰۰۴).



شکل ۱ نمای شماتیک فلوم دوار

مطالعات محققان مختلف نشان داده است که تنشبرشی بستر، مهمترین نقش را در انتقال رسوبهای چسبنده در محیط آبی دارد. بنابراین اطلاع از تغییرات تنشبرشی بستر به عنوان تابعی از سرعت دوران فلوم و همچنین تغییرات تنشبرشی در عرض فلوم برای استفاده مناسب از فلوم دوار در مطالعات مربوط به انتقال رسوبهای چسبنده، ضروری است (Krishnappan and Engel, 2004). پارتندیس و همکاران (۱۹۹۶) و مهتا و پارتندیس (۱۹۷۳) اظهار کردند که در فلوم دوار، اگر فقط حلقه برای چرخش جریان بچرخد، چرخشهای ثانویه ناشی از نیروی گریز از مرکز قابل توجه بوده و از این رو مناسب بودن این مجموعه برای مطالعات پایه دینامیک رسوبهای چسبنده مورد تردید است. در حالیکه با چرخش فلوم و حلقه در جهت مخالف میتوان جریانهای ثانویه را در فلوم به کمترین سطح رسانید تا ته نشینی رسوبها در سراسر فلوم به صورت یکنواخت صورت گیرد. زمانی که فلوم و حلقه در جهت مخالف یکدیگر به چرخش درآیند، سیال به سمت حلقه و نزدیک بستر فلوم حرکت می‌کند و

بدیهی است که هر چه زمان گردش این گونه فلومها بیشتر باشد، مانند آن است که از فلوم با طول بیشتری استفاده شده باشد. بدینترتیب محدودیت فلومهای مستقیم برطرف میشود. اما سؤال مهم این است که توزیع تنشبرشی و سرعت جریان در فلوم دوار، به دلیل دایره‌ای بودن مسیر و امکان ایجاد جریانهای ثانویه، تا چه اندازه به وضعیت فلوم مستقیم نزدیک است و آیا میتوان نتایج بررسی فلوم دایره‌ای را به کانالهای مستقیم تعمیم داد؟ در چهار دهه اخیر فلومهای دوار با قطرهای گوناگون (۱ تا ۷ متر) و مقطع مستطیلی ساخته شده‌اند. این فلومها شامل کانال و درپوشی (حلقه بالائی) است که در داخل فلوم طراحی شده و با سیال در تماس است. فلوم و درپوش دارای الکتروموتور جداگانه هستند. الکتروموتورها، قابلیت چرخش فلوم و حلقه در سرعتها و جهت‌های مختلف را فراهم میکند. چرخش حلقه بالایی و فلوم در جهت مخالف علاوه بر اینکه باعث ایجاد جریان میشود و نیاز به پمپ را بر طرف می‌سازد، سبب به حداقل رساندن جریانهای ثانویه و نیروی گریز از مرکز حاصل از چرخش فلوم نیز میشود. بنابراین، جریان تولید شده در داخل فلوم به خوبی گسترش یافته و سبب توزیع یکنواخت تنشبرشی در جهت جریان می‌شود.

فلومهایی که از فلز ساخته میشوند باید مجهز به پنجره‌های پلکسیگلاس برای مشاهده جریان باشند. یکی از اجزای مهم این فلومها شیرهای کوچک نمونه‌برداری از جریان برای تعیین غلظت است. کاربرد ابزار جدید اندازه‌گیری سرعت، غلظت، توزیع تنشبرشی و دانه‌بندی ذرات نیز در سالهای اخیر مرسوم شده است (Cofalla et al., 2010; Huang et al., 2006; Cantero et al. 2004; Krishnappan and Engel, 2004; Krishnappan, 1993). طرح‌واره فلوم دوار در شکل ۱ نشان داده شده است. استفاده از ابزار دقیق اندازه‌گیری برای حصول نتایج دقیق در آزمایشها کافی نیست و لازم است امکان ایجاد

انجل، ۲۰۰۴). سرعت نسبی حلقه و فلوم وابسته به فلوم بوده و از رابطه زیر به دست می آید:

$$\alpha = \frac{N_r}{N_f} \quad (1)$$

N_r سرعت چرخش درپوش، N_f سرعت چرخش فلوم و α نسبت سرعت چرخش حلقه نسبت به فلوم است. در تحقیق حاضر با ساخت فلوم دوار و با انجام اندازه گیریهای سرعت و تنش برشی جریان در آن سعی بر آن است که ویژگیها و خصوصیات هیدرولیکی جریان در فلوم مطالعه شود. نکته مهم آن است که در این تحقیق از نتایج اندازه گیری سرعت با دستگاه ADV برای به دست آوردن نسبت بهینه سرعت چرخش استفاده شده است. این کار توسط محققان دیگر با دستگاهها و روشهای دیگری انجام شده است.

