



## بررسی آزمایشگاهی اثر تخلخل و زاویه موانع نفوذپذیر بر رسوب‌گذاری جریان غلیظ

علیرضا جهانگیر<sup>۱</sup>، کاظم اسماعیلی<sup>۱\*</sup>، محمود فغفور مغربی<sup>۲</sup>

<sup>۱</sup> علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران  
<sup>۲</sup> دانشکده مهندسی، گروه عمران، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران

### تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۳۹۷-۰۹-۱۳  
بازنگری: ۱۳۹۸-۰۱-۱۵  
پذیرش: ۱۳۹۸-۰۱-۲۷  
ارائه آنلاین: ۱۳۹۸-۰۲-۲۳

### کلمات کلیدی:

جریان غلیظ  
رسوب‌گذاری معلق  
زاویه نصب مانع،  
مانع نفوذپذیر  
میزان تخلخل مانع.

**خلاصه:** جریان سیلابی رودخانه‌ها اغلب از نوع جریان غلیظ است. از این رو، شناخت و بررسی این جریان‌ها می‌تواند بخشی از مسائل رسوب‌گذاری را بر طرف نماید. در این پژوهش، اثر تخلخل و زاویه موانع نفوذپذیر بر کنترل و تله‌اندازی جریان غلیظ در آزمایشگاه بررسی شده است. برای این منظور، از یک پلیمر نامحلول و معلق ساخته‌شده از پلی استایرن انبساطی (EPS) با چگالی ۱/۱۳۵ گرم در لیتر و متوسط قطر ۱/۱۵ میلی‌متر استفاده شد. موانع از صفحات پلاکسی گلاس انتخاب شدند که از دو نوع شیاری و حفره‌ای با عرض شیارها و قطر حفره‌هایی برابر با ۳ میلی‌متر ساخته شدند. آزمایش‌ها با دو غلظت متفاوت (۱۰ و ۲۰ درصد)، پنج تخلخل و چهار زاویه‌ی مختلف انجام شد. نتایج نشان دادند که با افزایش تخلخل، میزان تله‌اندازی تا تخلخل بهینه روند کاهشی و سپس افزایشی دارد. بر این اساس، تخلخل بهینه برای موانع حفره‌ای و موانع شیاری به ترتیب ۲۲ و ۱۹ درصد به‌دست آمد. در همه‌ی آزمایش‌ها، تله‌اندازی حفره‌ای، با ۰/۱۳ و ۰/۱۴ درصد به‌ترتیب در غلظت‌های ۱۰ و ۲۰ درصد، بیشتر از شیاری بود. علاوه بر این، با افزایش زاویه، مقدار تله‌اندازی کاهش یافت و مقدار آن در شیاری نسبت به حفره‌ای به‌ترتیب با ضریب همبستگی‌هایی برابر ۰/۹۶۱ و ۰/۹۳۷، بیشتر مشاهده شد. اثر عمده موانع، کاهش سرعت و ایجاد کندی جریان تشخیص داده شد که متوسط سرعت در حفره‌ای ۳/۶۲ درصد بیشتر از شیاری به‌دست آمد. بر مبنای نتیجه‌ها، در شرایط مشابه، همواره موانع حفره‌ای عملکرد بهتری از موانع شیاری دارند.

### ۱- مقدمه

رسوبات می‌توانند اثر بسزایی بر رفتار یک جریان غلیظ<sup>۱</sup> داشته باشند. جریان غلیظ هنگامی رخ می‌دهد که یک سیال با چگالی بالاتر درون سیال سبک‌تری جریان یابد [۶]. این عمل باعث اختلاف چگالی بین لایه‌های سیال می‌شود. گرادیان چگالی افقی ایجاد شده، نیروی اصلی رانش جریان را بوجود می‌آورد که به آن جریان ثقلی<sup>۲</sup> گفته می‌شود. این اختلاف چگالی می‌تواند 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 که به جریان منشا شده از نوع سوم، جریان گل

فرایند و پدیده‌ی رسوب‌گذاری جریان در مسیر رودخانه و مخازن سدها، از مسایل مهم و پیچیده در سازه‌های آبی به شمار می‌رود. از این رو، کنترل رسوبات جریان در کانون توجه متخصصان و پژوهشگران قرار گرفته است [۱-۴]. از مهم‌ترین پیامدهای این پدیده می‌توان به ایجاد اختلال در کارکرد صحیح سازه‌ها و اشغال بخشی قابل توجهی از حجم مفید مخازن سدها اشاره کرد. طبق گزارش‌های موجود، سالانه به طور میانگین یک درصد از حجم مفید مخازن سدها در دنیا با رسوبات اشغال می‌شود [۵]. از طرف دیگر،

1 Density Current  
2 Gravity Current

\* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: esmaili@um.ac.ir



بیشتر است. علاوه بر آن، در پژوهش آن‌ها، برای کنترل کامل جریان، ارتفاع مانع ۲ تا ۲/۷۵ برابر ارتفاع بدنه‌ی جریان توصیه شد. اوهی<sup>۴</sup> و اشلازیز<sup>۵</sup> [۱۵] به تأثیر 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. کردناییج [۱۶] 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 و دبی ورودی به مقدار ثابت ۰/۷ لیتر در ثانیه و غلظت جریان ۲۰ 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. اصغری پری و همکاران [۱۷ و ۱۸] 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 تأثیر 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). حبیب محمدی و همکاران [۱۹] اثر ارتفاع، شکل و محل قرارگیری موانع گابیونی در کنترل جریان غلظ رسوبی را بررسی کردند. به این منظور از دبی ثابت ۰/۷ لیتر بر ثانیه و غلظت ورودی ۲۰ گرم در لیتر با دو شیب ۰ و ۲/۵ استفاده کردند. تخلخل موانع ۳۵ 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. آلوز<sup>۶</sup> و روساتو [۲۰] مجموعه‌ای از آزمایش‌ها را برای بررسی تأثیر موانع بر

آلود<sup>۱</sup> نیز گفته می‌شود [۷]. در بررسی جریان غلیظ به‌طور معمول سه عامل سیال محیطی، سیال چگال و بستر (از نظر شکل، زبری و وجود موانع) از اهمیت بالاتری برخوردار است [۸]. با توجه به نقش و تأثیر قابل توجه جریان غلیظ در روند رسوب گذاری جریان سیلابی در مسیر رودخانه و مخازن سدها، شناخت و بررسی این نوع جریان‌ها اهمیت زیادی دارد.

طی سالیان اخیر، روش‌های سازه‌ای فراوانی بر ایجاد و ساخت سازه‌های کنترل و تله‌اندازی رسوبات در مسیر جریان ارایه شده است [۴، ۹، ۱۰]. یکی از ابزارهای کارآمد کنترل رسوبات جریان، استفاده از موانع در مسیر رودخانه در بالادست سازه‌های اصلی و مخازن سدها است. در حالت کلی موانع به‌صورت صفحات ساده بدون نفوذپذیری و یا صفحات نفوذپذیر به کار می‌روند. موانع نفوذپذیر به سبب قابلیت عبور بخشی از جریان و کاهش فشار جریان در مقایسه با موانع نفوذناپذیر، رواج و کارایی بیشتری دارند [۱۱ و ۱۲]. از آنجا که بخش عمده‌ای از رسوبات مربوط به بار معلق جریان است که در سیلاب‌ها و جریان غلیظ رخ می‌دهد، 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. دی‌سزار<sup>۲</sup> و همکاران [۱۳] عبور جریان غلیظ از موانع مختلف را به‌صورت 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 به‌طور موثر از طریق اقدامات سازنده طراحی کرد. در پژوهش آن‌ها، بر اساس نتایج آزمایش‌های فیزیکی و شبیه‌سازی‌های عددی، برخی توصیه‌های طراحی برای موانع جامد و نفوذپذیر ارایه شده است. در پژوهشی دیگر، اصغری پری<sup>۳</sup> و همکارانش [۱۴] با مطالعه‌ی اثر ارتفاع مانع بر کنترل جریان‌های غلیظ با غلظت و دبی مختلف، منحنی‌های سرعت بدنه جریان و غلظت را ارایه کردند. آن‌ها نتیجه گرفتند که ارتفاع بیشتر بر کنترل جریان موثرتر است و همچنین در غلظت‌های بالاتر، تأثیر بر سرعت و کنترل رسوب جریان

