

اثر ضخامت و تعداد مانع‌های نفوذپذیر بر کنترل و تله‌اندازی جریان غلیظ

علیرضا جهانگیر^۱، کاظم اسماعیلی^{۲*}، محمود فغفور مغربی^۳

۱) دانشجوی دکتری سازه‌های آبی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران

۲*) دانشیار گروه مهندسی آب دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران

* نویسنده مسئول مکاتبات: esmaili@um.ac.ir

۳) استاد گروه مهندسی عمران دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۰۵/۰۵

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۰۳/۱۳

چکیده:

شناخت و بررسی جریان سیلابی رودخانه‌ها که در بیشتر موردها از نوع جریان غلیظ است، می‌تواند به کاهش اثرهای نامطلوب رسوب‌گذاری کمک کند. برای این منظور، ایجاد مانع‌ها در بستر جریان موثر خواهد بود. در این مقاله به‌صورت آزمایشگاهی، اثر ضخامت (بعد) و لایه‌ی دوم موانع نفوذپذیر بر کنترل و تله‌اندازی جریان غلیظ مورد ارزیابی قرار گرفته است. برای این منظور، از دو گونه مانع‌های شیاری و حفره‌ای دارای شیاری و قطر حفره‌هایی برابر با ۳ میلی‌متر و ساخته‌شده از صفحات پلاکسی گلاس بهره‌جویی شده است. جریان غلیظ با اضافه کردن یک پلیمر نامحلول و معلق از جنس پلی استایرن انبساطی با میانگین قطر ۱/۱۵ میلی‌متر و چگالی ۱/۱۳۵ گرم در لیتر ایجاد شد. در انجام آزمایش‌ها از دو غلظت متفاوت (۱۰ و ۲۰ درصد)، پنج تخلخل گوناگون، چهار زاویه‌ی مختلف، چهار ضخامت متفاوت و با دو لایه مانع بهره‌جویی شد. نتیجه‌ها نشان دادند روند عبور جریان غلیظ دارای تخلخل ۱۰ درصد از مانع شیاری با افزایش ضخامت بیشتر می‌شود. لایه‌ی دوم مانع‌ها باعث افزایش روند عبور مواد از هر دو مانع‌های شیاری و حفره‌ای شده است. میزان این افزایش در نوع شیاری برابر ۱/۹۶ و نوع حفره‌ای برابر ۲/۳۴ ثبت شد. بررسی‌ها نشان دادند که فاصله‌ی بهینه مانع دوم از اول معادل ۲/۲۵ متر می‌باشد. بر مبنای نتیجه‌ها، در شرایط مشابه، همواره موانع حفره‌ای عملکرد بهتری از موانع شیاری دارند.

کلید واژه‌ها: جریان غلیظ؛ رسوب‌گذاری معلق؛ ضخامت مانع؛ لایه‌ی دوم مانع؛ مانع نفوذپذیر

مقدمه

رسوبات اختصاص می‌یابد (Eghbalzadeh and Javan, 2011). از این رو، متخصصان و پژوهشگران جریان غلیظ را به عنوان منشا بیشتر رسوبات مورد بررسی قرار داده اند (Kneller, 2016, Barahmand, and Shamsai, 2010). Meiburg and Nasr- و Baghalian and Ghodsian, 2017 (Azadani, 2018). بیشتر رسوبات در جریان سیلابی و بصورت یک جریان غلیظ^۱ اتفاق می‌افتد. از ورود یک

از مسایل مهم و پیچیده مربوط به سازه‌های آبی تأثیر فرایند و پدیده‌ی رسوب‌گذاری جریان در مسیر رودخانه شمار می‌رود. ایجاد اختلال در کارکرد صحیح سازه‌ها و اشغال بخشی قابل توجهی از حجم مخازن سدها از مهم‌ترین پیامدهای این پدیده می‌توان اشاره کرد. طبق گزارش‌های موجود، در دنیا سالانه به‌طور میانگین ۰/۵ تا یک درصد از حجم مفید مخازن سدها و ۰/۸ در ایران به

^۱ Density Current

به ۷۰ تا ۸۰ و حتی بیش از ۹۰ درصد کل رسوبات می‌رسد، شناخت و بررسی این نوع جریان‌ها از جایگاه ویژه‌ای برخوردار است. به این منظور، بررسی تجربی این فرایند با استفاده از ابزارهای آزمایشگاهی نقش بسزایی در شناخت رفتار و کارایی روش‌های پیشنهادی ایفا می‌کند که در برخی از پژوهش‌های پیشین مورد بررسی قرار گرفته‌اند. De Cesare و همکاران (De Cesare et al., 2008) عبور جریان غلیظ از مانع‌های مختلف را به صورت آزمایشگاهی و تحلیل‌های عددی مورد ارزیابی قرار دادند. آن‌ها پروفیل سرعت قائم درون جریان غلیظ را به کمک سرعت‌سنج‌های صوتی اندازه‌گیری کردند. بررسی‌های آن‌ها نشان داد که می‌توان جریان غلیظ را به طور موثر از طریق اقدامات سازه‌ای طراحی کرد. در پژوهش آن‌ها، بر اساس نتایج آزمایش‌های فیزیکی و شبیه‌سازی‌های عددی، برخی توصیه‌های طراحی برای موانع نفوذناپذیر و نفوذپذیر ارائه شده است. در پژوهشی دیگر، Asghari و Pari و همکارانش (Asghari Pari et al., 2010) با مطالعه‌ی اثر ارتفاع مانع بر کنترل جریان‌های غلیظ با غلظت و دبی مختلف، منحنی‌های سرعت بدنه جریان و غلظت را ارائه کردند. آن‌ها نتیجه گرفتند که ارتفاع بیشتر بر کنترل جریان موثرتر است و همچنین در غلظت‌های بالاتر، تاثیر بر سرعت و کنترل رسوب جریان بیشتر است. علاوه بر آن، در پژوهش آن‌ها، برای کنترل کامل جریان، ارتفاع مانع ۲ تا ۲/۷۵ برابر ارتفاع بدنه‌ی جریان توصیه شد. Schleich و Oehy (۲۰۰۷) به تاثیر ایجاد موانع مختلف بر کنترل جریان غلیظ در مخازن سدها پرداخته و نتیجه گرفتند که وضعیت زیربحرانی و عدم روگذری جریان از مانع مناسب تر است. ایشان تخلخل ۳۶ تا ۴۱ درصد موانع و قطر ذرات ۰/۵ تا ۱/۲ میلیمتر را مناسب دانستند. Kordnaeij و همکاران (۲۰۱۸) با هدف مقایسه آزمایشگاهی اثر مانع متخلخل و مانع پلکانی متخلخل در کنترل جریان غلیظ از مانع متخلخل به عنوان یک مانع نفوذپذیر با چینه‌های ریاضی در دو شیب ۰ و ۲/۵ درصد

سیال با چگالی بالاتر به درون سیال سبک‌تر جریان غلیظ پدیدار می‌شود (Hu et al., 2012). با این عمل اختلاف چگالی بین لایه‌های سیال باعث گردیدن چگالی افقی شده و نیروی اصلی رانش جریان را بوجود می‌آورد. به این فرآیند جریان ثقیلی^۱ اطلاق می‌شود. اختلاف چگالی ممکن است ناشی از تفاوت درجه حرارت (حدود ۲ کیلوگرم در مترمکعب)، وجود مواد محلول (حدود ۲۰ کیلوگرم در مترمکعب) و یا ذرات نامحلول معلق (حدود ۲۰ تا ۱۳۰ کیلوگرم در مترمکعب) باشد. به جریان منشا شده از مواد معلق در اصلاح، جریان گل آلود^۲ نیز گفته می‌شود (Vladimirov et al., 2015). در بررسی جریان غلیظ به طور معمول سه عامل سیال محیطی، سیال چگال و بستر (از نظر شکل، زبری و وجود موانع) از اهمیت بالاتری برخوردار است (Farizan et al., 2019). بر اساس اینکه جریان غلیظ نقش و تاثیر قابل توجه بر روند رسوب‌گذاری جریان سیلابی در مسیر رودخانه و منتهی به مخازن سدها دارد، شناخت و بررسی این نوع جریان‌ها اهمیت زیادی پیدا کرده است.