۲- مواد و روشها

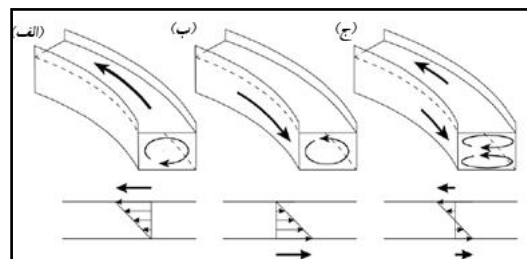
۲-۱- فلوم آزمایشگاهی

پژوهش حاضر در فلوم دوار آزمایشگاه هیدرولیک دانشگاه شهرکرد انجام شد. این فلوم دوار از ورق گالوانیزه با پنجره های پلکسیگلاس با عرض ۳۰ و ارتفاع ۴۷ سانتیمتر ساخته شده است. قطر داخلی، خارجی و متوسط این فلوم به ترتیب برابر ۱/۳، ۱/۹ و ۱/۶ متر است. حلقه ای از جنس پلکسیگلاس با قطر ۱/۶ متر در داخل فلوم طراحی شده که از دیوارهای فلوم دو سانتیمتر فاصله دارد. به منظور سنجش غلظت مواد معلق در ستون آب، تعداد ۱۶ شیر نمونه گیری در چهار موقعیت مختلف فلوم و در فواصل ۵/۳، ۱۰/۵، ۱۸/۳ و ۲۵ سانتی متری از کف نصب شده است.

وزن دستگاه توسط یک شاسی متشکل از یک شفت عمودی و چهار تیر آهن ۱۴ به طول ۸۰ سانتیمتر که به صورت عمودی به یکدیگر متصل شده اند، تحمل میشود. فلوم دو الکتروموتور مجزا برای چرخش فلوم و حلقه دارد که امکان حرکت در جهت های مختلف و خلاف یکدیگر را فراهم می سازد. چرخش فلوم با استفاده از

از این رو در دو جهت شروع به چرخش میکند و از بزرگی جریانهای ثانویه می کاهد (Krishnappan and Engel, 2004). شکل ۲ طرحواره ای را از توزیع تنش برشی در فلوم دوار نشان میدهد.

جریان ثانویه سبب ایجاد جریان روبه بالا در گوشه داخلی و جریان روبه پایین در گوشه خارجی میشود. در نزدیکی گوشه داخلی به علت τ_b کوچک، رسوبها ته نشین می شوند، در حالی که در نزدیکی گوشه خارجی ته نشینی به علت τ_b بزرگ انجام نمیشود (مآ و همکاران، ۲۰۰۸).



شکل ۲ جریانهای ثانویه در فلوم دوار، الف- فقط چرخش حلقه، ب- فقط چرخش فلوم، ج- چرخش فلوم و حلقه در خلاف جهت یکدیگر (Cofalla et al., 2010)

پارتندیس و همکاران (۱۹۶۶) نسبت سرعت مطلوب فلوم و حلقه را برای توزیع یکنواخت تنش برشی، از طریق ذرات پلاستیکی ته نشین شده در کف فلوم برای جریان تعیین کردند. آنان مشاهده کردند وقتی که فقط حلقه می چرخد ذرات پلاستیکی به سمت دیواره خارجی جمع میشوند و در حالتی که فلوم و حلقه در جهت مخالف یکدیگر می چرخند، ذرات در وسط فلوم قرار میگیرند. (Krishnappan and Engel (2004) نیز در توزیع تنش برشی در فلوم دوار دریافتند که نسبت سرعت چرخش رینگ به فلوم برای توزیع یکنواخت تنش برشی، به عمق جریان بستگی دارد.