4 Oehy  
5 Schleiss  
6 Alves

1 Turbidity Current  
2 De Cesare  
3 Asghari Pari

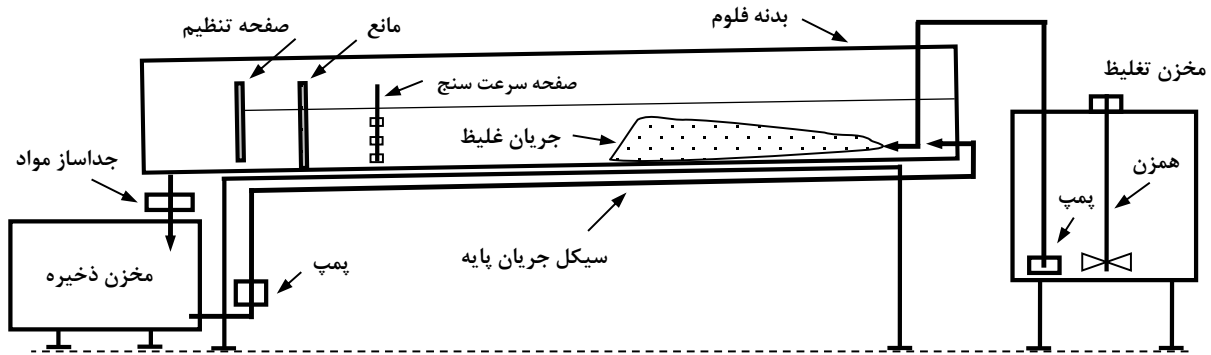
با مقطع مربعی شکل به اندازه‌ی ضلع ۲۵ میلی‌متر و موانعی صفحه‌ای به ضخامت  $0/8$  میلی‌متر و با سطح ناهموار برای انجام آزمون‌ها استفاده شد. نتیجه‌ها بیان‌گر تفاوت‌های مهم در طبیعت و ویژگی‌های جریان می‌باشند. آن‌ها نتیجه گرفتند که مانع‌های با سطح ناهموار باعث کاهش سرعت جریان می‌شود، ولی اثر اندکی بر سرعت کلی جریان دارد. در پژوهش یعقوبی<sup>۴</sup> و همکارانش [۲۴] اثر غلظت ورودی بر رفتار جریان در حضور دو مانع متوالی به 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. زینی‌وند<sup>۵</sup> و همکاران [۲۵] 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 ابهری<sup>۶</sup> و همکاران [۲۶] 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 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.

با وجود پژوهش‌های فراوانی که برای شناخت رفتار جریان‌های غلیظ انجام شده است، ارزیابی رفتار این جریان‌ها که دارای بار معلق رسوبی هستند و در مسیر خود با موانع نفوذپذیر برخورد می‌کنند کمتر انجام و گزارش شده است و هنوز هم نیازمند بررسی‌های

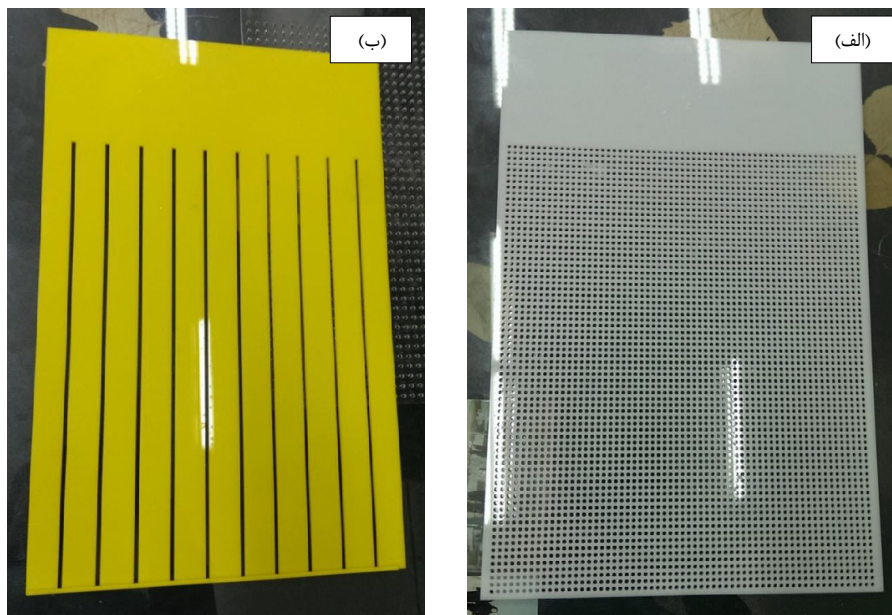
روی جریان‌های غلیظ، به‌ویژه در پروفیل‌های سرعت قائم و سرعت جریان انجام دادند. آن‌ها، دو مجموعه از آزمون‌ها را با ارتفاع‌های مختلف مانع در یک کانال به طول  $16/45$  متر و  $30$  سانتیمتر عرض با دامنه‌های سطح متغیر برنامه‌ریزی کردند. در پژوهش آن‌ها، از مخلوط آب و آرد سیلیکا، با توجه به مقادیر اولیه‌ی غلظت 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 نوگوایرا<sup>۱</sup> و همکاران [۲۱]، ویژگی‌های دینامیکی جریان‌های غلیظ را روی بستری زبر 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. جانوکو<sup>۲</sup> و همکارانش [۲۲] 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 پژوهشی دیگر، مک آرتور<sup>۳</sup> و همکاران [۲۳] به تحلیل تجربی جریان‌های غلیظ با استفاده از تصویربرداری پرداختند. در پژوهش آن‌ها، برهم‌کنش جریان غلیظ با موانع و لایه‌های مختلف مورد مطالعه قرار گرفت. از موانع استوانه‌ای

4 Yaghubi  
5 Zeinivand  
6 Abhari

1 Nogueira  
2 Janocko  
3 McArthur



شکل ۱. نمای کلی از فلوم و تجهیزات آزمایشگاهی استفاده شده  
Fig. 1. Overview of flume and laboratory equipment used



شکل ۲. نمونه موانع استفاده شده: الف) مانع حفره‌ای؛ ب) مانع شیبی  
Fig. 2. Examples of barriers used a) Cavity barrier; b) groove barrier

رسوب‌گذاری مواد معلق با زاویه متفاوت موانع نفوذپذیر مورد بررسی قرار می‌گیرد. علاوه بر این، سرعت و عمق جریان غلیظ متاثر از موانع نفوذپذیر و روند برخورد و عبور جریان غلیظ از موانع نفوذپذیر نیز ارزیابی می‌شوند.