با توجه به اهمیت موضوع طی سالیان اخیر، با هدف کنترل و تله‌اندازی رسوبات در مسیر جریان روش‌های مختلفی مبتنی بر ایجاد و ساخت سازه‌ها ارائه شده است (Chamoun et al., 2016 و Asghari Pari et al., 2017). استفاده از موانع در مسیر رودخانه در بالادست سازه‌های اصلی و مخازن سدها از جمله ابزارهای کارآمد کنترل رسوبات به حساب می‌آید. موانع متشکل از صفحات ساده بدون نفوذپذیری و یا صفحات نفوذپذیر هستند که موانع نفوذپذیر به سبب قابلیت عبور بخشی از جریان و کاهش فشار مربوطه نسبت به موانع نفوذناپذیر، رواج و کارایی بیشتری دارند (Yaghoubi, et al., 2016; Keshtkar et al., 2017). از آنجا که بخش عمده‌ای از رسوبات مربوط به بار معلق جریان سیلاب‌ها است و طبق بیشتر گزارش‌ها

¹ Gravity Current

² Turbidity Current

پژوهش آن‌ها، از مخلوط آب و آرد سیلیکا، با توجه به مقادیر اولیه‌ی غلظت رسوب‌گذاری معلق برای تولید جریان غلیظ، استفاده شد. نتیجه‌ها نشان دادند که سرعت جریان با افزایش ارتفاع مانع کاهش پیدا می‌کند در حالی که نسبت ویژگی‌های مختلف در پروفیل سرعت ثابت باقی می‌ماند. در برخی از دیگر پژوهش‌ها مانند پژوهش Nogueira و همکاران (۲۰۱۲)، ویژگی‌های دینامیکی جریان‌های غلیظ را روی بستری زیر به‌صورت آزمایشگاهی مورد ارزیابی قرار دادند. آن‌ها از افزودن آب دریا برای ایجاد جریان غلیظ بهره جستند. میزان زبری بستر، میزان چگالی آب دریای ورودی، طول افزونه‌ی آب دریا و عمق آب، از عامل‌های مورد مطالعه در پژوهش آن‌ها بودند. آن‌ها از فن‌آوری تصویربرداری برای دستیابی به ویژگی‌های مکانیکی جریان استفاده کردند. همگرایی عدد فرود در بالادست نشان داد که ویژگی‌های مکانیکی جریان به کمک متغیرهای محلی در بالادست تعیین می‌شوند. نتیجه‌ی دیگر بررسی آن‌ها، افزایش زمان تناوب چرخه‌های بازگشتی جریان با افزایش زبری بستر بود. Janocko و همکارانش (۲۰۱۳) بر روی بسیاری از نتیجه‌های آزمایشگاهی پیشین در مورد جریان‌های موجود در کانال‌هایی با دیواره‌های جامد مطالعه کردند. پژوهش آن‌ها نشان می‌دهد که شبیه‌سازی‌های عددی می‌توانند بینش‌های جدید قابل توجهی را در فرایندهای رسوب‌گذاری در کانال‌های زیر دریایی ارائه دهند. آن‌ها به این نتیجه رسیدند که برتری شبیه‌سازی‌های عددی این است که امکان پایش تمامی عامل‌های هیدرولیکی در جریان‌های غلیظ و واکنش‌های آن به توپوگرافی سه‌بعدی جداره‌ها در طول مدت جریان کامل را فراهم می‌کنند. این شبیه‌سازی‌ها، هنگامی که با جریان‌های آزمایشگاهی تنظیم شوند، می‌توانند درک کامل‌تری از جریان‌های آزمایشگاهی و جریان‌های غلیظ طبیعی را نتیجه دهند. در پژوهش Yaghubi و همکارانش (۲۰۱۳) اثر غلظت ورودی بر رفتار جریان در حضور دو مانع متوالی به

و دبی ورودی به مقدار ثابت 0.7 لیتر در ثانیه و غلظت جریان 20 گرم بر لیتر استفاده کردند. اندازه‌گیری غلظت جریان در بالادست و پایین دست مانع با استفاده از نمونه‌گیر سیفونی انجام شد. نتایج بررسی‌ها نشان داد که مانع متخلخل از مانع متخلخل پلکانی عملکرد بهتری داشته و مقدار بیشتری از دبی رسوبی را کاهش داده است. Asghari Pari و همکاران (۲۰۱۵ و ۲۰۱۶) اثر زاویه بالادست مانع و عمق آب مخزن را در کنترل جریان غلیظ بصورت عددی بررسی کردند. ایشان از نرم افزار ANSYS-CFX استفاده و ابراز کردند در جریان‌های زیربحرانی و فوق بحرانی عملکرد مانع با افزایش ارتفاع سطح آب مخزن کاهش می‌یابد. از اینرو هرچه ارتفاع مانع بیشتر شود تاثیر عمق آب کم و کنترل جریان بهبود می‌یابد. همچنین هرچه زاویه بالادست مانع بیشتر باشد میزان کنترل جریان توسط مانع بیشتر است (کنترل جریان زیربحرانی بهتر است). Habib Mohammadi و همکاران (۲۰۱۶) اثر ارتفاع، شکل و محل قرارگیری موانع گابیونی در کنترل جریان غلظ رسوبی را بررسی کردند. به این منظور از دبی ثابت 0.7 لیتر بر ثانیه و غلظت ورودی 20 گرم در لیتر با دو شیب 0 و $2/5$ استفاده کردند. تخلخل موانع 35 درصد انتخاب و از دو نمونه گیر سیفونی غلظت قبل و بعد موانع استفاده شد. ایشان ابراز داشتند جریان بخشی از درون و بخشی از روی مانع عبور میکند و هر چه ارتفاع آن بیشتر و به ورودی نزدیکتر باشد باعث کاهش بیشتر سرعت و عملکرد بهتر میشود. همچنین در تمام حالات درصد کاهش سرعت و دبی رسوبی برای شیب صفر بیشتر و زمان و هزینه آن کمتر تعیین شد. Alves و Rossatto (۲۰۱۱) مجموعه‌ای از آزمایش‌ها را برای بررسی تاثیر موانع بر روی جریان‌های غلیظ، به‌ویژه در پروفیل‌های سرعت قائم و سرعت جریان انجام دادند. آن‌ها، دو مجموعه از آزمون‌ها را با ارتفاع‌های مختلف مانع در یک کانال به طول $16/45$ متر و 30 سانتیمتر عرض با دامنه‌های سطح متغیر برنامه‌ریزی کردند. در

پروفیل سرعت، مانع باعث انعکاس جریان می‌شود و منطقه‌ی بحرانی دیگری را علاوه بر دیواره‌ها در جریان ایجاد می‌کند و مقدار متوسط نرخ انتقال بار معلق در پایین دست مانع تا حدود ۹۲٪ کاهش می‌دهد.

