

مقاله پژوهشی

DOR: 20.1001.1.24767131.1402.9.2.11.8

درصد همانندی: ۵٪

بررسی آزمایشگاهی اثر تعداد و فاصله موانع جانبی در کنترل جریان غلیظ

شیما بهادری^۱، مهدی دریایی^{۲*}، سید محمود کاشفی پور^۳، مهدی قمشی^۴

^۱ فارغ‌التحصیل دکترا، گروه سازه‌های آبی، دانشکده مهندسی آب و محیط‌زیست، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران.
sh-bahadori@stu.scu.ac.ir

^{۲*} نویسنده مسئول، دانشیار، گروه سازه‌های آبی، دانشکده مهندسی آب و محیط‌زیست، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران.
m.daryae@scu.ac.ir

^۳ استاد، گروه سازه‌های آبی، دانشکده مهندسی آب و محیط‌زیست، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران.
kashefipour@scu.ac.ir

^۴ استاد، گروه سازه‌های آبی، دانشکده مهندسی آب و محیط‌زیست، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران.
ghomeshi@scu.ac.ir

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۹/۱۱

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۷/۲۶

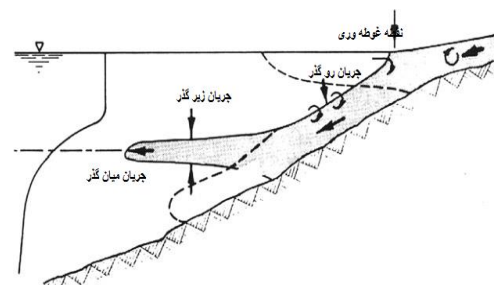
چکیده

نترل جریان غلیظ به مجموعه اقدامات سازه‌ای و غیرسازه‌ای گفته می‌شود که سبب انحراف، توقف و کاهش دبی آن می‌شود. در این مطالعه از صفحه‌های جانبی به‌عنوان اقدام سازه‌ای در کنترل جریان غلیظ نمکی استفاده شد. این صفحه‌ها در یک، دو و سه ردیف با ارتفاع نسبی ۰/۵، ۱ و ۱/۵ برابر ارتفاع بدنه جریان غلیظ و سه زاویه نصب ۳۰، ۶۰ و ۹۰ درجه قرار گرفتند و ۹ آزمایش نیز به‌صورت صفحه‌های مسدودکننده مجرا در نظر گرفته شدند. علاوه بر کنترل دبی پیشانی جریان، تغییرات پروفیل بدنه جریان غلیظ نیز بررسی و با حالت شاهد که آزمایش بدون نصب موانع بود مقایسه شد. بیشترین کاهش دبی پیشانی جریان در حالت سه ردیف مانع در ارتفاع نسبی ۱/۵ برابر ارتفاع بدنه با زاویه نصب ۶۰ درجه بود که دبی پیشانی جریان غلیظ را به میزان ۹۷ درصد کاهش داد. نتایج نشان داد که کاهش غلظت جریان غلیظ در اثر نصب صفحه‌های جانبی، به کاهش میزان غلظت بدنه در تمام اعماق نمونه‌گیری نسبت به حالت بدون نصب موانع منجر خواهد شد.

واژه‌های کلیدی: کنترل جریان غلیظ، صفحه‌های جانبی، پروفیل غلظت بدنه، پیشانی جریان غلیظ.

۱. مقدمه

حرکت جریان غلیظ^۱ ناشی از اثر نیروی گرانش بر اختلاف چگالی بین دو سیال است. این اختلاف چگالی می‌تواند در اثر اختلاف دما، شوری یا میزان ذرات معلق موجود در دو سیال ایجاد شود. در طبیعت، این جریان به شکل‌های مختلفی وجود دارد که جریان سیلابی ورودی به مخازن سدها یک نمونه از آن است. نخستین مشاهده‌های مستند جریان غلیظ در دریاچه‌ای در سوئیس ثبت شد [۱]. در ادامه، مطالعاتی بر جریان غلیظ در مخزن سد انجام شد [۲]. جریان غلیظ گل‌آلود^۲ سیلابی با ورود به دریاچه مخزن و بسته به چگالی و لایه‌بندی شوری آب ذخیره‌شده در آن می‌تواند به سه حالت زیرگذر، روگذر یا میان‌گذر (شکل ۱) به سمت بدنه سد حرکت کند [۳]. رسوب‌گذاری ناشی از جریان غلیظ می‌تواند به انسداد مجراها، اختلال در عملکرد سرریزها، آبگیرها و سازه‌های دیگر موجود در سد منجر شده و از میزان ظرفیت مفید آن بکاهد. کاهش ظرفیت ذخیره سدهای مخزن از جمله عوامل مهم و با پتانسیل خطر بالا در کاهش عمر مفید یک سد است که ارزیابی و کنترل آن از اولویت‌های برنامه‌ریزی در بهره‌برداری از سد می‌باشد.