## ۲- مواد و روش‌ها

### ۲-۱- تجهیزات آزمایشگاهی

در این پژوهش، از یک فلوم به طول ۱۰ متر، عرض ۳۰ سانتیمتر و ارتفاع ۴۵ سانتیمتر استفاده شده است. شکل ۱ نمای کلی از این فلوم و تجهیزات آزمایشگاهی مربوط به آن را نشان می‌دهد. آزمون‌های

بیشتری است. برای این منظور، این مقاله به بررسی آزمایشگاهی اثر تخلخل و زاویه‌ی موانع نفوذپذیر بر کنترل و تله‌اندازی جریان غلیظ می‌پردازد. نقطه قوت و برتری این پژوهش که جنبه نوآوری دارد پرداختن به بار رسوبی معلق است که در گزارش‌های موجود یا پرداخته نشده و یا به طور تجربی و آزمایشگاهی در دسترس نیست. هدف اصلی این پژوهش، بررسی آزمایشگاهی اثر تخلخل و زاویه موانع نفوذپذیر بر رسوب‌گذاری جریان غلیظ است که ضمن دستیابی به آن، روند تغییرات رسوب‌گذاری مواد معلق با تخلخل متفاوت موانع نفوذپذیر بررسی می‌شوند. از طرف دیگر، میزان تخلخل بهینه موانع جهت رسوب‌گذاری مواد معلق به دست می‌آیند و روند تغییرات





شکل ۳. الف) مخزن تولید جریان غلیظ؛ ب) صافی جداسازی مواد  
Fig. 3.a) Concentrated flow generation tank; b) Material separation filter

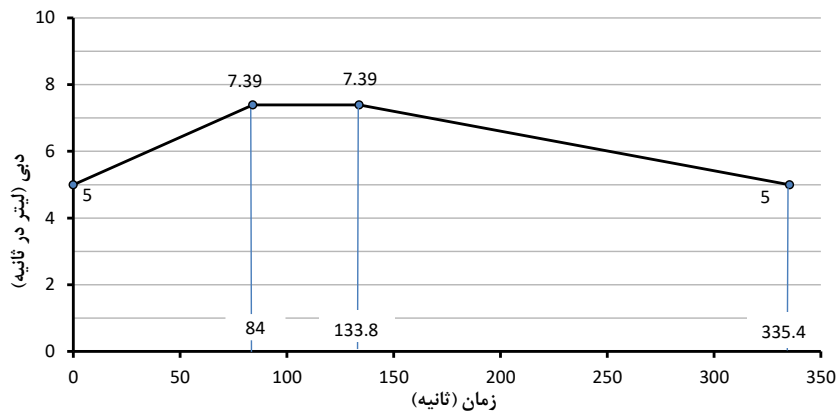
۷۵ و ۹۰ درجه در نظر گرفته شدند. شکل ۲ نمونه‌هایی از دو گونه مانع حفره‌ای و شیاری در شکل ۲ نشان داده شده است

#### ۲-۲- ویژگی‌های جریان غلیظ

جریان غلیظ مورد نظر از ترکیب گونه‌ای از پلی استایرن انبساطی EPS، با چگالی ۱۱۳۵ کیلوگرم در مترم-کعب و متوسط قطر ۱/۱۵ میلی‌متر، با آب تولید شده است. این جریان با دبی متوسط ۳/۴۳ لیتر بر ثانیه در فاصله‌ی ۷ سانتیمتری از کف فلوم به جریان اصلی تزریق می‌شد. تزریق جریان غلیظ توسط پمپ و بصورت هیدروگراف سیلابی صورت گرفت. دبی پایه‌ی آب ۵ لیتر بر ثانیه و حجم جریان غلیظ، با دو غلظت متفاوت ۱۰ و ۲۰ درصد، معادل ۴۶۰ 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 ۳ مخزن تولید جریان غلیظ و صافی جداسازی مواد از جریان را نشان می‌دهد.

مطابق شکل ۳-ب، در دستگاه آزمون، صافی مناسب با ظرفیت عبور کل جریان در خروجی فلوم تعبیه شده است که در مقابل جریان

این پژوهش در آزمایشگاه هیدرولیک و رسوب گروه مهندسی آب دانشکده کشاورزی دانشگاه بیرجند و در مدت ۶ ماه انجام شده است. با توجه به دائمی بودن جریان، ثبت سرعت، وضعیت برخورد و عبور جریان از موانع به کمک صفحه‌ی لوله پیتو و به روش تصویربرداری انجام شده است. صفحه‌ی لوله پیتو در بالادست موانع با قابلیت اندازه‌گیری با فاصله عمقی ۵ سانتیمتر نصب گردید و تصویربرداری صرفاً برای بررسی حرکت جریان غلیظ در طول فلوم و رفتار فیزیکی و مکانیکی برخورد و عبور جریان از موانع صورت گرفت [۱۷]. با وجود این‌که فلوم توانایی تغییر شیب طولی از ۳- تا ۳+ درصد را دارا بود، مقدار شیب طولی در آزمایش‌ها صفر در نظر گرفته شد [۲۷]. از صفحات پلاکسی گلاس به ضخامت ۳ میلی‌متر، دارای عرضی برابر عرض فلوم و تا ارتفاع ۳۰ سانتیمتر برای ساخت موانع بهره‌جویی شده است. 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 فاصله ۹ متری از دهانه تزریق جریان غلیظ نصب شدند. زاویه‌های نصب موانع نسبت به راستای عمود بر کف برابر با ۴۵، ۶۰،



شکل ۴. هیدروگراف تولیدی جریان سیلابی در آزمایش‌ها  
 Fig. 4. Flood flow production hydrograph in experiments

جدول ۱. متغیرها و تعداد تکرار مربوط به آن‌ها در آزمون‌ها  
 Table 1. Variables and the number of repetitions related to them in tests

متغیر	غلظت	نوع شکل مانع	تخلخل مانع	ردیف موانع	ضخامت مانع	زاویه نصب مانع
تعداد تکرار	۲	۲	۵	۲	۴	۴

کاملاً بصورت همگن در آمد. با نصب دریچه‌ی تنظیم و مانع مورد نظر، دبی پایه برقرار و در عمق آستانه حرکت تنظیم شد. با توجه به مشخصات جریان و ماده‌ی پلیمری و در نظر گرفتن محدودیت ابعاد فلوم آزمایشگاهی، بر اساس روش آشنایدر (بر مبنای سرعت سقوط ماده پلیمری و سرعت جریان غلیظ)، این عمق معادل ۲۵ سانتیمتر محاسبه شد. سپس مطابق شکل ۴، جریان غلیظ به صورت هیدروگراف سیلابی به جریان تزریق می‌شد. همان‌طور که در شکل ۴ نشان داده شده است، از کل زمان آزمون (۳۳۵/۴ ثانیه)، ۸۴ ثانیه (۲۵٪) به روند بالارونده، ۴۹/۸ ثانیه (۱۵٪) به دبی ثابت اوج و ۲۰۱/۶ ثانیه (۶۰٪) به روند پایین‌رونده اختصاص دارد. متوسط زمان پمپاژ حدود ۱۳۳/۸ ثانیه ثبت شده است.

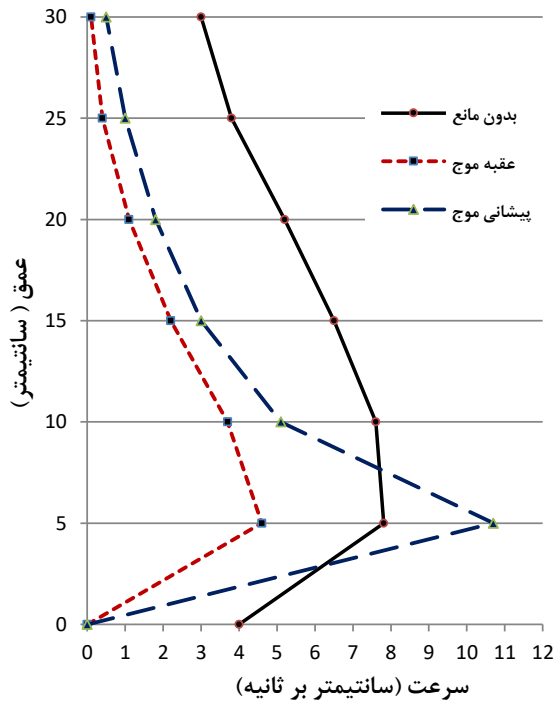
به منظور تعیین زمان آزمایش و اعتبارسنجی آن، نمونه‌ی شاهدی بصورت تغییرات زمانی بار رسوبی معلق به ازای عمق تنظیمی مورد نظر، برداشت شد. در این راستا، کمترین تغییرات بار رسوب مبنای انتخاب زمان بود، که منجر به تولید هیدروگراف شکل ۴ شد. در همه‌ی آزمایش‌ها، ویژگی‌های جریان از جمله سرعت، ارتفاع بدنه، زمان تزریق، زمان رسیدن پیشانی و عقبه مواد معلق به مانع، نحوه برخورد و عبور

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 سنجش و بررسی عملکرد موانع است و برای آزمون‌های بعدی مورد استفاده قرار می‌گیرد.