از بررسی پژوهش‌های انجام گرفته چنین برمی‌آید که ارزیابی رفتار جریان‌های دارای بار معلق رسوبی در برخورد و عبور از موانع نفوذپذیر کمتر انجام و گزارش شده است. از این‌رو، این موضوع هنوز هم نیازمند بررسی‌های بیشتری است. برای این منظور، این مقاله به بررسی آزمایشگاهی اثر ضخامت (بعد) و لایه‌ی دوم موانع نفوذپذیر بر کنترل و تله‌اندازی جریان غلیظ می‌پردازد. بر اساس آزمون‌های انجام شده در این مقاله، روند تغییرات رسوب‌گذاری مواد معلق با تخلخل متفاوت موانع نفوذپذیر و به ازای دو غلظت جریان بررسی می‌شوند. به علاوه، روند عبور مواد از مانع‌ها با ضخامت‌های گوناگون مورد بررسی قرار می‌گیرند. در جریان‌های عبوری از دو مانع، محدوده‌های تجمع رسوبات در بالادست موانع به همراه تغییرات رسوبگذاری با فاصله موانع و فاصله‌ی بهینه مانع دوم از اول گزارش خواهد شد.

مواد و روش‌ها

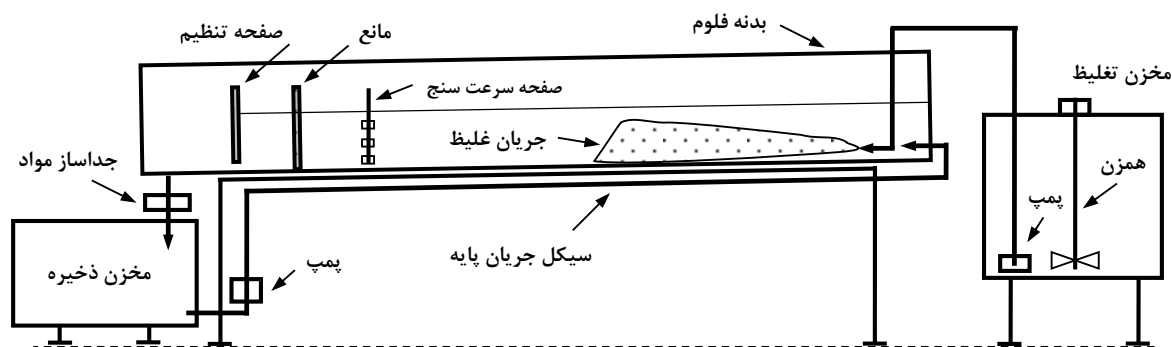
دستگاه آزمایش

در این مقاله، مطابق با شکل ۱، برای انجام آزمایش‌ها یک فلوم با ابعاد مقطع $45\text{cm} \times 30\text{cm}$ و به طول 10m که در آزمایشگاه هیدرولیک و رسوب گروه مهندسی آب دانشکده کشاورزی دانشگاه بیرجند ساخته شده، مورد استفاده قرار گرفته است. در این آزمایش‌ها از صفحه‌ی لوله پیتو و به روش تصویربرداری برای ثبت سرعت، وضعیت برخورد و عبور جریان از موانع بهره‌جویی شده است. تصویربرداری صرفاً برای بررسی حرکت جریان غلیظ در طول فلوم و رفتار فیزیکی و مکانیکی برخورد و عبور جریان از موانع صورت گرفت و صفحه‌ی لوله پیتو

صورت تجربی مورد بررسی قرار گرفته است. برای این منظور، آزمایش‌هایی بر روی جریان‌های غلیظ با غلظت‌های مختلف ورودی انجام شد. در هر کدام از آزمون‌ها، پروفایل‌های سرعت به کمک اندازه‌گیری صوتی ثبت شدند. نتیجه‌ی بررسی‌ها نشان دادند یک منطقه با سرعت ناچیز و غلظت قابل توجه در بالای هر مانع رشد می‌کند که با افزایش غلظت ورودی، این منطقه بزرگ‌تر می‌شود. علاوه بر این، نرخ ته‌نشینی رسوب در بالای مانع اول در مقایسه با مانع دوم بالاتر است. از طرف دیگر، سه منطقه چرخش بین این موانع توسعه داده شده‌اند. در پژوهشی دیگر، McArthur و همکاران (۲۰۱۴) به تحلیل تجربی جریان‌های غلیظ با استفاده از تصویربرداری پرداختند. در پژوهش آن‌ها، بر هم‌کنش جریان غلیظ با موانع و لایه‌های مختلف مورد مطالعه قرار گرفت. از موانع استوانه‌ای با مقطع مربعی شکل به اندازه‌ی ضلع ۲۵ میلی‌متر و موانعی صفحه‌ای به ضخامت $0/8$ میلی‌متر و با سطح ناهموار برای انجام آزمون‌ها استفاده شد. نتیجه‌ها بیان‌گر تفاوت‌های مهم در طبیعت و ویژگی‌های جریان می‌باشند. آن‌ها نتیجه گرفتند که مانع‌های با سطح ناهموار باعث کاهش سرعت جریان می‌شود، ولی اثر اندکی بر سرعت کلی جریان دارد. Zeynivand و همکاران (۲۰۱۷) به صورت آزمایشگاهی به مطالعه کنترل جریان غلیظ با موانع نفوذپذیر پرداختند. ایشان درصد تخلخل موانع و غلظت‌های متفاوت جریان را مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد که با افزایش درصد تخلخل موانع، میزان جذب مواد جریان کاهش یافته و به تناسب آن کارایی موانع در کنترل جریان کمتر خواهد شد. همچنین بالاترین کارایی معادل $73/2$ درصد بیان شد. در پژوهش Abhari و همکاران (۲۰۱۸) اثر یک مانع بر روی نرخ انتقال بار معلق در جریان‌های غلیظ بحرانی را به صورت تجربی مورد بررسی قرار گرفت. تخلیه‌ی ورودی، میانگین غلظت رسوب ورودی و ارتفاع مانع از عامل‌های مورد مطالعه در آن پژوهش بودند. پژوهش آن‌ها نشان داد که در

فاصله‌ی ۹m از دهانه تزریق جریان غلیظ نصب شدند. امکان قرارگیری مانع‌ها در زاویه‌هایی برابر با ۴۵، ۶۰، ۷۵ و ۹۰ درجه نسبت به راستای عمود بر کف در نظر گرفته شدند. شکل ۲ نمای کلی از این فلوم و تجهیزات آزمایشگاهی مربوط به آن را نشان می‌دهد. نمونه‌هایی از دو گونه مانع حفره‌ای و شیاری در شکل ۳ نشان داده شده است. علاوه بر این، تنظیم‌کننده و دبی سنج جریان پایه و دستگاه اینورتر برای تهیه هیدروگراف تزریق جریان غلیظ در شکل ۴ و دریچه تنظیم جریان و تثبیت سطح آب و دریچه کنترل و جداسازی مقطعی مواد از جریان فلوم در شکل ۵ نشان داده شده‌اند.

