

بررسی آزمایشگاهی تأثیر آرایش موانع نفوذپذیر و شیب بستر بر مشخصه‌های هیدرولیکی جریان غلیظ

سید مصطفی طباطبائی^{۱*}

حسین خزیمه‌نژاد^۲

ابوالفضل اکبرپور^۳

پیمان ورجاوند^۴

چکیده

ورود جریان‌های غلیظ به مخازن سدها باعث کاهش عمر مفید سد و کم شدن یا حتی از بین رفتن حجم تنظیم آب و از دست رفتن سود ناشی از کنترل سیلاب و تولید برق می‌شود. یکی از روش‌های کنترل جریان غلیظ ایجاد موانع قبل از مخزن اصلی سد است. در این پژوهش تأثیر سه شیب بستر و آرایش موانع نفوذپذیر با شش نوع چیدمان مختلف بر ارتفاع پیشانی، سرعت پیشروی و عدد فرود دنسیومتریکی جریان غلیظ مورد بررسی قرار گرفته است. آزمایش‌ها در کانالی به طول ۱۰ متر و در سه شیب ۰، ۱ و ۲ درصد با آرایش همگراهای مشابه، واگراهای مشابه، موازی، Z شکل، زیگزاگ و شطرنجی در دو غلظت ۴۰ و ۸۰ گرم بر لیتر انجام شد. طبق نتایج به ترتیب آرایش همگراهای مشابه، شطرنجی، واگراهای مشابه، زیگزاگ، موازی و Z شکل بیشترین تأثیر را بر مشخصه‌های هیدرولیکی جریان غلیظ داشته است. تأثیر آرایش‌های مختلف موانع بر مشخصه‌های هیدرولیکی جریان غلیظ در بستر بدون شیب بیشتر از بستر شیب‌دار است. همچنین تأثیر آرایش موانع در محدوده جریان بحرانی به شدت کاهش می‌یابد. بیشترین تأثیر موانع در بستر بدون شیب مربوط به آرایش همگراهای مشابه بوده که عدد فرود دنسیومتریکی را ۶۵ درصد کاهش داده است. مقدار تأثیر این آرایش در بستر با شیب ۲ درصد به ۱۹ درصد رسیده است. کمترین تأثیر آرایش موانع مربوط به آرایش Z شکل می‌باشد. در این آرایش کاهش عدد فرود دنسیومتریکی در بستر بدون شیب ۵۰ درصد بوده است. این مقدار با افزایش شیب بستر از ۲ درصد به ۱۶ درصد رسیده است.

واژه‌های کلیدی:

جریان غلیظ، سرعت پیشانی، مخازن سد، موانع نفوذپذیر

۱. دانش‌آموخته کارشناسی ارشد مهندسی منابع آب دانشگاه بیرجند tabatabaei@yahoo.com

۲. استادیار گروه مهندسی آب دانشگاه بیرجند

۳. دانشیار گروه مهندسی عمران دانشگاه بیرجند

۴. استادیار پژوهشی بخش تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان خوزستان، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، اهواز، ایران.

مقدمه

احداث سد بر روی رودخانه‌ها، هیدرولیک جریان و رسوب رودخانه را تا حد زیادی تحت تأثیر قرار داده و باعث رسوب‌گذاری در مخازن می‌شود. تجمع رسوبات در مخازن سدها سالانه حدود ۱ درصد از حجم ذخیره آن‌ها را کاهش می‌دهد (تونیلو و پارکر^۱، ۲۰۰۳). در ایران سالانه حدود ۸۰۰ میلیون مترمکعب از حجم مفید سدها از طریق رسوب‌گذاری کاهش می‌یابد که این مقدار بیش از ۳ تن رسوب در هر ثانیه است (اکرمی، ۱۳۷۵). جریان غلیظ از عوامل اصلی رسوب‌گذاری مخازن سدها محسوب می‌شود که قابلیت حمل رسوبات تا غلظت ۱۲۰ گرم بر لیتر را دارد (افشین، ۱۳۸۸). این جریان اغلب در هنگام سیلاب در نقطه غوطه‌وری به زیر سطح آب مخزن فرو می‌رود و روی بستر مخزن تشکیل می‌شود (فیروزآبادی و فراهانی، ۲۰۰۳) و بر اثر اختلاف چگالی تحت اثر شتاب ثقل کاهش یافته به حرکت خود ادامه می‌دهد. این اختلاف چگالی علاوه بر ذرات معلق می‌تواند ناشی از اختلاف درجه حرارت، مواد محلول و یا ترکیبی از آن‌ها باشد (ترنر، ۱۹۷۳). در یک طبقه‌بندی جریان غلیظ به دو دسته جریان‌های فاقد ذره، مانند جریان غلیظ نمکی و جریان‌های حاوی ذرات معلق، مانند جریان گل‌آلود قابل تقسیم است و تفاوت این دو جریان در نوسانات چگالی می‌باشد (هوپر و سیمپسون^۲، ۱۹۸۰).

جریان غلیظ علاوه بر کاهش حجم مفید مخازن، حجم کنترل سیلاب، پایداری سد و کاهش کیفیت آب، باعث افزایش سرعت ساییدگی ماشین‌های آبی (توربین و...) شده و در نتیجه، بازده آن‌ها کاهش و هزینه‌های نگهداری افزایش می‌یابد.

یکی از قسمت‌های مهم و قابل بررسی در دینامیک جریان غلیظ پیشانی این جریان است و مطابق رابطه (۱) عامل پیشروی آن شتاب ثقل ناشی از اختلاف چگالی پیشانی جریان غلیظ و سیال پیرامون می‌باشد. در این رابطه، ρ_a چگالی جریان غلیظ و $\Delta\rho$ اختلاف چگالی بین جریان ورودی و ρ_a چگالی سیال پیرامون است (ژانگ و همکاران^۳، ۲۰۱۰) بررسی جریان‌های غلیظ برای تعیین رژیم جریان طبق رابطه (۲) از دو عدد رینولدز جریان غلیظ استفاده

می‌شود. همچنین یکی از پارامترهای مهم در بررسی جریان غلیظ عدد فرود دنسیومتریک است که به صورت رابطه (۳) بیان می‌شود و در بررسی شدت اختلاط سیال غلیظ با سیال پیرامون آن مطابق رابطه (۴) عدد فرود دنسیومتریک به صورت عدد ریچاردسون بیان می‌شود. در این روابط U و h به ترتیب سرعت متوسط و ارتفاع جریان غلیظ و θ زاویه شیب بستری که جریان بر روی آن حرکت می‌کند و $\mu_{d.c}$ لزجت سینماتیک جریان غلیظ می‌باشد (ترنر^۴، ۱۹۷۳).

$$g' = g(\rho_a - \rho_a) / \rho_a = g(\Delta\rho / \rho_a) \quad (1)$$

$$Re_D = \frac{U \cdot \rho_a \cdot h}{\mu_{d.c}} \quad (2)$$

$$Fr_D = \frac{U}{\sqrt{g' \times h \cos\theta}} \quad (3)$$

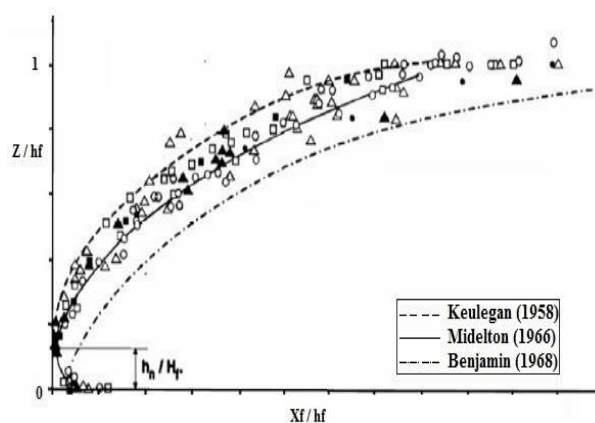
$$Ri = \frac{g' \times h \cos\theta}{U^2} \quad (4)$$