اگر سرعت رینگ کمی بیشتر از سرعت چرخش فلوم باشد ($\alpha > 1$)، جریانهای ثانویه ناشی از نیروی گریز از مرکز به کمترین مقدار ممکن میرسد (کریشناپان و

الکتروموتوری با توان ۱/۵ کیلووات و حداکثر سرعت ۱۵۰۰ دور بر دقیقه و جعبه دنده تبدیل حرکت افقی به عمودی انجام می‌شود. با استفاده از زنجیر فولادی و چرخ دنده، نیروی جعبه دنده به حرکت دورانی فلوم تبدیل می‌شود. برای چرخاندن حلقه از الکتروموتور با توان ۰/۳۷ کیلووات و حداکثر سرعت ۱۳۴۰ دور بر دقیقه و جعبه دنده‌ای برای تبدیل حرکت افقی به عمودی استفاده شده است. حلقه پلکسیگلاس، ۱۲ پره به ارتفاع ۶ سانتی‌متر دارد که با قطعه‌ای منشوری شکل (با قاعده مربع) که در مرکز آن توسط شفت به جعبه دنده بالا متصل شده به حرکت درمی‌آید. حلقه امکان قرار گرفتن در موقعیتهای مختلف نسبت به فلوم را دارد و در مواقع پرکردن یا تخلیه کردن فلوم میتواند به طور کامل از فلوم جدا شود. شکل ۳ اجزای فلوم دوار را نشان میدهد.

بسیار زیاد بوده و اعداد غیر قابل استفاده است. سرعت سنج ADV به علت داشتن کابل، امکان قرار گرفتن در هر جهتی را دارد، اما در این صورت به انتقال محورهای مختصات نیاز است. به منظور کار با دستگاه به پایه‌ای نیاز است که امکان جابه‌جایی ADV را در عرض کانال میسر ساختند و همچنین امکان تغییر وضعیت را در ارتفاعات مختلف فراهم کند. در این حالت سرعت سنج نیز با فلوم می‌چرخد. از آنجا که سرعت هر نقطه، از میانگینگیری تعداد زیادی سرعت به دست می‌آید، خطای اندازه‌گیری کاهش می‌یابد. در تحقیق حاضر اندازه‌گیری‌ها با فرکانس ۲۰۰ Hz و در مدت یک دقیقه صورت گرفت، بنابراین سرعت متوسط نقطه‌ای (u, v, w) از میانگین $12000 = 60 \times 200$ سرعت لحظه‌ای برای هر نقطه به صورت زیر محاسبه می‌شود.

$$u = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N u_i \quad (2)$$

که در آن N برابر با ۱۲۰۰۰ است. به منظور فیلتر کردن داده‌های ثبت شده و به دست آوردن سرعت متوسط، از نرم افزار WinADV32 استفاده شد. شکل ۴ نحوه قرارگیری سرعت‌سنج در فلوم و اتصال به کامپیوتر را نشان میدهد.

۲-۳- طراحی آزمایشها

با توجه به اهداف تحقیق، آزمایشها برای پنج اختلاف سرعت نسبی فلوم و حلقه و برای چهار نسبت سرعت چرخش حلقه به فلوم (۱/۳، ۱/۲، ۱/۱، ۱) انجام و در این آزمایشها توزیع سرعت و تنشبرشی مطالعه شد. اندازه‌گیری سرعت در پنج مقطع عمودی انجام شد که اولین مقطع عمودی در ۵ سانتیمتری دیواره داخلی انتخاب و به سمت دیواره خارجی حرکت داده شد. در هر مقطع عمودی، چهار سرعت اندازه‌گیری میشود. در جدول ۱ شرایط آزمایش ارائه شده است. اندازه‌گیری‌ها در حالتی که عمق آب در فلوم برابر ۲۰ سانتی‌متر است، انجام شد.