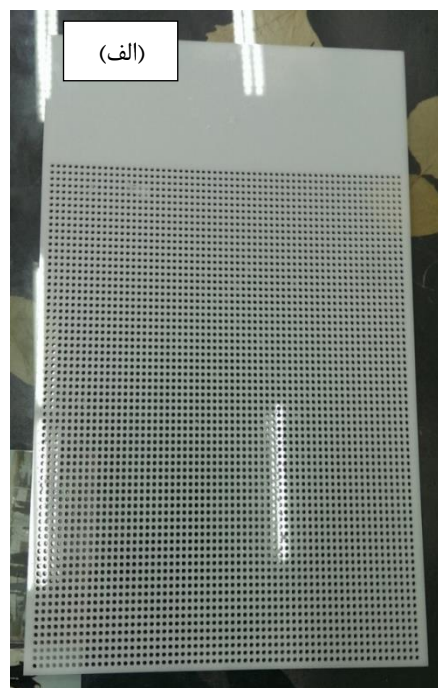
در بالادست موانع با قابلیت اندازه‌گیری با فاصله عمقی ۵ سانتیمتر نصب گردید. فلوم ساخته‌شده توانایی تغییر شیب طولی از ۳- تا ۳+ درصد را دارا بود، با این وجود، مقدار شیب طولی در آزمایش‌ها صفر در نظر گرفته شد (Wilson et al. 2016). برای ساخت موانع از صفحات پلاکسی گلاس به ضخامت ۳mm و عرضی برابر عرض فلوم و تا ارتفاع ۳۰cm استفاده شد. مقدار تخلخل در موانع با درصدهای مختلف ۱۰، ۱۵، ۲۰، ۲۵ و ۳۰ و به دو صورت شیاری و حفره‌ای به ترتیب با عرض شکاف و قطری برابر و به اندازه‌ی ۳ میلی‌متر (حدود ۳ برابر متوسط قطر ذرات) ایجاد شد. موانع در حالت نخستین در



شکل ۱: نمای کلی از فلوم و تجهیزات آزمایشگاهی استفاده شده



شکل ۲: نمای کلی فلوم جریان پایه و تجهیزات تهیه و تزریق جریان غلیظ



شکل ۳: الف) نمونه مانع حفره‌ای؛ ب) نمونه مانع شیاری



شکل ۴: الف) دبی سنج و تنظیم کننده جریان پایه، ب) دستگاه اینورتر تهیه هیدروگراف جریان غلیظ تزریقی



شکل ۵: الف) دریچه تنظیم جریان و تثبیت سطح آب، ب) دریچه کنترل و جداسازی مقطعی مواد جریان فلوم

از ترکیب گونه‌ای از پلی استایرن انبساطی EPS، با چگالی 1135 kg/m^3 و متوسط قطر $1/15 \text{ mm}$ ، با آب تولید شد. این جریان با دبی متوسط $3/43 \text{ Lit/s}$ در فاصله‌ی 7 cm از کف فلوم به جریان اصلی تزریق می‌شد. تزریق جریان غلیظ توسط پمپ و بصورت هیدروگراف سیلابی صورت گرفت. دبی پایه‌ی آب 5 لیتر بر ثانیه و حجم جریان غلیظ، با دو غلظت متفاوت 10 و 20 درصد، معادل 460 لیتر و دارای همزن می‌باشد. در انتهای فلوم صافی و مخزنی برای جداسازی مواد از جریان با هدف ذخیره‌سازی و استفاده مجدد از آن‌ها تعبیه شده است.

شکل ۷ مخزن تولید جریان غلیظ را نشان می‌دهد. مطابق شکل ۸، در دستگاه آزمون، صافی مناسب با ظرفیت عبور کل جریان در خروجی فلوم تعبیه شده است که در مقابل جریان قرار گرفته است تا مواد معلق عبوری از موانع را جداسازی نماید و جریان عاری از مواد وارد مخازن ذخیره شود و چرخه‌ی جریان برای ادامه‌ی آزمایش‌ها ادامه پیدا کند. ضمن این که، مواد جمع شده مبنای

روند انجام آزمایش‌ها

برای انجام آزمون‌ها، در ابتدا جریان غلیظ با رسوب‌های معلق به صورت آزمایشگاهی تولید شد. برای این منظور، مطابق شکل ۶، برای اطمینان از معلق بودن ماده‌ی مورد استفاده، آزمایش‌های ویژه‌ای بر اساس تئوری‌های پیشنهادی و روش تجربی اختلاط و سرعت سقوط صورت گرفت.

بر پایه‌ی تئوری استوکس و با توجه به اینکه عدد رینولدز جریان حدود 1565 به دست آمد و ذرات کروی با قطر میانگین $1/15 \text{ mm}$ بودند (Habib Mohammadi et al. 2016). سرعت سقوط برای غلظت کمتر یعنی 10 درصد محاسبه و میزان $11/2 \text{ cm/s}$ به دست آمد. دلیل انتخاب غلظت کمتر این بود که در غلظت‌های بیشتر سرعت سقوط ذرات رسوبی کم‌تر و قطعا اطمینان از معلق بودن آن بیشتر است. برای این منظور یک حجم دو لیتری از ترکیب آب و ماده پلیمری با ایجاد غلظت مورد نظر پر و پس از هم زدن فرصت داده شد و زمان سقوط و ته نشینی سنجیده شد. بر این اساس، جریان غلیظ مورد نظر

همان‌طور که در شکل ۸ نشان داده شده است، از کل زمان آزمایش (۳۳۵/۴ ثانیه)، ۸۴ ثانیه (۲۵٪) به روند بالارونده، ۴۹/۸ ثانیه (۱۵٪) با دبی ثابت و ۲۰۱/۶ ثانیه (۶۰٪) به روند پایین‌رونده اختصاص دارد. متوسط زمان پمپاژ حدود ۱۳۳/۸ ثانیه ثبت شده است.

سنجش و بررسی عملکرد موانع است و برای آزمون‌های بعدی مورد استفاده قرار می‌گیرد. در مرحله‌ی بعدی، مطابق شکل ۹، جریان غلیظ به‌صورت هیدروگراف سیلابی به جریان تزریق می‌شود. به سبب کارکرد پمپ متأثر از عملکرد ابتدایی و روند کاهشی ارتفاع آب مخزن تغلیظ و انطباق بر هیدروگراف‌های معمول سیل،



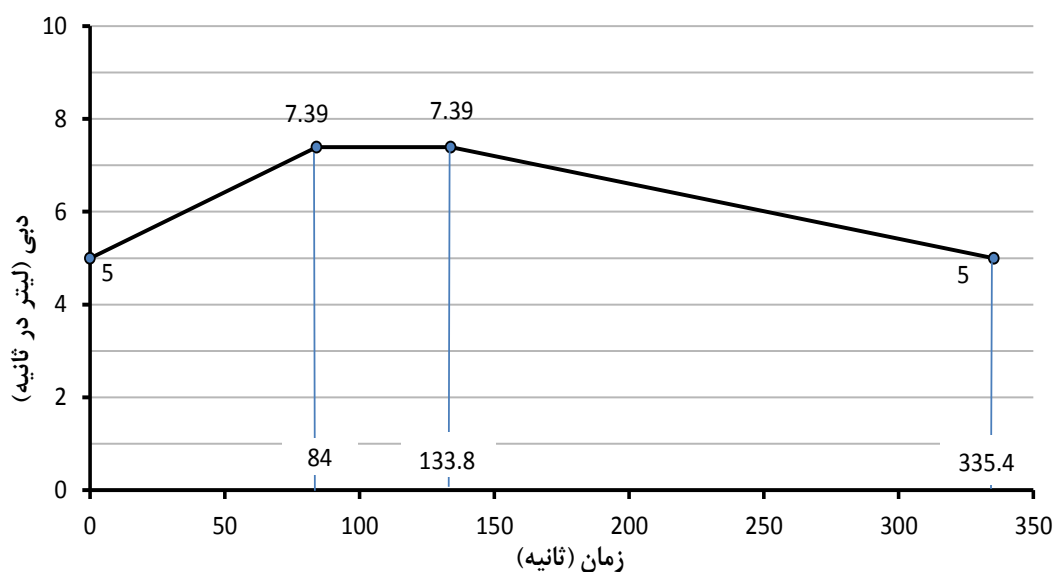
شکل ۸: صافی جداسازی مواد از جریان



شکل ۷: مخزن تولید جریان غلیظ



شکل ۶: آزمایش‌های ویژه‌ی تخلیق و سرعت سقوط مواد



شکل ۹: هیدروگراف تولیدی جریان سیلابی در آزمایش‌ها

این مانع با زاویه ۹۰ درجه و حالت عمود مورد استفاده قرار گرفت. جریان عبوری با همان جریان پایه ثابت و به ازای دو غلظت ۱۰ و ۲۰ درصد بود. علاوه بر ضخامت صفحه اصلی مانع (۳mm)، از ضخامت‌های ۵cm، ۱۰cm و ۱۵cm نیز استفاده شد.