لذا جهت پیشگیری و کاهش ورود جریان‌های غلیظ به مخازن اصلی سدها، اقدامات سازه‌ای قبل از ورودی اصلی مخازن می‌تواند مؤثر واقع شود. در این راستا شناخت پارامترهای مؤثر بر جریان غلیظ در بررسی عملکرد روش اولین تحقیقات پیرامون سازه‌ای انتخاب شده، ضرورت دارد. جریان‌های غلیظ توسط فارل^۵ (۱۸۹۲) در کشور سوئیس گزارش شد. کئولگان^۶ (۱۹۵۸) تحقیقات خود را با جریان غلیظ نمکی در کانالی بدون شیب انجام داد و جهت محاسبه سرعت پیشانی جریان غلیظ رابطه‌ای ارائه داد. میدلتون^۷ (۱۹۶۶) با بررسی شکل پیشانی جریان غلیظ، ارتفاع پیشانی را دو برابر ارتفاع بدنه و سرعت آن را کمتر از سرعت بدنه جریان گزارش کرد. ترنر (۱۹۷۳ و ۱۹۷۹)، دنتون^۸ (۱۹۸۵) و قمشی (۱۹۹۵) نیز در پژوهش‌های خود سرعت پیشانی جریان غلیظ را مورد بررسی قرار دادند. آلتیناکار و همکاران^۹ (۱۹۹۰) ضمن بررسی سرعت پیشانی جریان غلیظ، مطابق شکل (۱) با استفاده از داده‌های سایر محققان شکل پیشانی

8. Turner
9. Forel
10. Keulegan
11. Middleton
12. Denton
13. Altinakar et al
14. Oehy & Schleiss

1. Toniolo & Parker
6. Huppert & Simpson
7. Zhang et al

زاویه ۴۵ و ۶۰ و ۹۰ درجه باعث کنترل جریان به میزان ۵۰ تا ۸۰ درصد می‌شود و چنانچه موانع نسبت به جهت جریان غلیظ به صورت عمودی قرار گیرند کارایی بیشتری نسبت به موانع با همان طول و به صورت مایل دارند. منصوری هفشجانی و همکاران (۱۳۹۵) در پژوهش خود سرعت نسبی پیشانی جریان غلیظ برای سیال پیرامون متحرک هم‌جهت با جریان غلیظ را مورد بررسی قرار داده و یک رابطه برای تخمین سرعت نسبی جریان غلیظ ارائه دادند. اصغری پری و همکاران (۱۳۹۵) به بررسی عددی اثر زاویه بالادست مانع و عمق آب مخزن در کنترل جریان غلیظ پرداختند. طبق نتایج آن‌ها با افزایش ارتفاع سطح آب ساکن درون مخزن عملکرد موانع در کنترل جریان غلیظ در حالت بحرانی و فوق بحرانی کاهش می‌یابد.



شکل ۱: ارتفاع بی‌بعد پیشانی جریان غلیظ (آلتیناکار و همکاران، ۱۹۹۰)

هدف از انجام این پژوهش بررسی تأثیر آرایش موانع نفوذپذیر و شیب بستر بر مشخصه‌های هیدرولیکی جریان غلیظ است. با توجه به پیشینه تحقیقات و پژوهش‌های انجام‌شده در زمینه‌ی جریان غلیظ، تاکنون اثر آرایش موانع بر مشخصه‌های هیدرولیکی جریان غلیظ مورد بررسی قرار نگرفته است. در این راستا به منظور تعیین میزان اثربخشی موانع بر کنترل جریان غلیظ، عدد فرود دنیسومتریک به‌عنوان عامل مهم پیشروی و دو پارامتر ارتفاع و سرعت به‌عنوان دو پارامتر مؤثر بر عدد فرود دنیسومتریک جریان غلیظ به‌طور مجزا مورد بررسی قرار گرفته و برای سرعت پیشروی جریان غلیظ بر روی بستر دارای موانع و بدون موانع روابطی ارائه شده است.

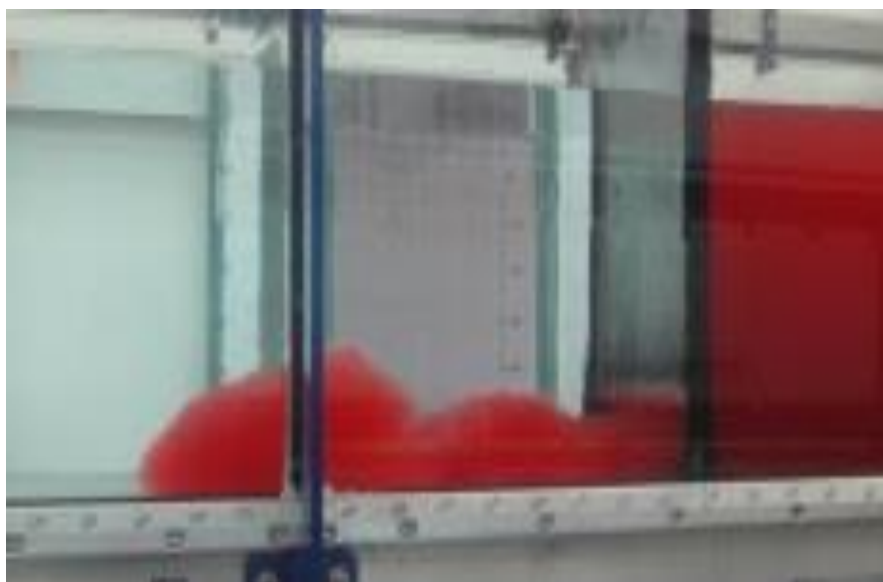
جریان غلیظ را به‌صورت بدون بعد ارائه دادند. اوهی و اشلایس^۱ (۲۰۰۷) به تأثیر روش‌های مختلف از جمله احداث مانع، احداث مانع مشبک بر کنترل جریان غلیظ در مخازن سدها پرداخته و به‌طور کلی نتیجه گرفتند که احداث مانع در جریان زیر بحرانی برای کنترل جریان مناسب است. شفافی بچستان و همکاران (۲۰۰۸) دستورالعمل اندازه‌گیری جریان غلیظ در مخزن سد دز را بیان نموده و با بررسی اجمالی داده‌های به‌دست‌آمده از یک واقعه سیلاب، ضخامت جریان غلیظ در مخزن سد دز را حداکثر ۲۵ متر برآورد نمودند. از برخی تحقیقات آزمایشگاهی نیز می‌توان به موارد زیر اشاره نمود. کشتکار و همکاران (۱۳۸۷) به بررسی اثر عدد فرود جریان غلیظ و شیب طولی مخزن بر توزیع قائم سرعت و غلظت جریان غلیظ پرداختند. نتایج آن‌ها نشان داد با افزایش شیب بستر کانال مقادیر غلظت در توزیع قائم افزایش و در طول کانال کاهش می‌یابد. نصرالله پور و قمشی (۲۰۱۲) به بررسی اثر شکل زبری در مشخصات پیشانی جریان غلیظ پرداختند. آن‌ها دو نوع شکل زبری مخروطی و استوانه‌ای را در سه ارتفاع مورد بررسی قراردادند و نتیجه گرفتند که با افزایش ارتفاع زبری برای یک شکل ثابت و همچنین با ارتفاع ثابت زبری و افزایش سطح مقطع در برابر جریان، غلظت و سرعت پیشانی جریان غلیظ کاهش و ارتفاع جریان کاهش می‌یابد. پورکاید و همکاران (۱۳۹۱) تأثیر هم‌زمان زبری و شیب بستر بر روی سرعت پیشانی جریان غلیظ را مورد بررسی قراردادند. نتایج آن‌ها نشان داد که سرعت پیشانی جریان با افزایش ارتفاع زبری کاهش و با افزایش شیب، افزایش می‌یابد. شیخی‌نژاد و قمشی (۱۳۹۳) سرعت بیشینه بدنه جریان غلیظ را بر روی بستر با زبری‌های استوانه‌ای مورد بررسی قرار دادند. نتایج آن‌ها نشان داد ایجاد زبری در طول کانال باعث کاهش سرعت بیشینه بدنه جریان غلیظ می‌شود و افزایش ارتفاع زبری تا حد معینی باعث کاهش ارتفاع بدنه جریان غلیظ می‌شود. اصغری پری و همکاران (۱۳۹۴) تأثیر مانع صفحه‌ای و موانع ستونی مورب با زوایای مختلف را جهت کنترل جریان غلیظ در حالت زیر بحرانی مورد بررسی قراردادند. نتایج آن‌ها نشان داد موانع ستونی با ارتفاع نسبی ۰/۵۲ برابر عمق جریان موجب کاهش ۶۰ درصدی دبی عبوری جریان غلیظ می‌شود. همچنین استفاده از مانع صفحه‌ای با ارتفاع ۱/۲۶ برابر ارتفاع جریان با