شکل ۱. حالت‌های محتمل توسعه جریان غلیظ در مخزن [۳]

با گسترش مطالعات درباره جریان غلیظ و ویژگی‌های آن، مدل‌های آزمایشگاهی و عددی نیز بررسی شدند. در تحقیق دیگری معادله‌های حاکم بر حرکت جریان غلیظ دوبعدی را به دست آورده و به صورت عددی حل کردند [۴]. در این تحقیق بیان شد که به جریان‌های غلیظ یک نیروی مقاوم برشی ناشی از حرکت روی بستر وارد می‌شود. جریان‌های غلیظ می‌توانند فرساینده یا رسوب‌گذار، شتاب‌گیرنده یا با شتاب کاهش‌ی باشند. همچنین می‌توانند فوق‌بحرانی باشند و

از بالادست کنترل شوند یا زیربحرانی باشند و تحت کنترل پایین‌دست باشند. آلتیناکار و همکاران در تحقیقی ساختار جریان غلیظ را بررسی کردند [۵]. مطالعه آن‌ها شامل یک سری آزمایش جریان غلیظ با دو نوع رسوب بود. در طول این آزمایش‌ها، توزیع سرعت و غلظت به طور هم‌زمان در سه مقطع اندازه‌گیری شد. نتایج نشان داد که توزیع سرعت بدون بعد نسبت به تغییرات زیاد در توزیع غلظت نسبتاً غیر حساس است. همچنین تعدادی نسبت بدون بعد به منظور طبقه‌بندی ساختار بدنه جریان ارائه نمودند.

لی و همکاران آزمایش‌هایی برای مطالعه مشخصات هیدرولیکی جریان غلیظ در مخزن انجام دادند [۶]. جریان غلیظ مورد استفاده آن‌ها از جنس کائولین به عنوان مواد معلق بود و معادله‌هایی برای پروفیل‌های سرعت و غلظت بدون بعد ارائه دادند. ویژگی‌های فیزیکی جریان غلیظ در مخزن شامل نقطه فرورفتن جریان گل‌آلود، ناپایداری جریان غلیظ و مشخصات سرعت و غلظت آن در تحقیقی بررسی و یک روش تقریبی برای اندازه‌گیری دبی رسوبی خروجی ناشی از جریان غلیظ ارائه شد که نتایج آن با نتایج اندازه‌گیری شده در مخزن گوآنتینگ و دریاچه مید مطابقت خوبی داشت [۷]. یک مدل عددی یک‌بعدی برای شبیه‌سازی جریان غلیظ ارائه شد که بتواند علاوه بر هیدرودینامیک جریان، فرسایش و رسوب‌گذاری آن، گسترش پیشانی جریان و احتمال وقوع پرش‌های هیدرولیکی داخلی را نیز پیش‌بینی کند [۸]. در این مدل نتایج مدل عددی با مدل فیزیکی مقایسه شد. علاوه بر مطالعات درباره ساختار و عملکرد جریان غلیظ در رودخانه‌ها و مخازن، اقدامات مختلفی برای جلوگیری از ورود رسوبات به مخزن سد و کنترل آن نیز بررسی شده است. این اقدامات از ابزارهای مدیریتی تا سازه‌ای را دربرمی‌گیرد. ابزارهای مدیریتی همواره مهم‌ترین و مؤثرترین اقدام در این زمینه است. این اقدامات شامل روش‌های مدیریت حوضه آبریز، جلوگیری از فرسایش خاک با حفظ پوشش گیاهی بالادست سد، پایدارسازی و حفاظت شیب‌ها و سواحل رودخانه‌ها و ... بوده که به علت زمان‌بر بودن و وجود چالش‌های زیست‌محیطی، اجتماعی و سیاسی نیاز به تصمیم‌گیری‌های