### ۳-۲- روش انجام آزمایش‌ها

در ابتدا، به منظور شناسایی بهتر پارامترهای موثر بر روند تله‌اندازی و رسوب‌گذاری با موانع نفوذپذیر در مسیر جریان، تحلیل ابعادی صورت گرفت. بر این اساس و با در نظر گرفتن محدودیت‌های آزمایشگاهی و مشخصات هیدرولیکی و رسوبی، دو پارامتر متغیر تخلخل موانع از نظر شکل (حفره‌ای و شیاری) و درصد سطح کل منافذ به سطح مانع انتخاب شد و آزمایش‌های زیادی تکرار و انجام شد.

به منظور اطمینان از معلق بودن ماده‌ی مورد استفاده، آزمایش‌های ویژه‌ای بر اساس تئوری‌های پیشنهادی و روش تجربی اختلاط و سرعت سقوط صورت گرفت. سپس، مخزن تغلیظ آبیگری و مقدار ماده لازم برای غلظت مورد نظر افزوده شد و به کمک همزن،



شکل ۵. نمونه پروفیل سرعت نزدیک شدن جریان در بالادست مانع  
Fig. 5. Sample profiles approach the velocity of the flow upstream of the barrier

پروفیل‌های سرعت نزدیک شدن جریان در بالادست مانع در شکل ۵ آمده است.

دلیل افزایش نسبی سرعت جریان در مجاورت مانع را می‌توان تاثیرپذیری از کاهش مجرای عبوری از مانع و همچنین کاهش بار رسوبی معلق جریان در طول مسیر بالادست دانست. پروفیل‌های قائم سرعت و غلظت جریان در فاصله‌های ۲ و ۵ متری بالادست مانع در شکل ۶ نشان داده شده است.

همان‌طور که در شکل ۶ مشاهده می‌شود، با نزدیک شدن جریان غلیظ به مانع، میانگین سرعت کم و همچنین اندازه‌ی سرعت عمق پراکندگی بیشتر پیدا می‌کند. همچنین به دلیل رسوب‌گذاری در مسیر به سمت مانع، از غلظت مواد کاسته شده و غلظت در بخش‌های عمقی جریان افزایش می‌یابد. تغییرات عمق در مجاورت بالادست موانع در شکل ۷ نشان داده شده است.

همان‌طور که در شکل ۷ مشاهده می‌شود، هر چه تخلخل مانع بیشتر باشد، نرخ کاهش عمق به ازای افزایش تخلخل، کمتر می‌شود. این روند هم در مورد جریان پایه بدون تنظیم سطح آب و هم در مورد جریان کل با تنظیم سطح آب در عمق، مشاهده شد. عمق بالادست

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 پژوهش، تعداد ۶۸ آزمون مستقل انجام شد که متغیرها و تعداد تکرار مربوط به هر کدام از آن‌ها در جدول ۱ گزارش شده است.

در این پژوهش، عامل‌های موثر بر فرآیند مورد نظر بصورت رابطه‌ی ۱ در نظر گرفته شد:

$$f(w, s, c, h, u, v, g', n, b, \theta, \mu, \rho, d) = 0 \quad (1)$$

که در رابطه‌ی ۱،  $w$  عرض مانع برابر عرض عرض فلوم،  $s$  شیب بستر،  $c$  غلظت،  $h$  ارتفاع بدنه جریان،  $u$  سرعت جریان غلیظ،  $v$  سرعت جریان پایه،  $g'$  شتاب ثقل کاهش یافته،  $n$  تعداد منفذ در عرض،  $b$  عرض یا قطر منفذ،  $\theta$  زاویه مانع،  $\mu$  لزجت جریان،  $\rho$  جرم مخصوص جریان،  $d$  ارتفاع پایه هستند. پس از حذف موارد ثابت و ترکیب مواردی باهم و آنالیز ابعادی به روش تئوری باکینگهام اعداد بدون بعد زیر به دست می‌آیند:

$$\Pi: \left( s, \theta, \frac{d}{h}, \frac{c}{\rho}, \frac{n \cdot b}{w}, \frac{\mu}{u \cdot h \cdot \rho}, \frac{g' \cdot h}{u^2} \right) \quad (2)$$

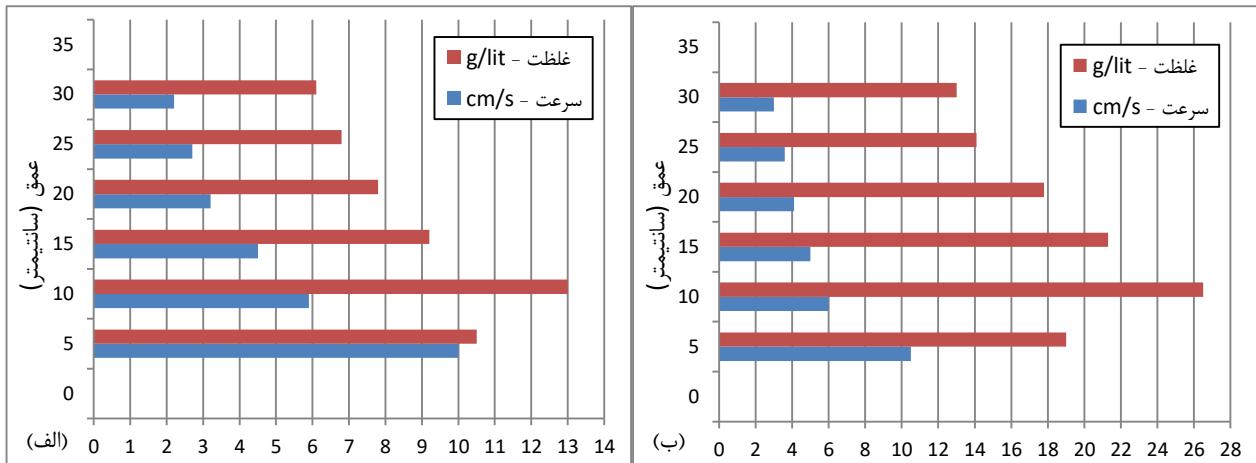
که در رابطه‌ی ۲، عامل  $\frac{n \cdot b}{w}$  بیانگر تخلخل، عامل  $\frac{\mu}{u \cdot h \cdot \rho}$  بیانگر عدد رینولدز و عامل  $\frac{g' \cdot h}{u^2}$  نیز عدد ریچاردسون است که جذر عکس آن، همان عدد فرود دنسیمیتریک نام دارد.

با توجه به تنظیم جریان و ایجاد عمق ثابت، همه‌ی آزمایش‌ها در محدوده‌ی جریان زیربحرانی قرار گرفتند که علاوه بر تطبیق بیشتر با جریان‌های طبیعی رودخانه‌ها، بر کنترل سرعت و رسوبات جریان موثرتر است. طبق برخی از نظریه‌های پیشنهادی [۳، ۴، ۱۶]، رفتار جریان در برخورد و عبور از موانع بر اساس عدد فرود دنسیمیتریک و ارتفاع بدنه، به ازای جریان زیربحرانی در محدوده‌ی مناسب‌تری قرار دارد.