شکل ۱۲ نیز میزان رسوب رده شده برای ضخامت‌های مختلف مانع دو دو جریان با غلظت ۱۰٪ و ۲۰٪ را نشان می‌دهد.

آن‌گونه که در شکل ۱۲ دیده می‌شود به ازای افزایش ضخامت مانع در هر دو غلظت به کار رفته میزان مواد رده شده بیشتر است. اما هرچه غلظت بیشتر بود نرخ این افزایش بیشتر مشاهده شد. به طوری که شیب خط برازش داده‌های غلظت ۲۰ حدود ۲/۳ برابر غلظت ۱۰ درصد مشاهده شد. همچنین همبستگی داده‌های ثبت شده مواد عبوری از مانع دارای ضخامت مختلف در غلظت‌های ۱۰ و ۲۰ درصد به ترتیب ۰/۹۸۱ و ۰/۹۹۵ بود. دلیل افزایش عمومی مواد رد شده از مانع تاثیر جریان عبوری در طول مانع بر جریان ورودی به مانع و ایجاد وضعیت مکشی در درون مانع تشخیص داده شد. همچنین ضریب همبستگی بالاتر در غلظت بیشتر ناشی از ورود راحت‌تر مواد معلق جریان به داخل مجراهای مانع در اثر کشش جریان به داخل آن نسبت داده شد. نتیجه این رفتار جریان، خالی شدن مواد رسوبی پشت مانع بود. در وضعیت مانع با ضخامت کم، جریان به محض عبور از آن رها شده و بر ورود مواد جریان به مانع و عبور از آن بی اثر است.

به منظور تعیین زمان آزمایش و اعتبارسنجی آن، نمونه‌ی شاهدی بصورت تغییرات زمانی بار رسوبی معلق به ازای عمق تنظیمی مورد نظر، برداشت شد. در این راستا، کمترین تغییرات بار رسوب مبنای انتخاب زمان بود، که منجر به تولید هیدروگراف شکل ۸ شد. در همه‌ی آزمایش‌ها، ویژگی‌های جریان از جمله سرعت، ارتفاع بدنه، زمان تزریق، زمان رسیدن پیشانی و عقبه مواد معلق به مانع، نحوه برخورد و عبور از مانع، وضعیت و محل رسوب‌گذاری و مقدار مواد عبوری و تله‌اندازی شده پشت مانع برداشت و ثبت شد. معیار عملکرد مانع، مقدار مواد تله‌اندازی شده (کسر مواد عبوری از کل ماده‌ی اولیه) قرار گرفت. در این مقاله، تعداد ۶۸ آزمون مستقل انجام شد که متغیرها و تعداد تکرار مربوط به هر کدام از آن‌ها در جدول ۱ گزارش شده است. باید اشاره کرد که برخی از متغیرها برای همه تکرارهای ذکر شده صورت نگرفته و تعداد آزمایش‌ها کمتر از حاصل ضرب کل تکرارها بوده است. روند انجام هر آزمایش با متغیرهای مورد نظر مطابق شکل ۱۰ به صورت مجزا انجام شد و در صورت مشاهده خطا یا اشکال و یا ثبت داده‌های نامتعارف برای صحت-سنجی آزمایش مزبور تکرار گردید.

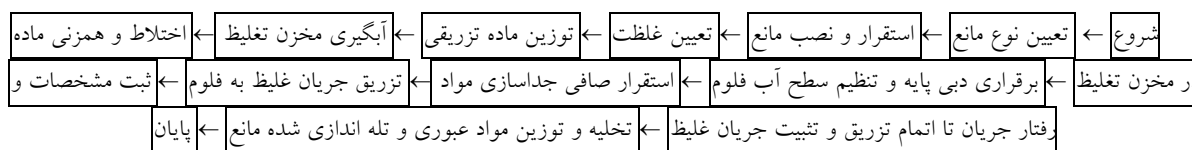
نتایج و بحث

بررسی اثر ضخامت یا بعد مانع

به منظور بررسی اثر ضخامت مانع و بعد آن در راستای جریان یکی از موانع شیباری با تخلخل ۱۰ درصد انتخاب شد. به سبب محدودیت اجرا، مطابق با شکل ۱۱،

جدول ۱: متغیرها و تعداد تکرار مربوط به آن‌ها در آزمون‌ها

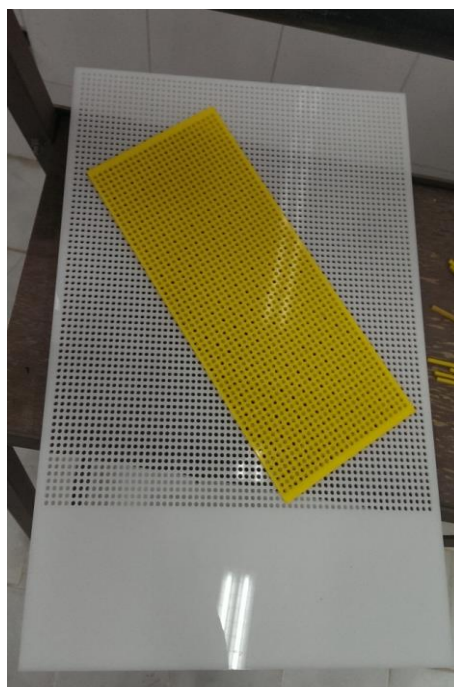
| متغیر | غلظت | نوع شکل مانع | تخلخل مانع | ردیف موانع | ضخامت مانع |
|-------------|------|--------------|------------|------------|------------|
| تعداد تکرار | ۲ | ۲ | ۵ | ۲ | ۴ |



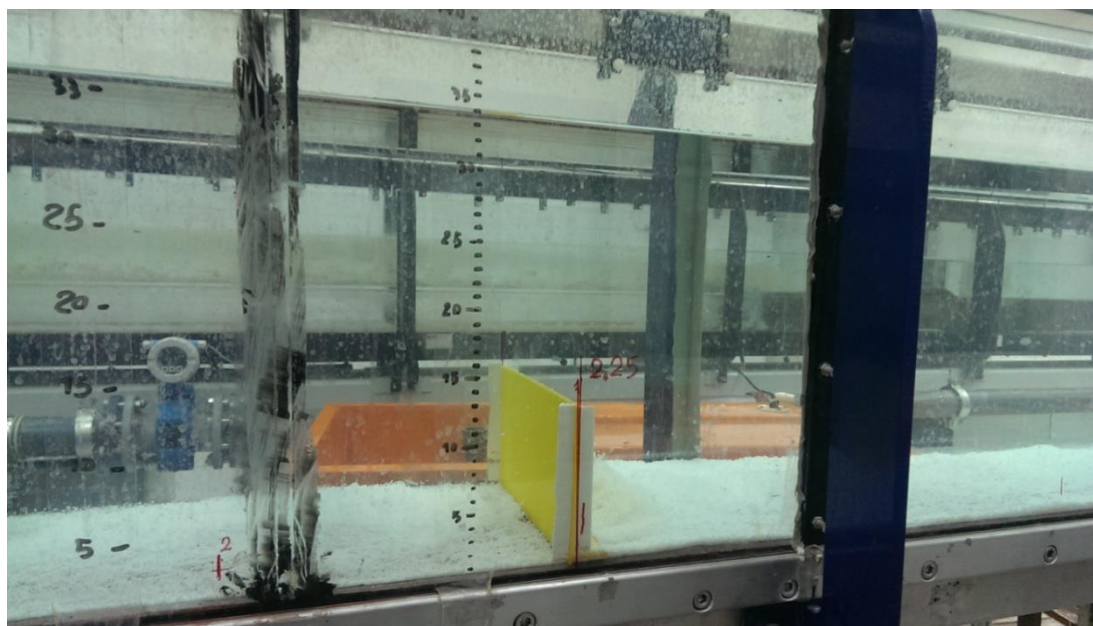
شکل ۱۰: روند انجام هر آزمایش با انتخاب متغیرهای مربوطه