غلیظ بر روی بستر زبر پرداختند و ساختار سرعت جریان غلیظ در حین انتشار روی بستر زبر را مورد آزمایش قرار دادند [۱۲]. آزمایش‌های شاهد در این تحقیق جریان غلیظ با بستر نرم بود. نتایج نشان داد که با زبر شدن بستر، سرعت جریان کاهش پیدا می‌کند. اصغری پری و همکاران در مطالعه‌ای آزمایشگاهی، به بررسی اثر ارتفاع مانع بر کنترل جریان غلیظ پرداختند [۱۳]. متغیر مورد بررسی آن‌ها در این مطالعه، غلظت و شیب جریان ورودی و ارتفاع مانع بود. در نهایت رابطه‌ای به‌منظور کنترل کامل جریان غلیظ به‌صورت تابعی از پارامترهای مذکور ارائه دادند. اصغری پری و محققان در تحقیقی با استفاده از مدل عددی، ایجاد گودال در بستر رودخانه و مخزن را به‌عنوان روشی برای کنترل جریان غلیظ معرفی کردند [۱۴]. دریایی تأثیر استفاده هم‌زمان از مانع^۳ و زبری در بستر را بر کنترل جریان غلیظ مورد بررسی قرار داد [۱۵]. خسرو پور و همکاران تأثیر هم‌زمان تراکم و آرایش بلوک‌های زبری با مانع را در کنترل جریان غلیظ به‌صورت آزمایشگاهی بررسی کردند [۱۶]. نتایج آن‌ها نشان داد که بیشترین درصد کنترل پیشانی در آرایش زیگزاگ اتفاق افتاده و کارگذاری مانع در این حالت همراه با زبری، میزان کنترل آن را افزایش خواهد داد. توزنده جانی و همکاران در تحقیقی با استفاده از مدل فیزیکی، اثر موانع متوالی را بر کنترل جریان غلیظ رسوبی و نمکی بررسی کردند [۱۷].

همان‌طور که مشاهده شد مطالعات انجام‌شده بر کنترل جریان غلیظ با استفاده از مانع، طیف گسترده‌ای از انواع موانع از نظر جنس مصالح، خصوصیات هندسی و آرایش را در بر گرفته است. به‌عنوان مثال علاوه بر تحقیقات مذکور سولر و همکاران موانع را به‌صورت استوانه‌های صلب عمودی در نظر گرفتند [۱۸]. ابهری و همکاران مانعی با شکل مثلثی و حبیب‌محمدی و همکاران موانع گابیونی را مورد بررسی قرار دادند [۱۹-۲۰]. با وجود معرفی روش‌های متنوع و مطالعات گسترده فیزیکی و عددی، یافتن روشی کاربردی، اجرایی، ایمن و مقرون‌به‌صرفه همچنان موضوعی باز و مورد بحث است. بنابراین در تحقیق حالت دیگری از نصب موانع

کلان، اختصاص بودجه‌های ملی، گاهی در بازه زمانی فوری یا مناسب قابل اجرا نبوده است؛ بنابراین استفاده از روش‌های جایگزین و سریع‌تر مانند اقدامات سازه‌ای درون مخزن ضرورت پیدا می‌کند. روش‌های سازه‌ای کنترل جریان غلیظ نیز تاکنون موضوع مطالعه پژوهشگران بسیاری قرار گرفته و روش‌ها و اقدامات متنوعی ارائه شده که اساس آن‌ها توقف کامل، انحراف، کاهش سرعت یا غلظت جریان غلیظ است. این روش‌ها می‌توانند در فواصلی دورتر از مخزن و در بالادست سد مانند ایجاد حوضچه‌های ترسیب یا سدهای اصلاحی یا در مخزن سد و در نزدیکی آن مانند فلاشینگ و لایروبی باشند. روش‌های دیگری در این راستا توسط سایر محققان ارائه شده است.

استفاده از مانع نفوذپذیر و صلب برای کنترل جریان غلیظ در مخزن سد، مورد بررسی فیزیکی و عددی قرار گرفت. در مدل فیزیکی توزیع سرعت اندازه‌گیری شد و مدل عددی، یک مدل دوبعدی بر اساس حل‌کننده جریان CFX-4.4 بود. مشخص شد که هر دو نوع مانع در کنترل جریان غلیظ مؤثر هستند و سرعت جریان را کاهش داده و رسوبات را در بالادست نگه می‌دارند [۹]. مانع صلب نسبت به مانع نفوذپذیر مؤثرتر بود. کنترل جریان غلیظ نمکی و رسوبی با استفاده از زبری مصنوعی به شکل مخروطی و استوانه‌ای در بستر در یک تحقیق مورد مطالعه قرار گرفت و پروفیل‌های سرعت و غلظت در مقاطع مختلف برداشت شد [۱۰]. نتیجه تحقیق بدین صورت بود که وجود زبری سبب افزایش ضخامت بدنه جریان، کاهش میزان حداکثر سرعت و افزایش فاصله مقدار نقطه اوج سرعت از بستر در پروفیل سرعت نرمال سرعت می‌شود. جهانگیر و همکاران به‌صورت آزمایشگاهی، اثر ضخامت و لایه دوم موانع نفوذپذیر بر کنترل و تله‌اندازی جریان غلیظ را مورد بررسی قرار دادند [۱۱]. موانع استفاده‌شده از نوع شیاری و حفره‌ای بود. پارامترهای غلظت، تخلخل، زاویه و ضخامت با دو لایه مانع بررسی شد و فاصله بهینه مانع دوم از اول به دست آمد. آن‌ها به این نتیجه رسیدند که در شرایط مشابه، همواره موانع حفره‌ای عملکرد بهتری از موانع شیاری دارند. نصرالله‌پور و همکاران به مطالعه جریان