### ۳- نتایج و بحث

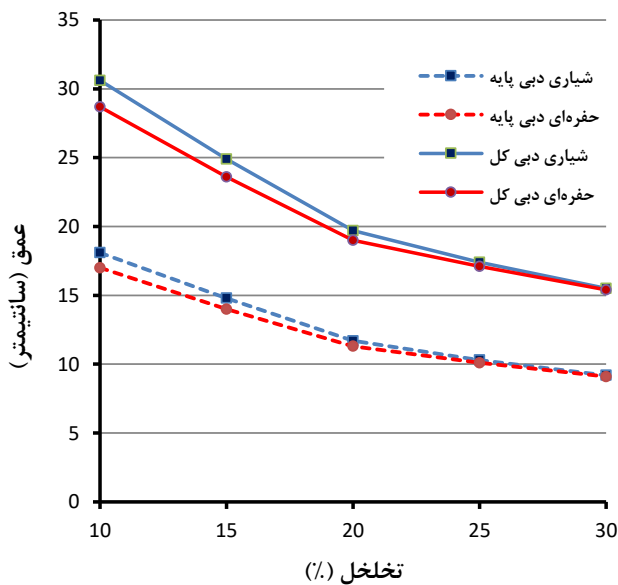
#### ۳-۱- بررسی سرعت جریان

اندازه‌گیری سرعت جریان به دلیل درهم بودن جریان با صفحه‌ی پیرومتری متصل به لوله‌های پیتو و همچنین تصویربرداری جانبی از فلوم صورت گرفت. سرعت به ازای تغییرات زمانی دبی، موقعیت نسبی محل برداشت و مانع در تخلخل‌های مختلف متفاوت بود. نمونه‌ای از



شکل ۶. پروفیل قائم سرعت و غلظت جریان با غلظت ۲۰٪ در الف) ۲ متری بالادست مانع؛ ب) ۵ متری بالادست مانع

Fig. 6. Vertical profile of flow rate and concentration with a concentration of 20% in a) 2 meters upstream of the barrier; b) 5 meters upstream of the obstacle



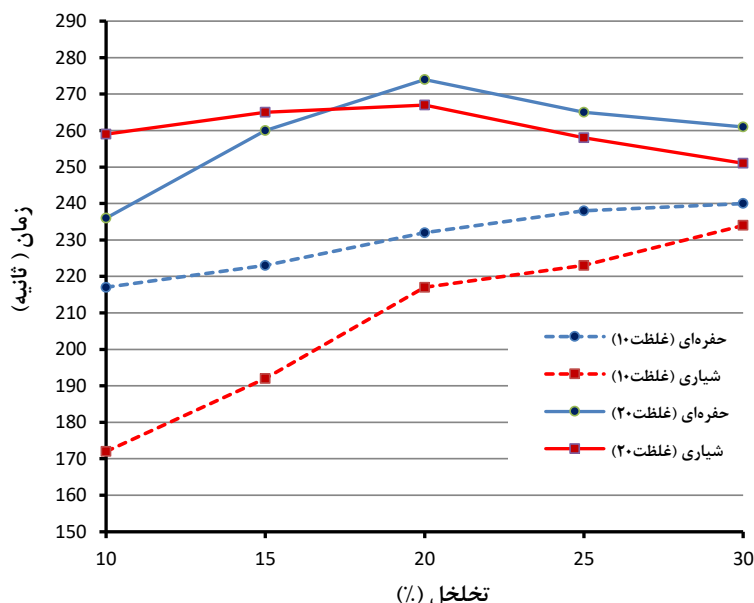
شکل ۷. وضعیت تغییرات عمق در مجاورت مانع به ازای جریان پایه و کل  
Fig. 7. The state of depth changes in the vicinity of obstacles per base and total flow

به منظور بررسی کلی عامل‌ها، داده‌های عمق و سرعت جریان در مجاورت بالادست مانع در جدول ۲ آمده است. نتیجه‌ی بررسی‌ها نشان می‌دهند که به دلیل عبور بخشی از جریان از بدنه مانع، سرعت پیشانی جریان با همان الگوی قبل از مانع رخ می‌دهد. ولی، در ترازهای بالایی جریان سرعت کاهش چشم‌گیری دارد. همچنین مشاهده شد که وضعیت ساکن و حتی جریان‌های معکوس بخش بالایی و سطحی ناشی از برخورد جریان با مانع، عامل تجمع بخشی

موانع شیاری، با میانگین ۴/۱۴ درصد، همواره بیشتر از موانع حفره‌ای به دست آمده است. علت اصلی این اختلاف، توزیع مناسب‌تر حفره‌ها در سطح مانع حفره‌ای و عبور راحت‌تر جریان از آن‌ها تشخیص داده شد. بررسی‌ها نشان دادند که پروفیل‌های سرعت در طول فلوام و به تناسب موقعیت نسبت به مانع، متفاوت از هم به دست آمدند. بطوری که در بالادست مانع، با دور شدن از مانع، سرعت‌ها متعادل‌تر شده و به فرم جریان بدون مانع نزدیک می‌شوند. در مجاورت مانع، سرعت‌ها در عمق متفاوت‌تر و دارای مقدار حداکثر بیشتری هستند. جریان‌های دارای موانع حفره‌ای، به دلیل عبور راحت‌تر جریان، دارای عمق بالادست کمتر و در مقابل با ۳/۶۲ درصد سرعت بیشتر بودند. علاوه بر آن، میانگین سرعت پیشانی و عقبه توده‌ی جریان غلیظ به ترتیب ۱۰/۷ و ۴/۶ سانتیمتر بر ثانیه برآورد شد که به ترتیب ۳۷ درصد بیشتر و ۳۰/۲ درصد کمتر از سرعت متوسط جریان است. تفاوت سرعت‌ها را می‌توان به علت عملکرد مانع بر کندی حرکت و عامل تله‌اندازی و رسوب‌گذاری جریان غلیظ دانست.

علاوه بر پروفیل‌های سرعت و عمق بالادست، زمان انجام آزمایش نیز مورد ارزیابی قرار گرفت. شکل ۸ زمان انجام آزمون از ابتدای تزریق جریان غلیظ به جریان پایه تا عبور آخرین ذره بار معلق از مانع را نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل ۸ مشاهده می‌شود، پراکنش و تغییرات زمان آزمایش در غلظت ۱۰٪ نسبت به غلظت ۲۰٪ بیشتر است. علاوه بر آن، روند تغییرات زمان آزمون در غلظت ۲۰٪ نسبت به غلظت ۱۰٪، متعادل‌تر می‌باشد.





شکل ۸. وضعیت تغییرات زمان آزمایش موانع با غلظت‌های مختلف جریان  
 Fig. 8. Status changes when testing obstacles with different flow concentrations

مقدار مواد عبوری از موانع نسبت به تخلخل آن در شکل ۱۰ نشان داده شده است. همچنین داده‌های مربوط به آن در جدول ۳ آمده است. با کسر مقدار ماده‌ی عبوری از کل ماده‌ی اولیه، میزان عملکرد تله‌اندازی مانع مشخص و بصورت درصد بیان می‌شود.