شکل ۳ اجزای فلوم دوار

۲-۲- سرعت سنج صوتی

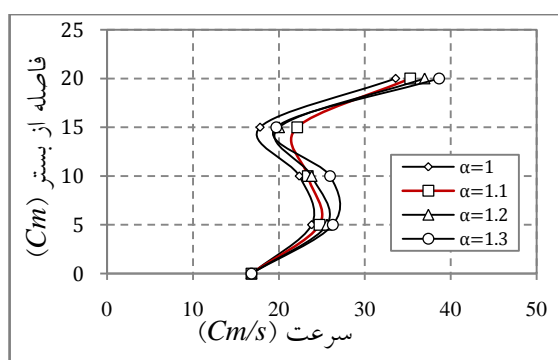
در این تحقیق از سرعت‌سنج ADV^۱ مدل Vectrino⁺ استفاده شد که چهار گیرنده و یک فرستنده دارد که در هنگام اندازه‌گیری حتماً باید در داخل آب قرار داشته باشند. در صورت بیرون ماندن آنها از آب، نویز دستگاه

1. Acoustic Doppler Velocimeter

جدول ۱ شرایط آزمایش برای اختلاف سرعت فلوم و حلقه

سرعت فلوم		$\alpha = 1/0$			$\alpha = 1/1$			$\alpha = 1/2$			$\alpha = 1/3$		
N_{Flume} (rpm)	V_{Flume} (m/s)	N_{Ring} (rpm)	V_{Ring} (m/s)	N_{F+N_R} (rpm)	N_{Ring} (m/s)	V_{Ring} (m/s)	N_{F+N_R} (rpm)	N_{Ring} (rpm)	V_{Ring} (m/s)	N_{F+N_R} (rpm)	N_{Ring} (rpm)	V_{Ring} (m/s)	N_{F+N_R} (rpm)
۱/۲	۰/۱۰	۱/۲	۰/۱۰	۲/۴	۱/۳	۰/۱۱	۲/۵	۱/۴	۰/۱۲	۲/۶	۱/۵	۰/۱۳	۲/۷
۱/۶	۰/۱۳	۱/۶	۰/۱۳	۳/۲	۱/۸	۰/۱۵	۳/۴	۱/۹	۰/۱۶	۳/۵	۲/۱	۰/۱۷	۳/۷
۲/۰	۰/۱۷	۲/۰	۰/۱۷	۴/۰	۲/۲	۰/۱۸	۴/۲	۲/۴	۰/۲۰	۴/۴	۲/۶	۰/۲۲	۴/۶
۲/۳	۰/۲۰	۲/۳	۰/۲۰	۴/۶	۲/۶	۰/۲۲	۴/۹	۲/۸	۰/۲۴	۵/۱	۳/۰	۰/۲۵	۵/۳
۲/۹	۰/۲۵	۲/۹	۰/۲۵	۵/۸	۳/۲	۰/۲۷	۶/۱	۳/۵	۰/۳۰	۶/۴	۳/۸	۰/۳۲	۶/۷

N_{F+N_R} : مجموع سرعت چرخشی فلوم و حلقه (دور بر دقیقه)



شکل ۵ پروفیل عمودی سرعت ($N_{Flume}=2/0$)



الف- نحوه قرارگیری سرعت سنج صوتی در کانال



ب- نحوه اتصال سرعت سنج به کامپیوتر در داخل فلوم

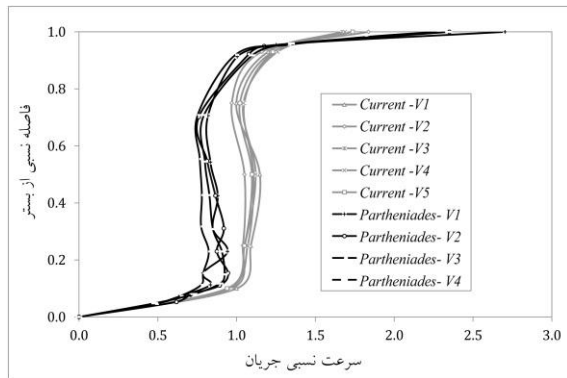
شکل ۴ بکارگیری سرعت سنج صوتی

نمودار به دست آمده کاملاً مشابه با نتایج کریشناپان (۱۹۹۴) است. نمودار شکل ۶ پروفیل سرعت در عرض فلوم را برای سرعت چرخش فلوم برابر ۲ دور بر دقیقه نشان می‌دهد. در جدول ۲ انحراف معیار سرعت عرضی به ازای مقادیر مختلف α آورده شده است. مشخص است که به ازای $\alpha = 1/1$ توزیع سرعت در عرض فلوم یکنواختی بیشتری داشته و کم‌ترین انحراف معیار را نسبت به حالت‌های دیگر دارد. این بدان معنا است که توزیع تنش‌برشی در عرض فلوم در این حالت نسبت به حالت‌های دیگر یکنواخت‌تر است.