شکل ۱۴: نمونه مانع لایه دوم و دریچه مانع عبور مواد برای سنجش



شکل ۱۳: نمونه مانع دوم و اول با نسبت ارتفاعی دو به یک

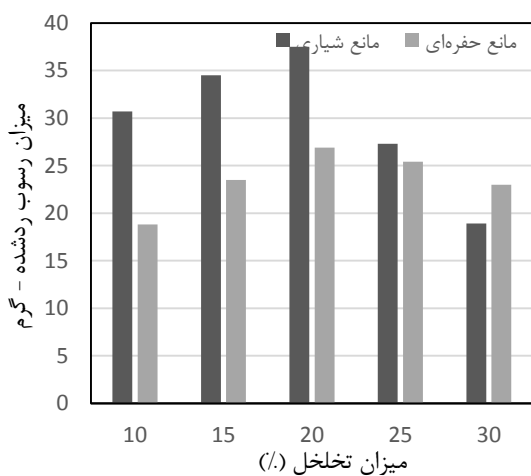


شکل ۱۵: نمایی از مواد رسوب داده با وجود لایه دوم مانع

آشفستگی جریان عبوری از مانع دوم به سمت مانع اول در پایین دست و تمایل مواد به عبور از آن تشخیص داده شد. رفتار مانع‌های شیباری و حفره‌ای مشابه وضعیت تک لایه بود. به طوری که تخلخل بهینه در این وضعیت نیز همان حدود ۲۰ درصد مشاهده شد که قبل از آن روند

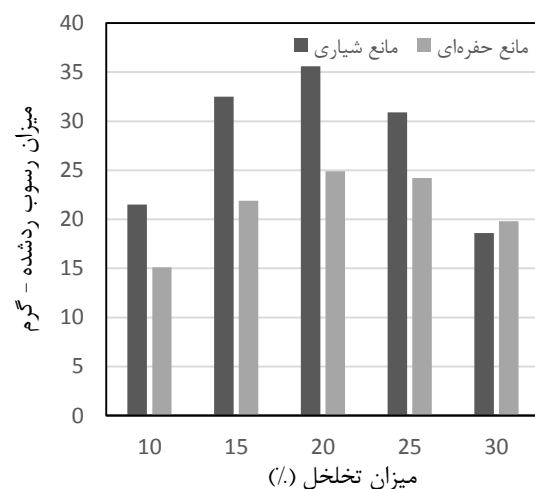
طبق شکل ۱۶ و شکل ۱۷ مشاهده شد که با اضافه شدن لایه دوم مانع میزان عبور مواد از لایه اول نسبت به وضعیت تک مانع کمی افزایش داشت. مقدار متوسط این افزایش برای مانع حفره‌ای و برای مانع شیباری ۲/۳۴ و ۱/۹۶ درصد مشاهده شد. دلیل این افزایش تاثیر تلاطم و

مقایسه رفتار دو نوع مانع حفره‌ای و شیاری در شکل ۱۸ نشان داد که با اضافه شدن ردیف دوم مانع، مواد عبوری از مانع اول در پایین دست در نوع حفره‌ای تغییرات کمتری نسبت به نوع شیاری داشت. بویژه برای تخلخل بیشتر از تخلخل بهینه (حدود ۲۰٪)، وضعیت نوع شیاری بهبود یافت به طوری که در تخلخل‌های بالا کارایی آن از حفره‌ای بهتر شد. دلیل آن قابلیت عبور کمتر این مانع نسبت به نوع حفره‌ای در اثر تلاطم جریان است.

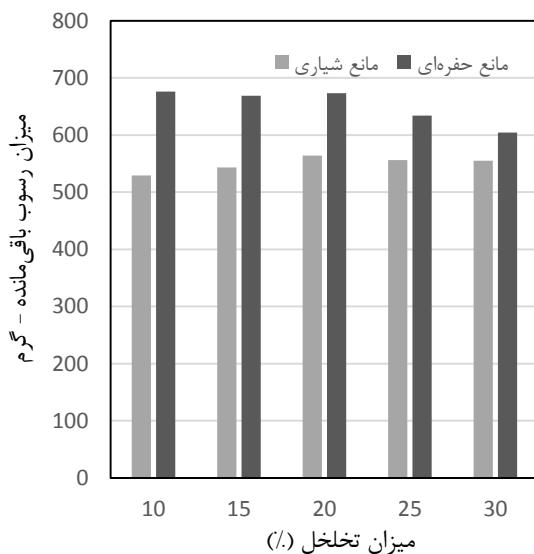


شکل ۱۷: میزان رسوب رده شده از دو مانع

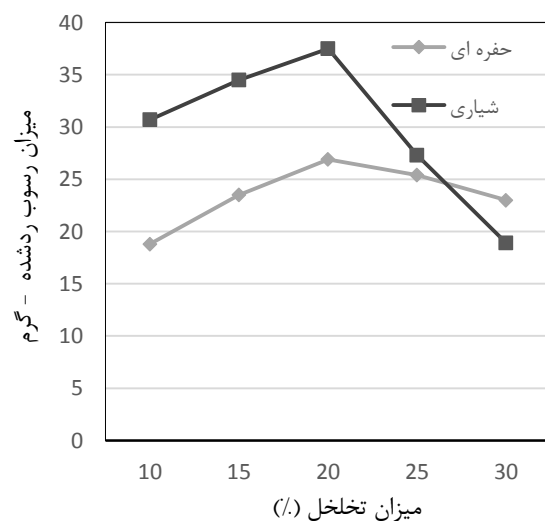
عبور مواد از مانع افزایشی و بعد از آن کاهش می‌یابد. در این وضعیت باز هم کارایی نوع حفره‌ای از شیاری بهتر بود. نتیجه‌های مربوط به میزان رسوب رده شده از یک و دو ردیف مانع، مقایسه عملکرد با وجود یک و دو لایه مانع و میزان باقی مانده پشت مانع دوم به عنوان تله اندازه‌ی مواد در بالادست آن به ترتیب شکل ۱۶، شکل ۱۷، شکل ۱۸ و شکل ۱۹ نشان داده شده‌اند.