مواد و روش‌ها

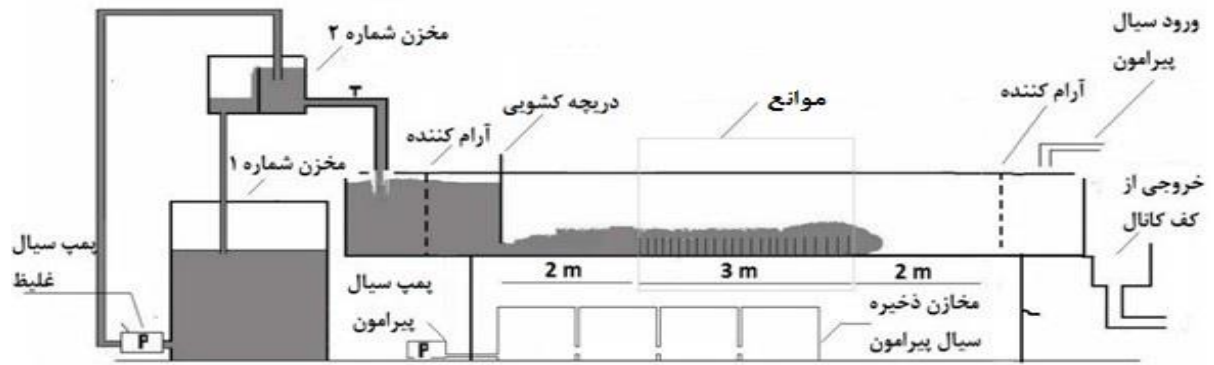
با توجه به اینکه استفاده از روش‌های سازه‌ای یکی از روش‌های کنترل جریان غلیظ است، استفاده از موانع نفوذپذیر باعث می‌شود در مواقع کم‌آبی رودخانه، آب در پشت آن جمع نشود. جهت بهبود عملکرد موانع می‌توان آن‌ها را در طول مسیر حرکت جریان در بازه‌هایی حساس با آرایش و چیدمان خاص قرار داد. انجام آزمایش‌ها در مقیاس واقعی نیاز به هزینه زیاد و تجهیزات دقیق و مقاوم دارد و نتیجه آزمایش‌ها نیز با تخمین و خطاهای زیادی همراه است. در این راستا ابتدا مطالعات آزمایشگاهی می‌تواند راهگشا باشد.

آزمایش‌های این پژوهش در آزمایشگاه هیدرولیک دانشکده کشاورزی دانشگاه بیرجند انجام گرفت. آزمایش‌ها در کانالی شیب‌پذیر به طول ۱۰ و عرض ۰/۳ و ارتفاع ۰/۴۸ متر انجام شد. با توجه به شرایط کانال به‌منظور تشکیل و پایدار شدن جریان غلیظ، نقطه شروع مانع‌گذاری در فاصله ۲ متری بعد از محل استقرار دریچه کشویی (ورودی جریان چگال به داخل سیال پیرامون) بود. برای ایجاد جریان غلیظ از یک مخزن اختلاط به حجم مفید ۳/۱۲ مترمکعب استفاده گردید. به‌منظور ایجاد جریان غلیظ از نمک پودر طعام استفاده شد و برای تمایز جریان غلیظ از سیال پیرامون ماده