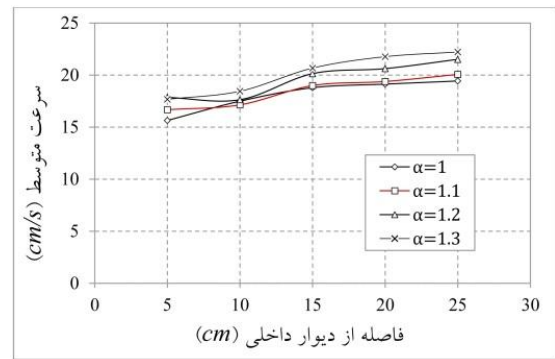
Krishnappan and Engel (2004) این نسبت را برای عمق ۱۲ سانتیمتری فلوم دواری در کانادا برابر ۱/۱۷ به دست آوردند. مشاهده می‌شود که تغییر سرعت در نزدیک دیوارها بسیار شدید و در قسمت مرکزی توزیع سرعت یکنواخت است.

۳- نتایج و بحث

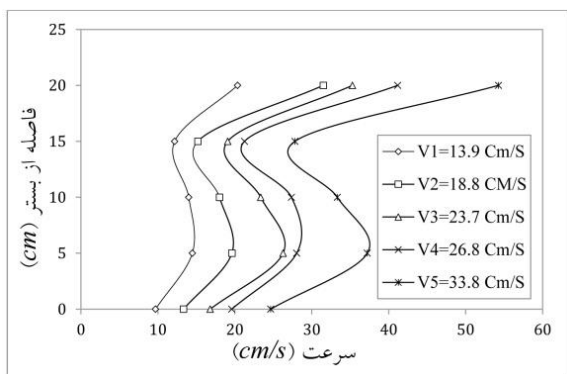
سرعت متوسط جریان با توجه به منطقه تأثیر سرعت‌های لحظه‌ای با توجه به محل اندازه‌گیری، به صورت وزنی محاسبه شد. شکل ۵ توزیع پروفیل عمودی سرعت را در عرض فلوم نشان می‌دهد. این نمودار برای سرعت چرخش ۲ دور بر دقیقه فلوم و سرعت‌های مختلف حلقه ترسیم شده است.



شکل ۷ پروفیل سرعت عمودی در فلوم دوار



شکل ۶ توزیع افقی سرعت متوسط (N_{Flume}=۲/۰)



شکل ۸ مقایسه پروفیل عمودی سرعت در تحقیق حاضر و

نتایج پارتندیس (۲۰۰۹)

با فاصله گرفتن از بستر و حلقه فلوم گرادیان سرعت تقریباً ناچیز است. توزیع سرعت عمودی در این آزمایش - ها با نتایج پارتندیس (۲۰۰۹) مطابقت دارد. شکل ۷ توزیع پروفیل عمودی سرعت تحقیق حاضر و نتایج پارتندیس (۲۰۰۹) را به صورت بی بعد نشان میدهد. با توجه به شکل ۷ میتوان استنباط کرد که ساختار جریان به طور شایسته‌ای مشابه جریان در کانالهای مستقیم بوده و پروفیل سرعت به صورت لگاریتمی است (Partheniades, 2009).

جدول ۲ انحراف معیار سرعت عرضی برای مقادیر مختلف α

سرعت فلوم	۱/۱۵ (rpm)	۱/۵۹ (rpm)	۲/۰۱ (rpm)	۲/۳۴ (rpm)	۲/۹۴ (rpm)
$\alpha = 1/0$	۰/۸۴	۱/۵۶	۱/۹۳	۲/۷۰	۲/۵۳
$\alpha = 1/1$	۰/۷۱	۱/۲۵	۱/۷۸	۱/۹۵	۲/۴۳
$\alpha = 1/2$	۰/۹۴	۱/۷۳	۲/۰۴	۲/۹۲	۲/۶۵
$\alpha = 1/3$	۱/۳۹	۲/۰۱	۲/۰۸	۳/۶۱	۳/۹۱