نتایج نشان می‌دهند که در همه موارد، عملکرد تله‌اندازی مانع حفره‌ای بهتر از مانع شیاری است، به طوری که در غلظت‌های ۱۰ و ۲۰ درصد، متوسط تله‌اندازی مانع‌های حفره‌ای به ترتیب ۰/۱۴ و ۰/۱۳ درصد بیشتر از مانع‌های شیاری گزارش شده است. در غلظت کم، عملکرد دو نوع مانع به‌طور نسبی مشابه است ولی در غلظت زیاد، عملکرد نوع حفره‌ای با نرخ بهتری در تله‌اندازی مواد موثر واقع شده است. همچنین در تخلخل بیشتر، عملکرد دو نوع مانع به هم نزدیکتر می‌باشد. بر این اساس، در تخلخل ۲۰ درصد به ازای غلظت ۱۰ درصد و در تخلخل ۲۵ درصد به ازای غلظت ۲۰ درصد، کمترین تله‌اندازی مشاهده شد. با تکرار آزمایش‌ها و بررسی بیشتر تخلخل بهینه، که دارای بیشترین مقدار عبور مواد است، برای نوع شیاری حدود ۲۲ درصد و برای نوع حفره‌ای حدود ۱۹ درصد تعیین شد. برای تخلخل‌های کمتر از این مقادیر، روند تله‌اندازی کاهشی و برای تخلخل‌های بیشتر، تله‌اندازی افزایشی است. این موضوع در بررسی‌های پیشین نیز تایید شده است که افزایش درصد تخلخل

جدول ۲. داده‌های عمق و سرعت جریان بالادست موانع

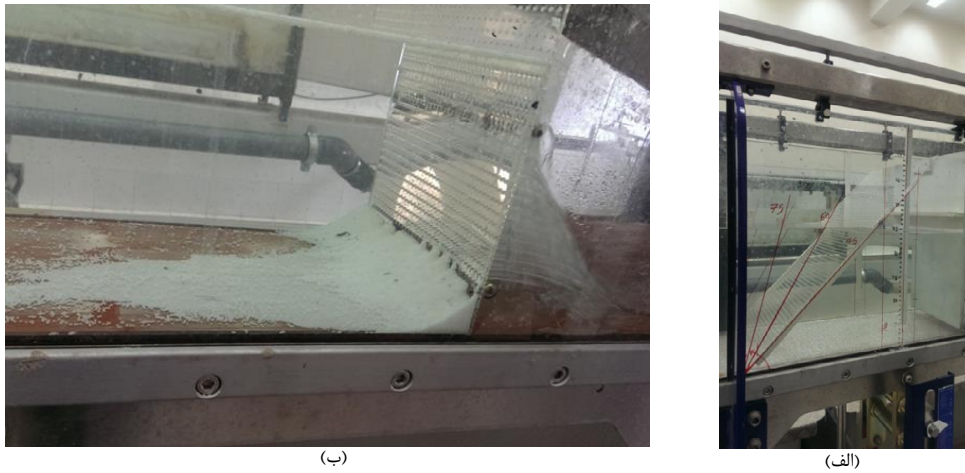
Table 2. Depth and velocity data flow upstream of obstacles

تخلخل (%)	عمق (cm)		سرعت (cm/s)	
	شیاری	حفره‌ای	شیاری	حفره‌ای
۱۰	۹/۲	۹/۸	۳۰/۶	۲۸/۷
۱۵	۱۱/۳	۱۱/۹	۲۴/۹	۲۳/۶
۲۰	۱۴/۳	۱۴/۸	۱۹/۷	۱۹
۲۵	۱۶/۲	۱۶/۵	۱۷/۴	۱۷/۱
۳۰	۱۸/۱	۱۸/۳	۱۵/۵	۱۵/۴

از مواد در سطح می‌شود. باید اشاره کرد، از آنجا که این بخش از مواد جمعی جزو توده‌ی جریان معلق نیستند، به عنوان مواد شناور، که حدود ۱۱ درصد از کل مواد اولیه را تشکیل می‌دادند، از مواد اولیه کسر شد. نحوه عبور جریان از مانع و تجمع مواد رسوبی بالادست مانع در شکل ۹ نشان داده شده است.

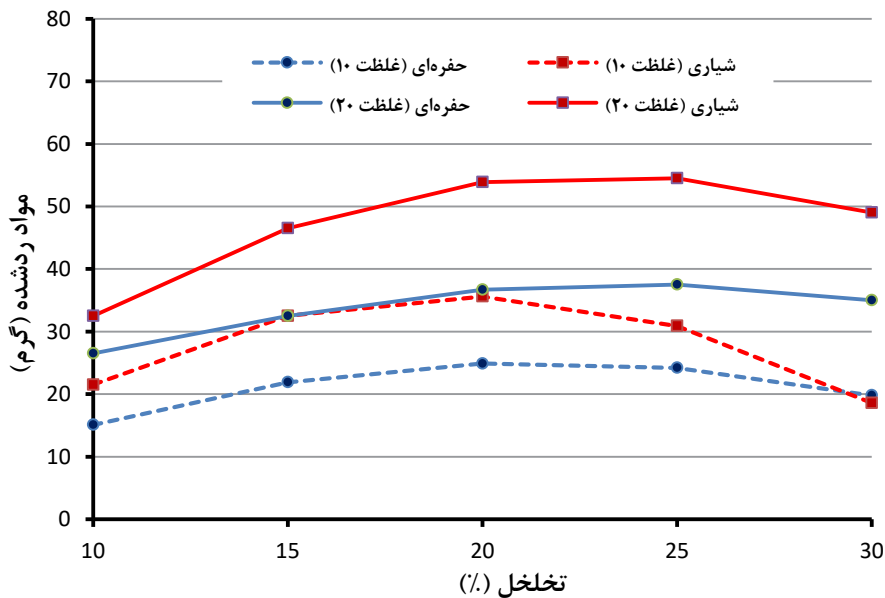
### ۲-۳- بررسی اثر تخلخل مانع

به منظور تعیین اثر درصد تخلخل سطح موانع با شرایط ثابت جریان، دو نوع مانع مورد استفاده در دو غلظت ۱۰ و ۲۰ درصد و به ازای پنج تخلخل با درصدهای ۱۰، ۱۵، ۲۰، ۲۵ و ۳۰ آزمایش شد.



شکل ۹. الف) نحوه عبور جریان از مانع؛ ب) تجمع مواد رسوبی بالادست مانع

Fig. 9.a) How the current passes through the obstacle; b) Accumulation of sediment material upstream of the barrier



شکل ۱۰. روند تغییرات مواد عبوری مانع با تخلخل و غلظت متفاوت

Fig. 10. The process of changing the passage of obstacles with different porosity and concentration

مختلف مانع در شکل ۱۲ آمده است. جدول ۴ نیز، داده های مربوط به عملکرد تله‌اندازی بازای زوایای نصب مانع (تخلخل ۱۰٪) و غلظت مختلف را گزارش کرده است.

بررسی‌ها نشان دادند که با افزایش زاویه‌ی نصب، مقدار تله‌اندازی هر دو نوع مانع کاهش می‌یابد. علاوه بر این، به ازای دو غلظت به کار رفته، مقدار کاهش تله‌اندازی در مانع شیاری بیشتر از مانع حفره‌ای مشاهده شد. مطابق شکل ۱۳، ضریب همبستگی در مانع شیاری و مانع حفره‌ای به ترتیب برابر ۰/۹۶۱ و ۰/۹۳۷ به دست آمد. علت

مانع بیش از ۴۱ درصد، تاثیری بر بهبود روند رسوب‌گذاری جریان ندارد.