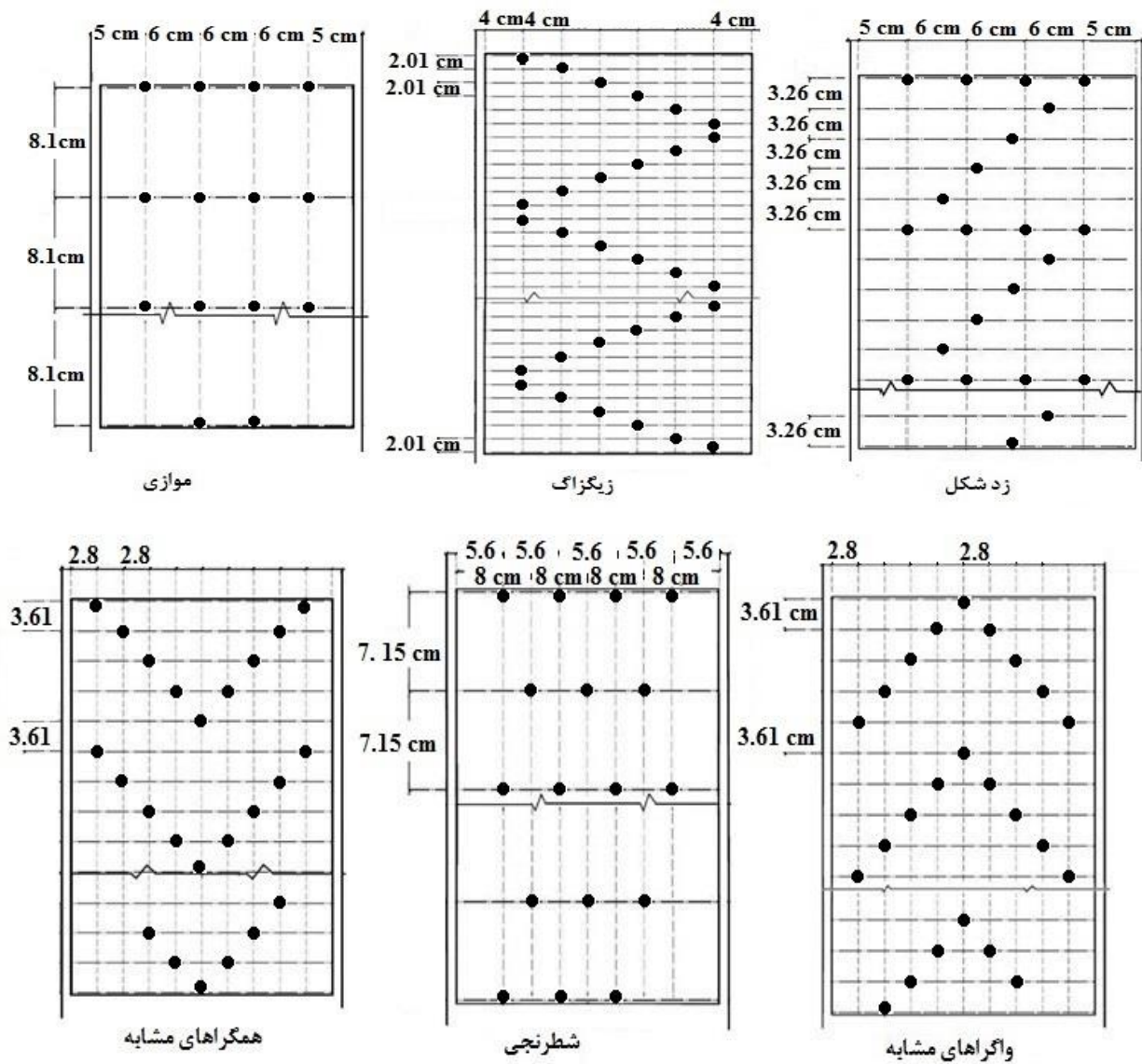
رنگی به آن اضافه شد. پس از هم‌تراز شدن سیال پیرامون و سیال غلیظ در ارتفاع موردنظر، دریچه کشویی به میزان ۵ سانتی‌متر باز می‌شد. بدین ترتیب جریان غلیظ برای همه آزمایش‌ها با دبی ثابت وارد سیال پیرامون می‌شد. در شکل (۲) نمونه‌ای از جریان غلیظ تشکیل‌شده در کانال و در شکل (۳) شماتیکی از جریان غلیظ شبیه‌سازی‌شده نشان داده شده است. از ویژگی‌های جریان غلیظ تشکیل‌شده در کانال آزمایشگاهی می‌توان به ارتفاع دو برابری پیشانی نسبت به بدنه، سرعت کمتر آن نسبت به بدنه و وجود گردابه‌ها و تلاطم در ناحیه مشترک جریان غلیظ با سیال پیرامون آن اشاره کرد. نوع آرایش موانع مطابق شکل (۴) است. آزمایش‌ها در سه شیب ۰، ۱ و ۲ درصد و با ۲ غلظت متوسط ۴۰ و ۸۰ گرم بر لیتر (مقدار g' برابر ۲۷ و ۵۵ انجام شد. پیشروی جریان غلیظ در طول کانال با استفاده از دوربین (Canon IXUS500 باکیفیت Full HD و سرعت فیلم‌برداری ۶۰ فریم بر ثانیه) فیلم‌برداری شد و متوسط سرعت پیشروی پیشانی جریان غلیظ در فواصل ۵۰ سانتیمتری در شش مقطع و پایین‌دست موانع در چهار مقطع اندازه‌گیری شد.



شکل ۲: نمونه‌ای از جریان غلیظ تشکیل‌شده در کانال



شکل ۳: شماتیک کلی از جریان غلیظ شبیه‌سازی شده



شکل ۴: پلان آرایش موانع

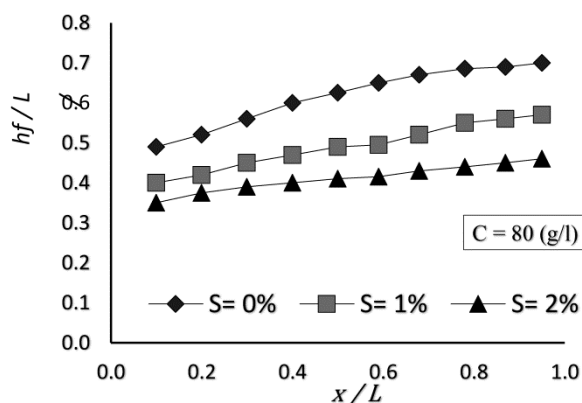
نتایج و بحث

مطابق جدول (۱) عدد فرود دنسیومتریکی در محدوده زیربحرانی و بحرانی واقع شده و محدوده عدد رینولدز جریان غلیظ نشان‌دهنده آشفتگی جریان غلیظ در کانال است. با توجه به آشفتگی جریان از بررسی عدد رینولدز صرف‌نظر شده است. همچنین طول کانال و ارتفاع پیشانی جریان غلیظ با تقسیم X و hf در نقطه موردنظر بر طول ناحیه موانع (L) به صورت بی‌بعد ارائه شده است.

در این بخش ابتدا ارتفاع و سرعت پیشانی جریان غلیظ به عنوان عوامل مؤثر بر عدد فرود دنسیومتریکی به طور مجزا و سپس عدد فرود دنسیومتریکی جریان غلیظ مورد بررسی قرار گرفته است.

بررسی ارتفاع پیشانی جریان غلیظ

شکل (۵) و شکل (۶) ارتفاع بی‌بعد پیشانی نسبت به طول بی‌بعد به ترتیب بر روی بستر صاف و دارای موانع نفوذپذیر را نشان می‌دهد. در بستر صاف با دور شدن از محل ورود جریان غلیظ، تداخل سیال پیرامون به داخل جریان غلیظ بیشتر شده و از نیروی رانش کاسته می‌شود. در نتیجه ارتفاع پیشانی در طول کانال روند افزایشی دارد. در مقاطع ثابت، افزایش شیب بستر باعث افزایش مومنتوم جریان و کاهش تنش برشی شده که منجر به کاهش شدت اختلاط سیال غلیظ با سیال پیرامون می‌شود. در شیب ثابت، افزایش غلظت باعث افزایش اختلاف چگالی بین جریان غلیظ و سیال پیرامون آن شده و جریان شتاب بیشتر گرفته و محل بیشینه سرعت به بستر نزدیک‌تر می‌شود که باعث کاهش ارتفاع پیشانی در غلظت ۸۰ گرم بر لیتر نسبت به غلظت ۴۰ گرم بر لیتر شده است

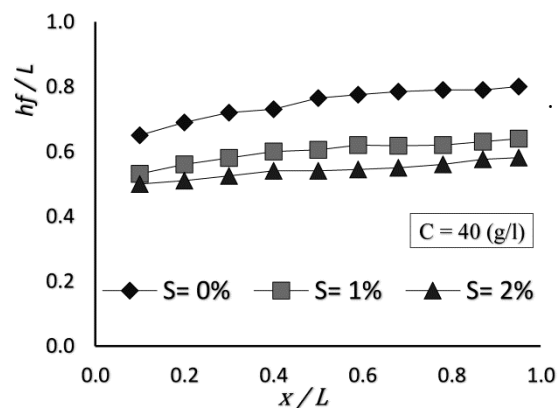


تأثیر موانع نفوذپذیر با آرایش‌های مختلف بر پیشروی جریان غلیظ را می‌توان وابسته به متغیرهای سینماتیکی، دینامیکی و هندسی چون: L طول ناحیه موانع، w عرض ناحیه موانع، S شیب بستر، H ارتفاع موانع (۲۰ سانتیمتر)، N تعداد موانع و در همه آرایش‌ها از تعداد ثابت ۱۵۰ عدد مانع استفاده شد. d قطر هر یک از موانع (۸/۵ میلی‌متر)، C غلظت متوسط جریان غلیظ، hf ارتفاع پیشانی جریان غلیظ، $\mu_{a.c}$ لجت دینامیکی جریان غلیظ، ρ_a جرم مخصوص سیال پیرامون، u_f سرعت متوسط پیشانی جریان غلیظ، g' شتاب ثقل مؤثر دانست که برخی از این عوامل ثابت و برخی متغیرند که تأثیر هم‌زمان عوامل متغیر در روابط (۱) تا (۴) در نظر گرفته شده است.