با توجه به این که سرعت در فلوم دوار دوبعدی است (کریشناپان و پترسن، ۱۹۹۴)، برای تعیین تنشبرشی در صفحه XZ متناظر با هر سرعت، از کواریانس سرعتی لحظه‌ای استفاده شد (پارتندیس، ۲۰۰۹):

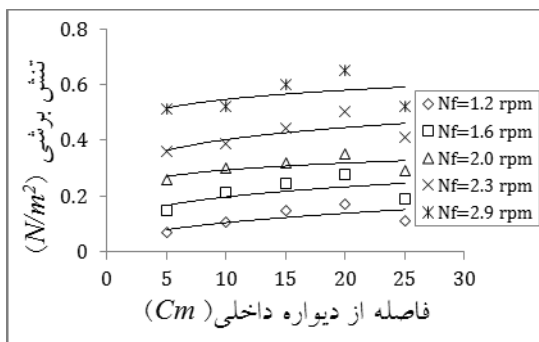
$$\tau = \rho \overline{V'_x V'_z} = \rho \left(\frac{\sum V'_x V'_z}{n-1} - \frac{\sum V'_x \sum V'_z}{n(n-1)} \right) \quad (3)$$

V'_x ، V'_z به ترتیب، نوسانهای سرعت در جهت‌های X و Z ، و n تعداد نمونهها است. جدول ۲ تنش برشی را برای تمامی سرعتها نشان می‌دهد.

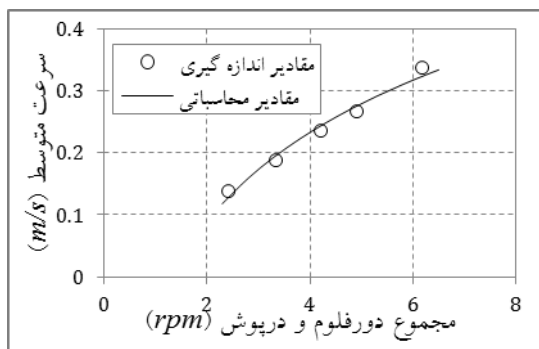
در ادامه بررسیهای توزیع تنشبرشی در عرض فلوم مشخص شد که برای $\alpha = 1/1$ توزیع تنشبرشی در عرض فلوم نسبت به مقادیر دیگر α از یکنواختی بیشتری برخوردار است. کریشناپان و انجل (۲۰۰۴) نیز در مطالعه توزیع تنشبرشی در فلوم دوار با استفاده از لوله پرستن

در شکل ۸ پنج پروفیل عمودی سرعت در فلوم برای $\alpha = 1/1$ ترسیم شده است. همان‌طور که دیده می‌شود پروفیل سرعت عمودی در نزدیکی بستر برای تمامی سرعتها، نخست افزایش و سپس کاهش مییابد. توجه شود که در شکل ۸، سرعت جریان در بستر فلوم برابر با سرعت چرخش فلوم در نظر گرفته شده است. این تناقضی با شباهت پروفیل سرعت فلوم دوار و کانالهای باز ندارد، زیرا بستر فلوم نسبت به خود فلوم ساکن است.

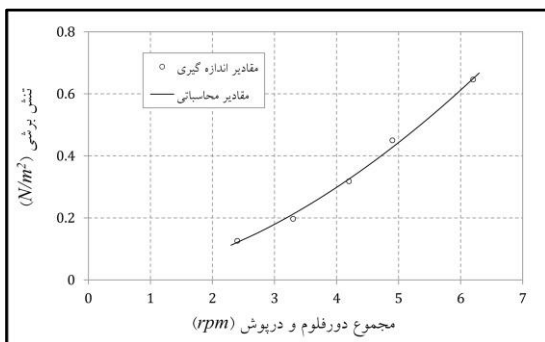
در این رابطه V سرعت متوسط جریان (متر بو ثانیه) و ω مجموع سرعت چرخشی فلوم و درپوش (دور ب ر دقیقه) است. شکل ۱۲ رابطه بین مقادیر محاسباتی و اندازه‌گیری را نشان می‌دهد.