شکل ۱۶: میزان رسوب رده شده از تک مانع

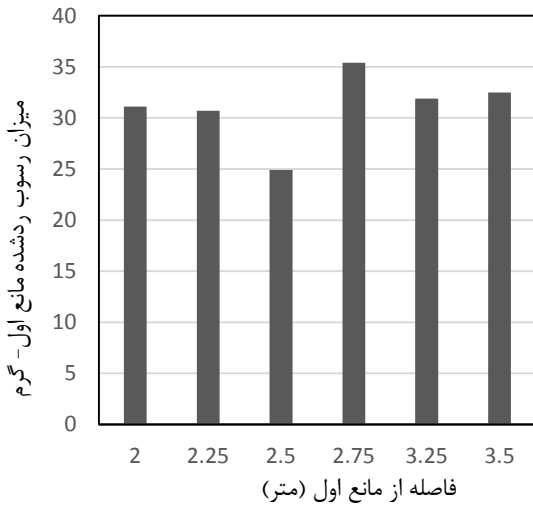


شکل ۱۹: میزان رسوب باقی مانده پشت مانع دوم

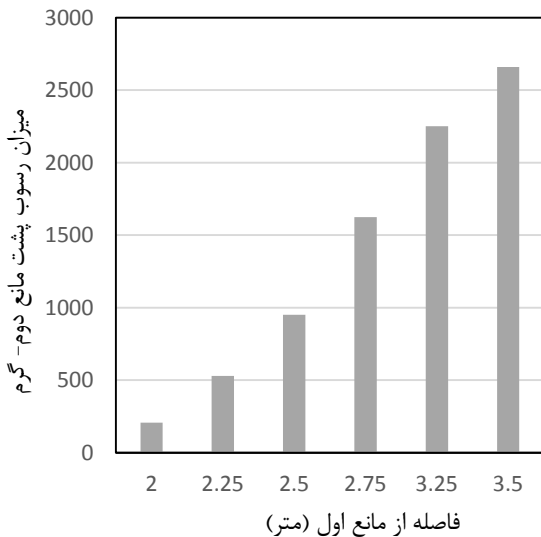


شکل ۱۸: میزان رسوب رده شده مانع اول در وضعیت دو ردیف مانع

فلوم عملاً کارکرد و نقش لایه دوم تأثیرپذیر از شدت و تطلطم جریان ورودی بود و قابل تشخیص و تمیز نبود. بر این اساس فاصله بهینه مانع دوم از مانع اول حدود ۲/۲۵m تعیین شد.



شکل ۲۰: میزان رسوب رداشته از مانع اول بر حسب فاصله از مانع اول



شکل ۲۱: میزان رسوب پشت مانع دوم بر حسب فاصله از مانع اول

نتیجه‌گیری

در این مقاله به بررسی آزمایشگاهی اثر ضخامت (بعد) و لایه دوم موانع نفوذپذیر بر کنترل و تله‌اندازی جریان غلیظ پرداخته شد. دو گونه مانع شیاری و حفره‌ای

بررسی مواد رسوب کرده پشت مانع دوم شکل ۱۹ نشان داد که با افزایش تخلخل تا قبل تخلخل بهینه روند تله‌اندازی نوع حفره‌ای کاهش (با میزان R^2 برابر با ۰/۸۱۴) ولی نوع شیاری افزایشی (با میزان R^2 برابر با ۰/۵۵۹) بود. برای تخلخل بیش از بهینه با توجه به قابلیت بهتر عبور جریان در نوع حفره‌ای همان روند ادامه یافت ولی در نوع شیاری به دلیل روگذری جریان از روی مانع میزان تله‌اندازی و رسوب مواد پشت آن حالت تثبیت شده داشت. اما عملکرد هر دو نوع مانع نشان داد که لایه دوم در بهبود کارایی مانع‌ها موثر بود. البته این مورد تحت تأثیر فاصله مانع دوم از مانع اول داشت.

به منظور بررسی اثر موقعیت قرارگیری و نصب مانع دوم نسبت به مانع اول، آزمایش‌ها از ۲m بالادست مانع اول و به ازای فواصل ۲۵cm تا انتهای فلوم صورت گرفت. دلیل انتخاب ۲m متر این بود که در فاصله‌های کمتر تلاطم جریان روگذر مانع دوم بر مانع اول اثر زیاد داشت و عملکرد مانع‌ها قابل تفکیک و تمیز نبود. بر این اساس برای آزمایش‌های صورت گرفته فاصله بهینه مانع دوم از مانع اول در پایین دست بر پایه بیشترین عملکرد تله‌اندازی و رسوبگذاری مواد تعیین شد. معیار انتخاب نیز مقایسه مواد رسوب کرده بین دو مانع و بالادست لایه دوم مانع بود. شکل ۲۰ و شکل ۲۱ میزان رسوب رداشته از مانع اول و دوم بر حسب فاصله از مانع اول را نشان می‌دهند.

بررسی‌ها نشان داد که هرچه فاصله مانع دوم از مانع اول بیشتر باشد اثرگذاری آن در بهبود کارایی آن بیشتر است. شکل ۲۰ نشان می‌دهد که روند رسوبگذاری مواد پشت مانع دوم با فاصله از مانع اول بیشتر است. همچنین با توجه به شکل ۲۱ مشخص شد که با ابزار و محدودیت‌های موجود از یک فاصله خاص به بالاتر روند رسوبگذاری تغییر کرد. دلیل آن نیز اثرگذاری تلاطم ناشی از ناحیه ورودی جریان پایه و بویژه اثر تزریق جریان غلیظ تشخیص داده شد. در نتیجه در قسمت‌های ابتدایی

ثبت شد. دلیل این رخداد اثر تلاطم و آشفتگی ناشی از روگذری جریان از مانع دوم تشخیص داده شد.

- با افزایش فاصله‌ی مانع دوم از مانع اول، عملکرد تله‌اندازی و رسوبگذاری بهبود یافت. بر این اساس فاصله بهینه مانع دوم از اول معادل ۲/۲۵ متر به دست آمد. بالاتر از این فاصله به دلیل تاثیر تلاطم جریان ورودی فلوم و تزریق جریان غلیظ سهم مانع دوم قابل تفکیکی و تمیز نبود.
- نتیجه‌ها نشان می‌دهند که مانع‌های شیاری برای رودخانه‌ها با شیب کم‌تر و فاصله‌ی ردیف‌های بیشتر و مانع‌های حفره‌ای برای رودخانه‌ها با شیب بیشتر و در فاصله‌ی ردیف‌های کم‌تر مناسب هستند.
- در حالت کلی، وجود لایه دوم بر میزان کل تله‌اندازی و رسوبگذاری مواد مثبت تلقی شد و بر مبنای همه‌ی نتیجه‌ها، در شرایط مشابه، همواره موانع حفره‌ای عملکرد بهتری از موانع شیاری نشان دادند.

با عرض شیارها و قطر حفره‌هایی برابر با ۳ میلیمتر و از صفحات پلاکسی گلاس انتخاب و ساخته شدند. از یک پلیمر نامحلول و معلق با چگالی ۱/۱۳۵ گرم در لیتر و متوسط قطر ۱/۱۵ میلیمتر نیز برای ایجاد جریان غلیظ استفاده شد. آزمایش‌ها با دو غلظت متفاوت ۱۰ و ۲۰ درصد، پنج تخلخل گوناگون، چهار ضخامت مختلف و با دو لایه مانع انجام شدند و نتیجه‌های زیر به دست آمدند:

- به ازای افزایش ضخامت با تخلخل ۱۰ درصد و نوع شیاری روند عبور مواد از مانع بیشتر شد. دلیل این اتفاق سرعت زیاد جریان در طول مجرای مانع و ایجاد نیروی کششی و اثر بر ورود جریان بالادست به آن تشخیص داده شد.
- با ایجاد لایه دوم مانع عبور مواد از مانع هم در شیاری و هم در حفره‌ای روند افزایشی پیدا کرد. به طوری که در نوع شیاری ۱/۹۶ و حفره‌ای ۲/۳۴