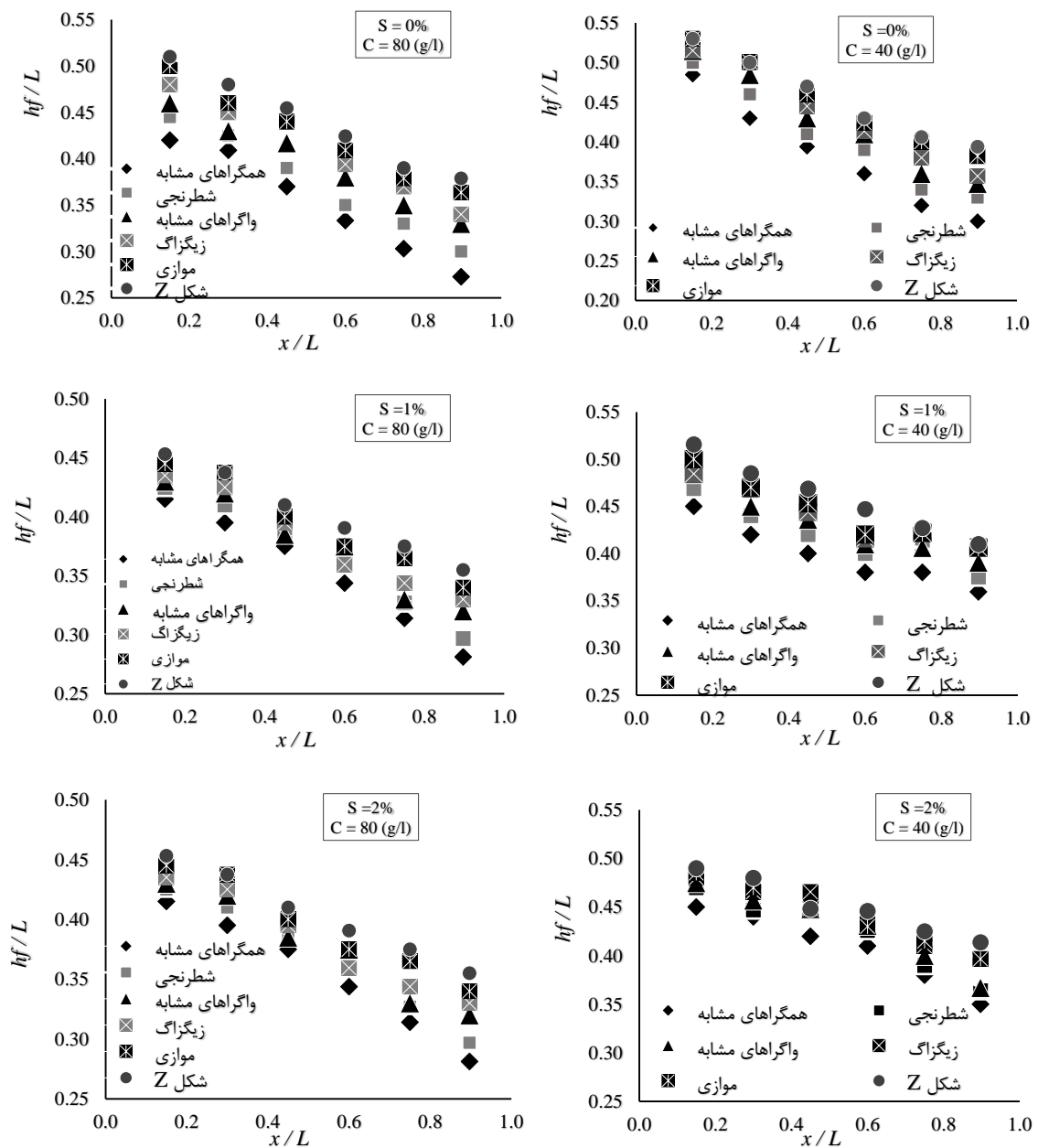
خلاصه‌ای از وضعیت آزمایش‌های انجام‌گرفته در جدول (۱) نشان داده شده است.

جدول ۱- خلاصه‌ای از آزمایش‌ها

تعداد آزمایش	نوع آزمایش	غلظت لیتر/گرم (g/l)	محدوده رینولدز $\times 10^5$	محدوده فرود دنسیومتریکی
۳	شاهد	۴۰	۰/۴ - ۰/۵۷	۰/۴۱۷ - ۰/۸۳۷
۳	شاهد	۸۰	۰/۵۳ - ۰/۹۱	۰/۴۶۱ - ۱/۳۲۱
۱۸	موانع	۴۰	۰/۱۳ - ۰/۵۵	۰/۲۲۷ - ۰/۷۵۶
۱۸	موانع	۸۰	۰/۲۸ - ۰/۸۷	۰/۳۸۱ - ۱/۲۷۴



شکل ۵: تغییرات ارتفاع پیشانی جریان غلیظ در طول کانال روی بستر بدون مانع



شکل ۶: تغییرات ارتفاع پیشانی جریان غلیظ در موانع

شیب صفر درصد تنش برشی افزایش یافته و در نتیجه آن بیشترین ارتفاع اختلاط بین سیال پیرامون و سیال غلیظ مربوط به آرایش همگراهای مشابه در شیب صفر درصد می‌باشد. در جدول (۲) تأثیر نسبی متوسط کاهش ارتفاع و تأثیر آرایش‌های موانع بر کاهش ارتفاع بی‌بعد پیشانی جریان غلیظ نشان داده شده است.

مطابق شکل (۶) پس از برخورد پیشانی جریان غلیظ با موانع، تنش برشی افزایش یافته و گردابه‌های عرضی و ناپایداری‌های کلوین پدید می‌آید که باعث افزایش اختلاط سیال غلیظ با سیال پیرامون می‌شود و ارتفاع ناحیه اختلاط بین دو سیال بیشتر می‌شود و در نتیجه آن، ارتفاع متوسط پیشانی با امتداد حرکت در طول کاهش می‌یابد. به دلیل اصطکاک و درون‌میختگی بیشتر در

جدول ۲- درصد کاهش نسبی ارتفاع بی بعد پیشانی جریان غلیظ در آرایش‌های مختلف

متوسط کاهش ارتفاع موانع	تأثیر آرایش موانع	شیب (درصد)	غلظت (گرم برلیتر)
۳۹	۱۶	۰	۴۰
۳۲	۱۲	۱	
۳۰	۱۰	۲	
۴۲	۱۸	۰	۸۰
۴۱	۹	۱	
۴۰	۵	۲	

دنتون ۱۹۸۵	۱/۵	رسوبی	۰/۶۸
آلتیناکار و همکاران ۱۹۹۰	$0 < S < 2/9$	نمکی و رسوبی	۰/۶۳
قمشی ۱۹۹۵	۰/۶۳۵	نمکی و رسوبی	۰/۷۲
تحقیق حاضر ۲۰۱۵ (بستر صاف)	$0 \leq S \leq 2$	نمکی	۰/۶۲۷
تحقیق حاضر ۲۰۱۵ (متوسط موانع نفوذپذیر)	$0 \leq S \leq 2$	نمکی	۰/۴۹۱