### ۳-۳- بررسی اثر زاویه‌ی نصب مانع

در مرحله‌ی اول آزمایش‌ها، مانع عمود بر مسیر جریان (زاویه ۹۰ درجه) در نظر گرفته شدند. برای بررسی اثر زاویه‌ی نصب، مانع در همان موقعیت مکانی پیشین، در جهت جریان چرخانده شدند. مطابق با شکل ۱۱، زاویه‌های ۴۵، ۶۰، ۷۵ و ۹۰ درجه نسبت به راستای افقی کف انتخاب شدند. روند تغییرات مواد عبوری مانع به ازای زاویه‌های

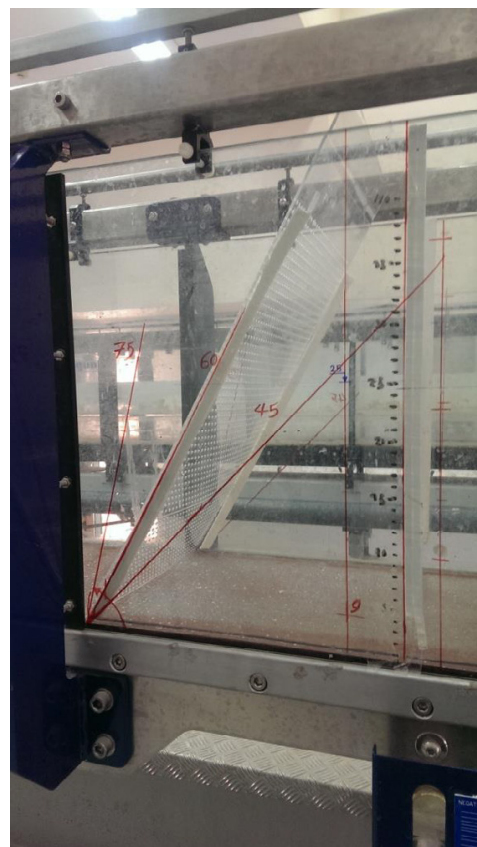
جدول ۳. داده‌های مربوط به تله اندازه مواد به ازای تخلخل و غلظت متفاوت

Table 3. Trap material data for different porosity and concentration

تخلخل (%)	غلظت ۱۰٪		غلظت ۲۰٪	
	تله‌اندازی مواد (gr)		تله‌اندازی مواد (gr)	
	شیاری	حفره ای	شیاری	حفره ای
۱۰	۵۰۱۰/۱	۵۰۱۶/۵	۱۰۰۳۰/۶	۱۰۰۳۶/۶
۱۵	۴۹۹۹/۱	۵۰۰۹/۷	۱۰۰۱۶/۶	۱۰۰۳۰/۶
۲۰	۴۹۹۶	۵۰۰۶/۷	۱۰۰۰۹/۲	۱۰۰۲۶/۴
۲۵	۵۰۰۰/۷	۵۰۰۷/۴	۱۰۰۰۸/۶	۱۰۰۲۵/۶
۳۰	۵۰۱۳	۵۰۱۱/۸	۱۰۰۱۴/۱	۱۰۰۲۸/۱

#### ۴- نتیجه‌گیری

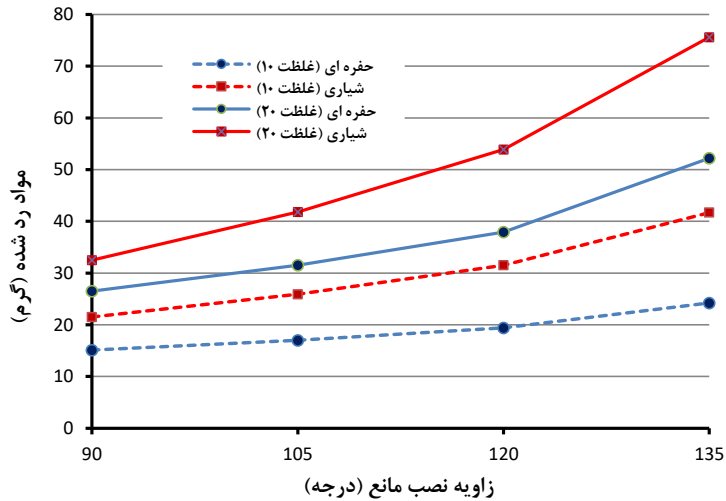
در این مقاله به بررسی آزمایشگاهی اثر تخلخل و زاویه‌ی موانع نفوذپذیر بر کنترل و تله‌اندازی جریان غلیظ پرداخته شده است. دو گونه مانع شیاری و حفره‌ای با عرض شیارها و قطر حفره‌هایی برابر با ۳ میلی‌متر و از صفحات پلاکسی گلاس انتخاب و ساخته شدند. از یک پلیمر نامحلول و معلق با چگالی ۱/۱۳۵ گرم در لیتر و متوسط قطر ۱/۱۵ میلی‌متر نیز برای ایجاد جریان غلیظ استفاده شد. آزمایش‌ها با دو غلظت متفاوت ۱۰ و ۲۰ درصد، پنج تخلخل گوناگون و چهار زاویه‌ی مختلف انجام شدند. بررسی نتیجه‌های آزمایشگاهی نشان دادند که میزان تخلخل بهینه برای موانع حفره‌ای و موانع شیاری به ترتیب ۲۲ و ۱۹ درصد می‌باشد. از طرف دیگر، با افزایش تخلخل، میزان تله‌اندازی تا تخلخل بهینه روند کاهشی و سپس افزایشی دارد. در همه‌ی آزمایش‌ها، مقدار تله‌اندازی موانع حفره‌ای نسبت به موانع شیاری بیشتر از شیاری به‌دست آمد. مقدار تله‌اندازی موانع حفره‌ای در غلظت‌های ۱۰ و ۲۰ درصد به ترتیب ۰/۱۳ و ۰/۱۴ درصد بیشتر از موانع شیاری بود. ارزیابی زاویه‌های مختلف موانع نسبت به راستای عمود بر کف جریان نشان داد که با افزایش زاویه، مقدار تله‌اندازی کاهش می‌یابد. این مقدار کاهش در تله‌اندازی با ضریب همبستگی‌هایی برابر ۰/۹۶۱ و ۰/۹۳۷ به ترتیب در موانع شیاری نسبت به موانع حفره‌ای بیشتر است. میانگین سرعت جریان در حالت استفاده از موانع حفره‌ای ۳/۶۲ درصد بیشتر از حالت استفاده از موانع شیاری به‌دست آمد و بر مبنای همه‌ی نتیجه‌ها، در شرایط مشابه، همواره موانع حفره‌ای عملکرد بهتری از موانع شیاری از خود نشان دادند.



شکل ۱۱. زاویه‌های انتخابی نصب موانع مازاد بر زاویه ۹۰

Fig. 11. Selected angles installation of obstacles in excess of angle 90

این امر را می‌توان عبور راحت‌تر جریان و تخلیه‌ی مواد در نتیجه‌ی فشار آب واقع روی موانع حفره‌ای دانست. به همین علت، نرخ کاهش



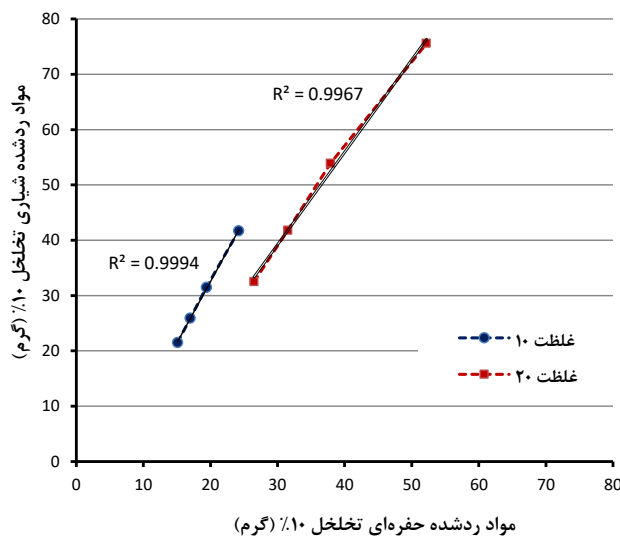
شکل ۱۲. تغییرات مواد رد شده با زاویه نصب مانع در غلظت مختلف

Fig. 12. Changes in rejected materials with barrier installation angle at different concentrations

جدول ۴. داده های مربوط به عملکرد تله اندازی بازای زوایای نصب مانع (تخلخل ۱۰٪) و غلظت مختلف

Table 4. Data on trapping performance based on barrier installation angles (10% porosity) and different concentrations