شکل ۱۰ توزیع افقی تنش برشی متوسط در عرض فلوم



شکل ۱۱ رابطه بین سرعت متوسط جریان و سرعت چرخش فلوم و حلقه



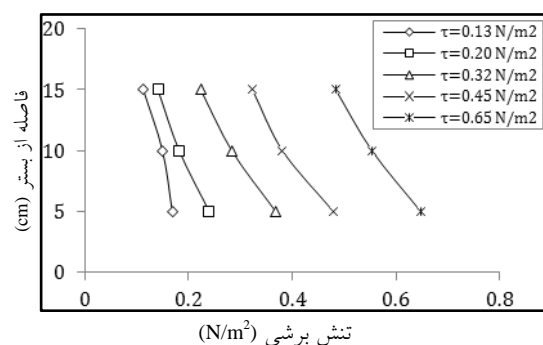
شکل ۱۲ رابطه تنش‌برشی جریان و سرعت چرخش فلوم و حلقه

(ابزار اندازه‌گیری مستقیم تنش‌برشی) و معادلات دینامیک سیالات دریافتند که در حالتی که سرعت حلقه نسبت به سرعت چرخشی فلوم کمی بیشتر باشد، توزیع تنش برشی در عرض از یکنواختی بیشتری برخوردار است. شکل ۹ پروفیل عمودی تنش برشی را نشان می‌دهد.

در شکل ۱۰ تنش‌برشی در میان فلوم بیشتر از دیوارها است و به سمت هر یک از دیوارهای داخلی و خارجی کاهش می‌یابد. این کاهش در نزدیک دیوارهای خارجی نسبت به دیواره داخلی بیشتر است. عدم تقارن ممکن است به دلیل وجود جریان گردشی کوچک در نزدیکی دیواره خارجی باشد. برای تنش‌های کوچک‌تر تغییرات تنش‌برشی کمتر است. رابطه بین مقادیر محاسباتی و اندازه‌گیری در شکل ۱۱ قابل مشاهده است.

جدول ۲ تنش برشی ($\frac{N}{m^2}$) متناظر با سرعت چرخش فلوم

سرعت فلوم	۱/۱۵ (rpm)	۱/۵۹ (rpm)	۲/۰۱ (rpm)	۲/۳۴ (rpm)	۲/۹۴ (rpm)
$\alpha = 1/10$	۰/۱۱	۰/۱۸	۰/۲۷	۰/۳۶	۰/۶۶
$\alpha = 1/11$	۰/۱۳	۰/۲	۰/۳۲	۰/۴۵	۰/۶۵
$\alpha = 1/12$	۰/۱۳	۰/۲۵	۰/۳۷	۰/۴۸	۰/۷
$\alpha = 1/13$	۰/۱۴	۰/۲۷	۰/۴۱	۰/۵۷	۰/۷۷



شکل ۹ توزیع عمودی تنش برشی متوسط

براساس این نتایج، رابطه بین سرعت چرخشی فلوم و سرعت جریان به دست آمد:

$$V=0.2085 \ln(\omega)-0.0556 \quad R^2=0.98 \quad (4)$$

V	سرعت جریان
V_x'	نوسان سرعت در جهت X
V_z'	نوسان سرعت در جهت Z
τ_b	تنشبرشی بستر

بر اساس نتایج حاصل از توزیع تنشبرشی بستر رابطه زیر بین تنشبرشی و مجموع دور فلوم و حلقه به دست آمد.

$$\tau = 0.0254\omega^{1.1777} \quad R^2 = 0.99 \quad (5)$$

در این رابطه، τ تنش برشی متوسط جریان ($\frac{N}{m^2}$) و ω مجموع سرعت چرخشی فلوم و حلقه (دور بر دقیقه) است. هوکیانگها (۲۰۰۸) نیز در تحقیقات خود، رابطه بین تنشبرشی و سرعت چرخش فلوم دوار را به صورت نمایی به دست آورد.

توجه شود که روابط (۴) و (۵) در محدوده مجموع سرعت فلوم و حلقه، ۲ تا ۳۰ دور بر دقیقه برقرارند.