بررسی سرعت پیشانی جریان غلیظ

در بسیاری از پژوهش‌های مربوط به جریان غلیظ، سرعت پیشانی جریان تابعی از ارتفاع پیشانی و شتاب ثقل مؤثر معرفی شده است. کئولگان (۱۹۵۸) بر اساس عدد فرود رابطه (۵) را برای سرعت پیشانی جریان غلیظ ارائه نمود. در این رابطه C ضریب تجربی است و از تقسیم متوسط سرعت پیشانی بر سرعت برشی حاصل می‌شود. در این پژوهش متوسط ضریب C بر روی بستر صاف ۰/۶۲۷ و در بستر با موانع ۰/۴۹۱ حاصل شده است. در جدول (۳) شرایط آزمایش و ضرایب C محاسبه شده سایر محققین ارائه شده است.

$$U_f = C \sqrt{g' h_f} \quad (5)$$

جدول ۳- ضرایب تجربی ارائه شده توسط محققین مختلف

نام محقق	شیب %	نوع جریان	C
کئولگان ۱۹۵۸	$S > 4$	نمکی	۰/۷۵
میدلتون ۱۹۶۶	$4 < S < 0$	نمکی	۰/۷۵
ترنر ۱۹۷۳ و ۱۹۷۹	۰	رسوبی	$\sqrt{2}$

آلتیناکار و همکاران (۱۹۹۰) داده‌های خود را با داده‌های میدلتون (۱۹۶۶) و ترنر (۱۹۷۳ و ۱۹۷۹) مقایسه کردند. ترنر در محاسبه سرعت برشی از ارتفاع بدنه جریان غلیظ استفاده کرد و سایر محققین از ارتفاع پیشانی جریان استفاده کردند. به همین دلیل ضریب C ارائه شده توسط ترنر نسبت به سایر محققین مقدار بیشتری دارد. همچنین ضریب C در جریان غلیظ نمکی به دلیل شناوری بیشتر از جریان‌های رسوبی است. ضرایب این تحقیق مشابه ضرایب آلتیناکار و همکاران (۱۹۹۰) است و ضریب C در پوشش موانع نفوذپذیر نسبت به بستر صاف به دلیل استهلاک جریان غلیظ و کاهش متوسط سرعت در بین پوشش موانع کاهش یافته است.

در انتهای بخش بررسی سرعت، با استفاده از نرم‌افزار آماری SAS بین متغیرهای مؤثر بر پیشروی جریان غلیظ به ترتیب در حالت بستر با موانع نفوذپذیر و بستر بدون موانع روابط (۶) و (۷) برازش داده شد. با توجه به این روابط سرعت پیشروی بستگی زیادی به شتاب ثقل کاهش یافته و عمق جریان غلیظ دارد که این عوامل در روابط ارائه شده توسط کئولگان و سایر محققان نیز مشاهده می‌شود.

همچنین در روابط مذکور شیب بستر به عنوان عامل مجزا و مستقل می‌تواند به مقدار کمتری سرعت پیشروی

$$U_f = -0.23 + 1.5\sqrt{g'H_f} + 0.05(S) \quad (7)$$

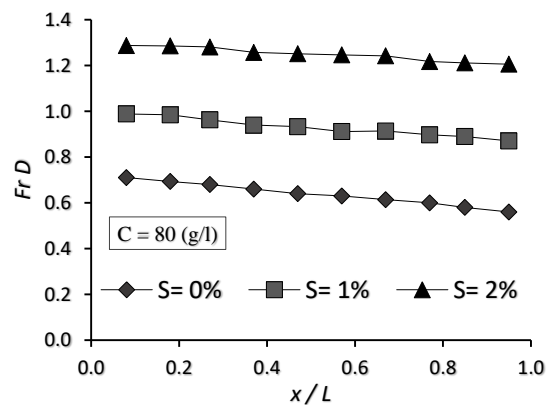
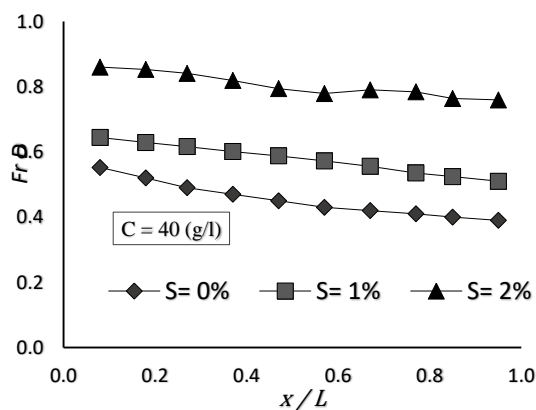
بررسی عدد فرود دنسیومتریکی

شکل (۷) و (۸) به ترتیب تغییرات عدد فرود دنسیومتریکی در طول کانال در حالت بدون وجود موانع و موانع با آرایش‌های مختلف را نشان می‌دهد.

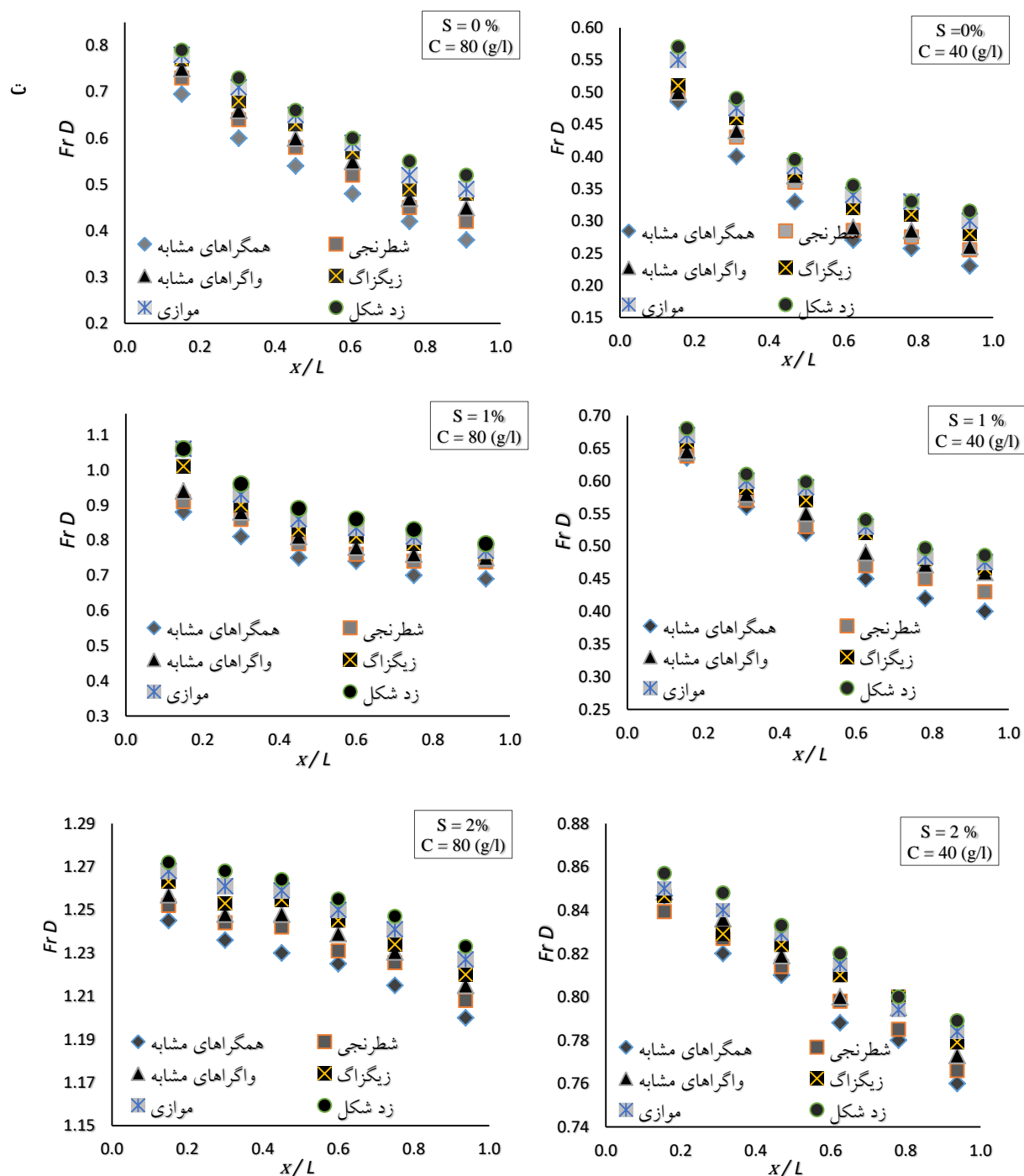
در بستر بدون موانع نفوذپذیر با امتداد پیشروی پیشانی جریان غلیظ در طول بی‌بعد، به دلیل تأثیر بیشتر کاهش سرعت نسبت به افزایش ارتفاع پیشانی بر عدد فرود، روند عدد فرود جریان غلیظ در طول بی‌بعد کاهشی است (شکل ۷). وجود موانع در برابر جریان غلیظ باعث کاهش عدد فرود در طول حرکت می‌شود. در این حالت پارامترهای مختلف به‌طور هم‌زمان اثرگذارند و شرایط پیچیده‌تری بر عدد فرود حاکم است. در شکل (۸) تغییرات عدد فرود در طول با آرایش موانع نشان داده شده است.