زاویه مانع	غلظت ۱۰٪		غلظت ۲۰٪	
	تله اندازی مواد (gr)		تله اندازی مواد (gr)	
	شیاری	حفره ای	شیاری	حفره ای
۹۰	۵۰۰۵/۷	۵۰۱۶/۵	۱۰۰۳۰/۶	۱۰۰۳۶/۶
۱۰۵	۵۰۰۰/۱	۵۰۱۴/۶	۱۰۰۲۱/۳	۱۰۰۳۱/۶
۱۲۰	۴۹۸۹/۹	۵۰۱۲/۲	۱۰۰۰۹/۲	۱۰۰۲۵/۲
۱۳۵	۵۰۳۱/۶	۵۰۰۷/۴	۹۹۸۷/۵	۱۰۰۱۰/۹



شکل ۱۳. برازش نسبی مواد رد شده موانع با زاویه نصب و غلظت متفاوت

Fig. 13. Relative fit of rejected material obstacles with different installation angle and concentration

- 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*, (2)143 04016018 (2016).
- [12] S. Keshtkar, S.A. Ayyoubzaeh, M. Ghodsian, Changes in Turbidity Current Flow Velocity Due to the Obstacle Height and an Abrupt Decrease in a Reservoir Bed Slope, *Water Engineering*, 69-55 (2017) (32)10. (In Persian)
- [13] G. De Cesare, C.D. Oehy, A.J. Schleiss, 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, 2008, pp. 44-41.
- [14] S.A. Pari, S. Kashefipour, M. Ghomeshi, M.S. Bajestan, Effects of obstacle heights on controlling turbidity currents with different concentrations and discharges, *Journal of Food, Agriculture & Environment*, 935-930 (2010) (2)8.
- [15] C.D. Oehy, A.J. Schleiss, Control of turbidity currents in reservoirs by solid and permeable obstacles, *Journal of Hydraulic Engineering*, 648-637 (2007) (6)133.
- [16] M. Kordnaeij, S.A. Asghari Pari, S.M. Sajjadi, M. Shafai Bajestan, Laboratory Investigation the effect of porosity obstacle and stepped porosity obstacle on control of gravity current, *Journal of Marine Science and Technology*, (4)16 96-86 (2018).
- [17] S.A. Asghari Pari, S.M. Mohagheghiyani, Numerical Investigation Effect in Using Plate and Tilt Columnar Barrier in Controlling Turbidity Current, *Iranian Journal of Irrigation & Drainage*, 366-357 (2015) (2)9.
- [18] S.A. Asghari Pari, S. Yazdanfar, M. Kordnaeij, Numerical Investigating Effect of Obstacle's Upstream Angle and Water Depth of Reservoir on Controlling Turbidity Current, *Water and Soil Science*, 219-207 (2016) (2-2)26. (In Persian)
- [19] M.A. Habib Mohammadi, S.A. Asghari Pari, S.M. Sajjadi, Experimental Investigation the Effects of Gabion Obstacle's Height, Shape and distance of obstacle from entrance to Control the Turbidity Current, *Journal of Water and Soil Conservation*, 265-251 (2016) (4)23. (In Persian)
- [1] A. Eghbalzadeh, M. Javan, Numerical simulation of a turbidity current flowing over a solid obstacle, in: 2nd International Conference on Environmental Science and Development, Singapore, 2011.
- [2] B.C. Kneller, Comments on the Origin and Significance of Density Stratification in Turbidity Currents, in: AGU Fall Meeting Abstracts, 2016.
- [3] S. Baghalian, M. Ghodsian, 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*, 4517-4503 (2017) (11)39.
- [4] E. Meiburg, M.M. Nasr-Azadani, Gravity and Turbidity Currents: Numerical Simulations and Theoretical Models, in: *Mixing and Dispersion in Flows Dominated by Rotation and Buoyancy*, Springer, 2018, pp. 180-129.
- [5] N. Barahmand, A. Shamsai, Experimental and theoretical study of density jumps on smooth and rough beds, *Lakes & Reservoirs: Research & Management*, -285 (2010) (4)15 306.
- [6] P. Hu, Z. Cao, G. Pender, G. Tan, Numerical modelling of turbidity currents in the Xiaolangdi reservoir, *Yellow River, China, Journal of hydrology*, 53-41 (2012) 464.
- [7] I.Y. Vladimirov, N. Korchagin, A. Savin, Wave influence of a suspension-carrying current on an obstacle in the flow, in: *Doklady Earth Sciences*, Springer Science & Business Media, 2015, pp. 286.
- [8] A. Farizan, S. Yaghoubi, B. Firoozabadi, H. Afshin, Effect of an obstacle on the depositional behaviour of turbidity currents, *Journal of Hydraulic Research*, 89-75 (2019) (1)57.
- [9] S. Chamoun, G. De Cesare, A.J. Schleiss, Managing reservoir sedimentation by venting turbidity currents: A review, *International Journal of Sediment Research*, (3)31 204-195 (2016).
- [10] S.A. Asghari Pari, S.M. Kashefipour, M. Ghomeshi, 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*, 1092-1080 (2017) (9)21.
- [11] S. Yaghoubi, H. Afshin, B. Firoozabadi, A. Farizan,



- Laboratory Investigation The Effect of Porosity of Permeable Obstacle on Control of Gravity Current, Irrigation Sciences and Engineering, 24-13 (2017) (1)40.
- [26] M.N. Abhari, M. Iranshahi, M. Ghodsian, B. Firoozabadi, Experimental study of obstacle effect on sediment transport of turbidity currents, Journal of Hydraulic Research, 629-618 (2018) (5)56.
- [27] R. Wilson, H. Friedrich, C. Stevens, Photometric velocity tracking tool for laboratory generated turbidity currents, in: River Flow 2016 – Constantinescu, Garcia & Hanes (Eds) Conference, 2016, pp. 867-862.
- [28] T. Tokyay, G. Constantinescu, E. Meiburg, Lock-exchange gravity currents with a high volume of release propagating over a periodic array of obstacles, Journal of Fluid Mechanics, 605-570 (2011) 672.
- [29] T. Tokyay, G. Constantinescu, E. Gonzalez-Juez, E. Meiburg, Gravity currents propagating over periodic arrays of blunt obstacles: Effect of the obstacle size, Journal of Fluids and Structures, 806-798 (2011) (6-5)27.
- [30] M. Nasr-Azadani, E. Meiburg, Turbidity currents interacting with three-dimensional seafloor topography, Journal of Fluid Mechanics, 443-409 (2014) 745.
- [20] E. Alves, R. Rossatto, Experimental study of turbidity currents flow around obstacles, in: 7th International Symposium on Stratified Flows, Rome, Italy, 2011.
- [21] H. Nogueira, C. Adduce, E. Alves, M. Franca, The influence of bed roughness on the dynamics of gravity currents, in: River Flow - Murillo (Ed.), Taylor & Francis Group, London, 2012, pp. 362-357.
- [22] M. Janocko, M. Cartigny, W. Nemeč, E. Hansen, Turbidity current hydraulics and sediment deposition in erodible sinuous channels: laboratory experiments and numerical simulations, Journal of Marine Petroleum Geology, 41 249-222 (2013).
- [23] J. McArthur, R. Wilson, H. Friedrich, Photometric analysis of the effect of substrates and obstacles on unconfined turbidity current flow propagation, in: Proc River Flow, 2014.
- [24] S. Yaghubi, P. Golchoubian, H. Afshin, B. Firoozabadi, Experimental Investigation of the Effect of Two Consecutive Obstacles on Turbidity Current, Journal of Selcuk University Natural and Applied Science, ((2013 627-615.
- [25] M. Zeynivand, S.M. kashafi Pour, M. Ghomeshi,

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

A. R. Jahangir, K. Esmaili, M. Faghfour Maghrebi, *Experimental Investigation Effect of the Porosity and Angle of Permeable Obstacles on Density Current Sedimentation*, *Amirkabir J. Civil Eng.*, 52(6) (2020) 1455-1468.

DOI: [10.22060/ceej.2019.15394.5907](https://doi.org/10.22060/ceej.2019.15394.5907)