منابع مورد استفاده

- Abhari, M.N., Iranshahi, M., Ghodsian, M., Firoozabadi, B. (2018). Experimental study of obstacle effect on sediment transport of turbidity currents. *Journal of Hydraulic Research*, 56(5), 618-629.
- Alves, E., Rossatto, R. (2011). Experimental study of turbidity currents flow around obstacles. In: *7th International Sympathy on Stratified Flows*, Rome, Italy.
- Asghari Pari, S.A., Kashefipour, S., Ghomeshi, M., Bajestan, M.S. (2010). Effects of obstacle heights on controlling turbidity currents with different concentrations and discharges. *Journal of Food, Agriculture & Environment*, 8(2), 930-935.
- Asghari Pari, S.A., Kashefipour, S.M., Ghomeshi, M. (2017). An experimental study to determine the obstacle height required for the control of subcritical and supercritical gravity currents. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, 21(9), 1080-1092.
- Asghari Pari, S.A., Mohagheghiyani, S.M. (2015). Numerical Investigation Effect in Using Plate and Tilt Columnar Barrier in Controlling Turbidity Current. *Iranian Journal of Irrigation & Drainage*, 9(2), 357-366.
- Asghari Pari, S.A., Yazdanfar, S., Kordnaeij, M. (2016). Numerical Investigating Effect of Obstacle's Upstream Angle and Water Depth of Reservoir on Controlling Turbidity Current. (In Persian). *Water and Soil Science*, 26(2-2), 207-219.
- Baghalian, S., Ghodsian, M. (2017). Experimental analysis and prediction of velocity profiles of turbidity current in a channel with abrupt slope using artificial neural network. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 39(11), 4503-4517.
- Barahmand, N., Shamsai, A. (2010). Experimental and theoretical study of density jumps on smooth and rough beds. *Lakes & Reservoirs: Research & Management*, 15(4), 285-306.
- Chamoun, S., De Cesare, G., Schleiss, A.J. (2016). Managing reservoir sedimentation by venting turbidity currents: A review. *International Journal of Sediment Research*, 31(3), 195-204.
- De Cesare, G., Oehy, C.D., Schleiss, A.J. (2008). Experiments on turbidity currents influenced by solid and permeable obstacles and water jet screens. In: *6th International symposium on ultrasonic Doppler methods for fluid mechanics and fluid engineering*, 41-44.
- Eghbalzadeh, A., Javan, M. (2011). Numerical simulation of a turbidity current flowing over a solid obstacle. In: *2nd International Conference on Environmental Science and Development*, Singapore.

- Farizan, A., Yaghoubi, S., Firoozabadi, B., Afshin, H. (2019). Effect of an obstacle on the depositional behaviour of turbidity currents. *Journal of Hydraulic Research*, 57(1), 75-89.
- Habib Mohammadi, M.A., Asghari Pari, S.A., Sajjadi, S.M. (2016). Experimental Investigation the Effects of Gabion Obstacle's Height, Shape and distance of obstacle from entrance to Control the Turbidity Current. (In Persian). *Journal of Water and Soil Conservation*, 23(4), 251-265.
- Hu, P., Cao, Z., Pender, G., Tan, G. (2012). Numerical modelling of turbidity currents in the Xiaolangdi reservoir, Yellow River, China. *Journal of hydrology*, 464, 41-53.
- Janocko, M., Cartigny, M., Nemeč, W., Hansen, E. (2013). Turbidity current hydraulics and sediment deposition in erodible sinuous channels: laboratory experiments and numerical simulations. *Journal of Marine Petroleum Geology*, 41, 222-249.
- Keshkar, S., Ayyoubzaeh, S.A., Ghodsian, M. (2017). Changes in Turbidity Current Flow Velocity Due to the Obstacle Height and an Abrupt Decrease in a Reservoir Bed Slope. (In Persian). *Water Engineering*, 10(32), 55-69.
- Kneller, B.C., (2016), Comments on the Origin and Significance of Density Stratification in Turbidity Currents. In: *AGU Fall Meeting Abstracts*.
- Kordnaeij, M., Asghari Pari, S.A., Sajjadi, S.M., Shafai Bajestan, M. (2018). Laboratory Investigation the effect of porosity obstacle and stepped porosity obstacle on control of gravity current. *Journal of Marine Science and Technology*, 16(4), 86-96.
- McArthur, J., Wilson, R., Friedrich, H. (2014). Photometric analysis of the effect of substrates and obstacles on unconfined turbidity current flow propagation. In: *Preceding of River Flow*.
- Meiburg, E., Nasr-Azadani, M.M. (2018). Gravity and Turbidity Currents: Numerical Simulations and Theoretical Models. In: *Mixing and Dispersion in Flows Dominated by Rotation and Buoyancy*, Springer, 129-180.
- Nasr-Azadani, M., Meiburg, E. (2014). Turbidity currents interacting with three-dimensional seafloor topography. *Journal of Fluid Mechanics*, 745, 409-443.
- Nogueira, H., Adduce, C., Alves, E., Franca, M. (2012). The influence of bed roughness on the dynamics of gravity currents. In: *River Flow - Murillo (Ed.)*, Taylor & Francis Group, London, 357-362.
- Oehy, C.D., Schleiss, A.J. (2007). Control of turbidity currents in reservoirs by solid and permeable obstacles. *Journal of Hydraulic Engineering*, 133(6), 637-648.
- Vladimirov, I.Y., Korchagin, N., Savin, A. (2015). Wave influence of a suspension-carrying current on an obstacle in the flow. In: *Doklady Earth Sciences, Springer Science & Business Media*, 286-293.
- Wilson, R., Friedrich, H., Stevens, C. (2016). Photometric velocity tracking tool for laboratory generated turbidity currents. In: *River Flow 2016 – Constantinescu, Garcia & Hanes (Eds) Conference*, 862-867.
- Yaghoubi, S., Afshin, H., Firoozabadi, B., Farizan, A. (2016). Experimental investigation of the effect of inlet concentration on the behavior of turbidity currents in the presence of two consecutive obstacles. *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering*, 143(2), 18-32.
- Yaghubi, S., Golchoubian, P., Afshin, H., Firoozabadi, B. (2013). Experimental Investigation of the Effect of Two Consecutive Obstacles on Turbidity Current. *Journal of Selcuk University Natural and Applied Science*. 615-627.
- Zeynivand, M., Kashefi Pour, S.M., Ghomeshi, M. (2017). Laboratory Investigation The Effect of Porosity of Permeable Obstacle on Control of Gravity Current. *Irrigation Sciences and Engineering*, 40(1), 13-24.



The Effect of Thickness and Number of Permeable Obstacles on Density Current Control and Trapping

Alireza Jahangir ¹, Kazem Esmaili ^{2*} and Mahmoud Faghfour Maghrebi ³

1) PhD. Student of Water Structures, Department of Water Eng., Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran

2*) Associate Professor, Department of Water Eng., Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran

*Corresponding author email: esmaili@um.ac.ir

3) Professor, Department of Civil Eng., Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran

Received: 02-06-2020

Accepted: 26-07-2020

Abstract

Understanding and studying the river flooding, which in most cases is density current, can help to reduce adverse effects of sedimentation. To this end, the creation of obstacles in the bed of stream will be effective. In this paper, the effect of thickness (dimension) and the second layer of permeable obstacles on the control and trapping of density current is investigated experimentally. For this purpose, two types of groove and cavity obstacles with grooves and cavity diameters equal to 3 mm and made of plaque glass were used. Density currents were created by adding an insoluble, suspended polymer of expanded polystyrene with a mean diameter of 1.15 mm and a density of 1.155 g / l. The experiments utilized two different concentrations (10 and 20%), five different porosities, four different angles, four different thicknesses and two barrier layers. The results showed that the density current process with 10% porosity of the groove obstacle increased with increasing thickness. The second layer of obstacles have increased the material passage through both groove and cavity obstacles. This increase was recorded in the groove type of 1.96 and the cavity type of 2.34. Investigations showed that the optimal distance of the second obstacle from the first was 2.25 meters. According to the results, under similar conditions, cavity obstacles always perform better than groove ones.

Keywords: Density Current, Suspended Sedimentation, Obstacle Thickness, Number of Obstacles, Permeable Obstacle.