جریان غلیظ را تحت تأثیر قرار دهد. در واقع شیب بستر، هیدرولیک جریان را تحت تأثیر قرار داده و تغییرات آن بر روی پارامترهایی مانند h_f به مقدار بیشتری قابل ملاحظه است؛ به طوری که افزایش شیب بستر باعث کاهش ارتفاع پیشانی و افزایش نیروی شناوری شده و منجر به پایداری بیشتر جریان غلیظ می‌شود که این عوامل سرعت پیشروی جریان را تحت تأثیر قرار می‌دهد. همچنین وجود موانع نفوذپذیر بر روی بستر افزایش نیروی مقاوم در برابر جریان را سبب می‌شود و اغتشاش در جریان غلیظ و اختلاط بیشتر آن با سیال پیرامون را به همراه دارد که در نتیجه آن از پایداری جریان غلیظ کاسته می‌شود و منجر به کاهش ضریب در عبارت $\sqrt{g'H_f}$ و کاهش بیشتر این عبارت نسبت به حالت بستر بدون وجود موانع نفوذپذیر خواهد شد که در نهایت سرعت پیشروی جریان غلیظ با شدت بیشتری کاهش می‌یابد.

$$U_f = 0.26 - 0.6\sqrt{g'H_f} + 0.01 \quad (6)$$



شکل ۷- تغییرات عدد فرود دنسیومتریکی در بستر بدون پوشش موانع



شکل ۸: تغییرات عدد فرود دنسیومتریکی در آرایش‌های مختلف موانع

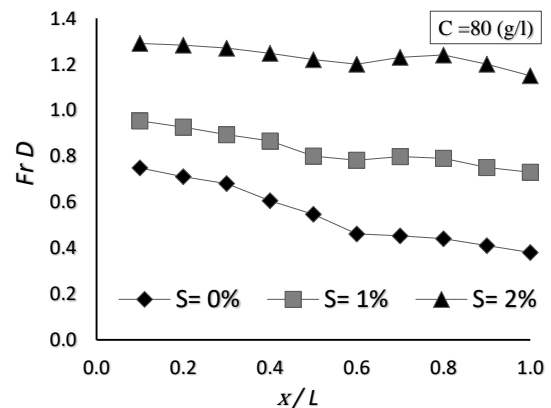
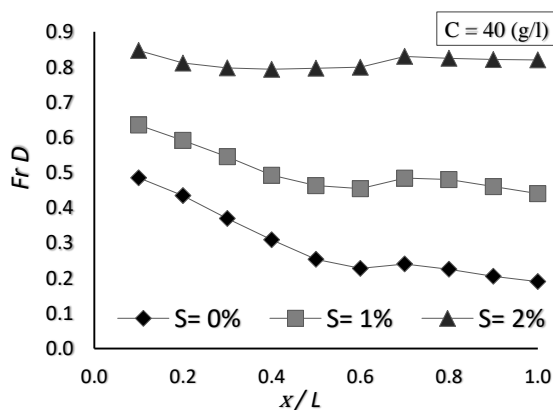
شدت بیشتری کاهش میابد. افزایش غلظت جریان غلیظ باعث افزایش شتاب ثقل مؤثر و افزایش سرعت و کاهش ارتفاع پیشانی جریان غلیظ می‌شود. این افزایش سرعت و کاهش ارتفاع به همراه یکدیگر باعث افزایش عدد فرود دنسیومتریکی جریان غلیظ می‌شود. با افزایش شیب بستر، سرعت پیشروی جریان افزایش و ارتفاع پیشانی کاهش

با توجه به شکل (۸) وجود موانع نفوذپذیر باعث افزایش نیروی مقاوم در برابر جریان غلیظ و افزایش تنش برشی می‌شود. در این حالت ناحیه اختلاط سیال پیرامون با سیال غلیظ افزایش و ارتفاع پیشانی و اختلاف چگالی کاهش می‌یابد. در نتیجه سرعت متوسط پیشانی با شدت بیشتری کم و عدد فرود دنسیومتریکی نسبت به حالت بستر صاف، با

جدول ۴- درصد کاهش نسبی عدد فرود دنسیومتریکی جریان غلیظ

متوسط کاهش فرود در موانع	تأثیر آرایش موانع	شیب (درصد)	غلظت (گرم برلیتر)
۵۶	۱۷	۰	۴۰
۳۰	۱۱	۱	
۱۴	۴	۲	
۴۲	۱۴	۰	۸۰
۲۱	۹	۱	
۱۰	۳	۲	

می‌یابد. دو عامل افزایش سرعت و کاهش ارتفاع باعث افزایش عدد فرود دنسیومتریکی جریان غلیظ می‌شود. در این حالت از تأثیر ارتفاع پوشش موانع کم می‌شود و پایداری جریان غلیظ در برابر موانع افزایش می‌یابد و از تأثیر موانع در کنترل جریان غلیظ کاسته می‌شود. با توجه به تأثیر بهتر آرایش‌های همگرای مشابه در کنترل جریان غلیظ در شکل (۹) تأثیر این آرایش در موانع و پس‌از آن بر عدد فرود دنسیومتریکی جریان غلیظ در سه شیب و دو غلظت ارائه شده است. در شیب صفر درصد به دلیل تنش برشی و اصطکاک بیشتر، شیب کاهش عدد فرود در طول زیاد است. با افزایش شیب بستر، شیب این خط ملایم‌تر می‌شود. پس از عبور جریان غلیظ از پوشش موانع در یک مقطع ارتفاع پیشانی کاهش و عدد فرود افزایش می‌یابد؛ اما به دلیل مستهلک شدن جریان در موانع این افزایش فرود قابل توجه نیست. در جدول (۴) متوسط کاهش نسبی عدد فرود دنسیومتریکی پیشانی جریان غلیظ در آرایش‌های مختلف موانع نفوذپذیر بر عدد فرود جریان غلیظ در طول ۳ متر موانع و ۲ متر بعد از آن نشان داده شده است.