۴- نتیجه گیری

از پژوهش انجام شده نتایج زیر را میتوان استخراج کرد. نتایج برای فلوم تحقیق حاضر با عمق ۲۰ سانتیمتر نشان میدهد که مقدار $\alpha = 1/1$ (نسبت سرعت چرخش حلقه به فلوم) بهترین حالتی است که پروفیل سرعت در قسمت مرکزی فلوم یکسان است. در این حالت پروفیل سرعت در فلوم دوار مشابه با کانالهای باز و به صورت لگاریتمی است. لذا میتوان نتایج به دست آمده از فلوم دوار را به کانالهای مستقیم تعمیم داد. خطوط هم سرعت نشان میدهد که در کف فلوم و در نزدیکی حلقه، خطوط تقریباً موازی هستند و از این رو میتوان نتیجه گرفت که تنش برشی در عرض فلوم تقریباً یکنواخت است. در فلوم، مقادیر تنشبرشی به سمت بستر افزایش مییابد. مشخص شد که با افزایش سرعت چرخش فلوم و حلقه، سرعت متوسط و تنشبرشی جریان به ترتیب به صورت لگاریتمی و نمایی، افزایش مییابد.

۵- فهرست علائم

α	نسبت سرعت چرخش درپوش به فلوم
N_f	سرعت چرخش فلوم
N_r	سرعت چرخش حلقه

۶- منابع

خواستار بروجنی، م.، ۱۳۹۰. "بررسی آزمایشگاهی تاثیر پساب در فلوکوله شدن رسوبات چسبیده در کانالهای انتقال آب"، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه فردوسی مشهد.

Amelia V.C.M. Teixeira, C.F.J., and Senhorinha. Teixeira, F.C.F.S. (2010). Physical characterization of estuarine sediments in the northern coast of Portugal. *Journal of Coastal Research*, 26, 2, pp. 301-311.

Cofalla, C., Roger, S., Brinkmann, M., Hudjetz, S., Hollert, H. and Schuttrumpf, H. (2010). Flood search- hydrtoxic investigations of contaminated sediments in an annular flume. PANIK MMX Congress Liverpool, UK, p. 14.

Cantero, M., Mangini, S., Pedocchi, F. and Garcia M. (2004). Analysis of flow characteristics in an annular flume: Implication for erosion and deposition for cohesive sediment, World Water and Environmental Resources Congress, Salt Lake City, Utah, USA, pp. 314-314.

Ha, K.H. (2008). Acoustic measurements of cohesive sediment transport: suspension to consolidation. Ph.D. dissertation, University Park, Pennsylvania, p. 152.

Haralampides, K., McCorquodale, A. and Krishnappan, B. G. (2003). Deposition properties of fine sediment, *Journal of Coastal Research*, 26(2), pp. 301-311.

Huang, J., Hilldate, R.C. and Greiman, B.P. (2006). Erosion and sedimentation manual. U.S. Department of the Interior, United States Bureau of Reclamation, 4-42.

Krishnappan, B.G. (1993). Rotating circular flume. *Journal of Hydraulics Engineering (ASCE)*, Vol. 119, No. 6, pp. 758-767.

Krishnappan, B.G. (2000). Modeling cohesive sediment transport in rivers. The Role of Erosion and Sediment in Nutrient and Contaminant Transfer, Proceedings of symposium held at Waterloo, Canada, pp. 269-276.

Krishnappan, B.G. (2006). Cohesive sediment

Vol. 130, No. 4, pp. 324-331.

Milburn, D. and Krishnappan, B.G. (2001). Modeling erosion and deposition of cohesive sediment from Hay river, Northwest Territories, Canada. Paper presented at the 13th Northern Res. Basins Workshop, Aug., pp. 19-24.

Partheniades, E. (2009). *Cohesive Sediments In Open Channels*, Elsevier Inc., p. 358.

transport studies using a rotating circular flume. 7th Int. Conf. on Hydrosience and Engineering (ICHE), Sep. 10-13, Philadelphia, USA.

Krishnappan, B.G. and Engel, P. (1994). Critical shear stresses for erosion and deposition of fine suspended sediments in the Fraser River, Environment Canada.

Krishnappan, B.G. and Engel, P. (2004). Distribution of bed shear stress in rotating circular flume. *Journal of Hydraulic Engineering (ASCE)*,