شکل ۹: تغییرات عدد فرود دنسیومتریکی جریان غلیظ در آرایش همگراهای مشابه

جریان غلیظ باعث افزایش تنش برشی در فصل مشترک دو سیال و کاهش پایداری جریان غلیظ شده و عدد رینولدز و فرود جریان غلیظ که از عوامل اصلی پیشروی جریان غلیظ است، تحت تأثیر قرار می‌گیرد. در غلظت ۴۰ گرم بر لیتر، در آرایش‌های مختلف، متوسط تأثیر پوشش موانع در کنترل عدد فرود دنسیومتریکی جریان غلیظ در شیب صفر درصد

نتیجه‌گیری

جریان غلیظ با ورود به نزدیکی بدنه سد، عملکرد تأسیسات سد را مختل و باعث کاهش عمر مفید مخازن سدها می‌شود. در این پژوهش تأثیر آرایش موانع نفوذپذیر و شیب بستر بر عدد فرود پیشانی جریان غلیظ مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد موانع نفوذپذیر به‌عنوان نیروی مقاوم در برابر

۸- هفشجانی، م. ه. قمشی، م. شفای بجستان، م. واحدیان، ج. (۱۳۹۵). "تخمین سرعت نسبی پیشانی جریان غلیظ برای سیال پیرامون متحرک هم‌جهت با حرکت جریان غلیظ". *مجله علوم و مهندسی آبیاری*، ۳۹ (۴): ۱۹۳-۲۰۰.

9- Altinakar, M. S. Graf, W. H. and Hopfinger, E. J. (1990). "Weakly depositing turbidity current on a small slope". *Journal of Hydraulic Research*. 28, 55-80.

10-Benjamin, T.B. (1968). "Gravity Currents and Related Phenomena," *Journal of Fluid Mechanics*, vol. 31(3): 209-248.

11-Denton, R.A. (1985). "Density current inflows to run of the river reservoirs." *Proceedings of 21th IAHR Congress*.

12-Firoozabadi, B. Farhanieh, B. and Rad, M. (2003). "Hydraulodynamics of 2-D laminar turbidity current". *Journal of Hydraulic Research*, 41 (6), 122-130.

13-Forel, F.A. (1892). "The'orie du ravin sous-lacustre. Le le'man." *Rouge, Lausanne, Switzerland*, 1(3), 381-386.

14-Ghomeshi, M. (1995). "Reservoir sedimentation modelling" *PhD Thesis, University of Wollongong, Australia*.

15-Huppert, H. E. Simpson, J. E. (1980). "The Slumping of Gravity Currents." *Journal of Fluid Mechanics*. 99(1), 785-799.

16-Keulegan, G.H. (1958). "The Motion of Saline Fronts in Still Water." *US National Bureau of Standards Report*, 5831,29.

17-Middleton, G.V. Neal. (1966). "Experiments on density and turbidity currents motion of the head. *Canadian Journal of Earth Science*, 42(3), 523-546.

18-Nasrollahpour, R. and Ghomeshi, M. (2012). "Effect of Roughness Geometry on Characteristics of Density Currents Head". *Indian Journal of Science and Technology*. 5(12), 3783-3787.

19-Oehy, C. and Schleiss, A. (2007). "Control of Turbidity Currents in Reservoirs by Solid and Permeable Obstacles." *Journal of Hydraulic Engineering*. 133(6), 637-648.

20-Shafai Bejestan, M. Zahiri, A. and Kurdistani, S.M. (2008). "Density current measurement in Dez reservoir." *International Conference on Environmental and Water Resources, Thailand*.

21-Toniolo, H. Parker, G. And Voller, V. (2007). "Role of ponded turbidity currents in reservoir trap efficiency." *Journal of Hydraulic Engineering*. 133(6), 579-595.

22-Turner, J.S. (1973) and (1979). "Buoyancy Effects in Fluids." *Cambridge University Press. London, England*.

23- Zhang, L. Z. Zeng, L. Zhang, B. Li, Z. and Z. L. Luo. (2010). Numerical study on head advancement of axisymmetric gravity currents. *Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation*, 15(7):1893-1898.

برابر ۵۶ درصد است. با افزایش شیب بستر به ۲ درصد، این مقدار به ۱۱ درصد کاهش می‌یابد. آرایش و نوع چیدمان موانع نیز بر کاهش عدد فرود جریان غلیظ تأثیر دارد؛ اما همواره افزایش شیب بستر باعث کاهش تأثیر آرایش موانع بوده است. این کاهش تأثیر در محدوده جریان غلیظ بحرانی شدت بیشتری دارد. در غلظت ۴۰ گرم برلیتر، در شیب صفر درصد، اختلاف بین تأثیر نوع آرایش‌های موانع بر عدد فرود دنیسومتریک ۱۷ درصد بوده است. با افزایش شیب بستر به ۲ درصد، این اختلاف به ۳ درصد کاهش یافته است. ضریب تجربی C در برآورد سرعت در وضعیت موجود نسبت به بستر صاف به دلیل استهلاک جریان غلیظ ۲۲ درصد کاهش یافته است. در انتها مطابق با داده‌های این پژوهش با استفاده از نرم‌افزار آماری SAS به منظور پیش‌بینی سرعت پیشانی جریان غلیظ در بستر صاف و دارای پوشش موانع نفوذپذیر روابطی ارائه گردید.

مراجع

۱- اصغری پری، س. ا. محقیان، س. م. (۱۳۹۴). "بررسی عددی اثر استفاده از مانع صفحه‌ای و موانع ستونی مورب در کنترل جریان غلیظ". *نشریه آبیاری و زهکشی ایران*، ۲ (۹): ۳۶۶-۳۵۷.

۲- اصغری پری، س. ا. یزدان فر، س. ه. کردنائیج، م. (۱۳۹۵). "بررسی عددی اثر زاویه بالادست مانع و عمق آب مخزن در کنترل جریان غلیظ". *نشریه دانش آب‌و خاک*، ۲۶ (۲): ۲۱۹-۲۰۷.

۳- اکرمی، ا. (۱۳۷۵). "وضعیت رسوب‌گذاری در سدهای ایران و مقایسه آن با روش‌های تئوریک". پایان‌نامه کارشناسی ارشد مهندسی آبیاری، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تربیت مدرس.

۴- افشین، ح. (۱۳۸۸). "بررسی تجربی و تئوری جریان‌های چگال حاوی ذرات". پایان‌نامه دکتری، دانشکده مکانیک، دانشگاه صنعتی شریف.

۵- پورکاید، س. حسونی زاده، ه؛ و کاشفی پور، م. (۱۳۹۱). "بررسی تأثیر هم‌زمان شیب طولی و زبری بر سرعت پیشانی جریان غلیظ رسوبی با استفاده از مدل فیزیکی". نهمین سمینار بین‌المللی مهندسی رودخانه، دانشگاه شهید چمران اهواز.

۶- شیخی نژاد، ب. قمشی، م. (۱۳۹۳). "بررسی سرعت بیشینه در بدنه جریان غلیظ بر روی بستر با زبری‌های استوانه‌ای". *مجله علوم و مهندسی آبیاری (مجله علمی کشاورزی)*، ۳۷ (۴): ۱۰۷-۹۷.

۷- کشتکار، ش. ایوب زاده، س.ع. فیروزآبادی، ب؛ و نورمحمدی، ز. (۱۳۸۷). "بررسی آزمایشگاهی اثر عدد فرود جریان و شیب طولی مخزن بر توزیع غلظت و سرعت جریان گل‌آلود". *چهارمین کنگره ملی مهندسی عمران، دانشگاه تهران*.