در این رابطه Q_b دبی غلظت پیشانی جریان غلیظ قبل از مانع، Q_a دبی غلظت پیشانی جریان غلیظ بعد از مانع، S شیب کف کانال، g شتاب ثقل، ρ_t چگالی سیال غلیظ، ρ_a چگالی سیال پیرامون، Q_i دبی جریان غلیظ ورودی، θ زاویه نصب صفحه‌های جانبی، d میزان بازشدگی بین صفحه‌های جانبی، h ارتفاع صفحه، H ارتفاع بدنه جریان غلیظ، h_f ارتفاع پیشانی جریان غلیظ، U سرعت پیشانی جریان غلیظ، ν لزجت سینماتیکی جریان غلیظ، B عرض کانال، D فاصله بین ردیف صفحه‌ها، n تعداد ردیف صفحه‌ها و W ارتفاع بازشدگی دریاچه ابتدایی است (شکل ۲).

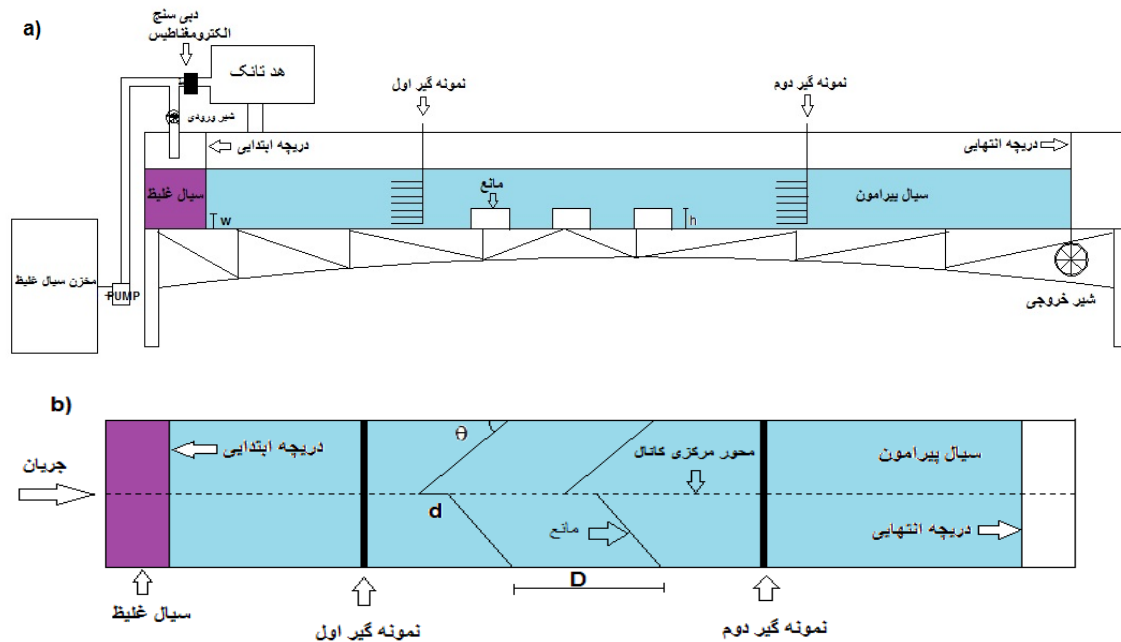
به صورت صفحه‌های جانبی روی کنترل پیشانی جریان غلیظ مورد بررسی قرار گرفت. هدف از تحقیق حاضر، بررسی تأثیر تعداد و فاصله نصب صفحه‌های جانبی روی کنترل جریان غلیظ است.

۲. مواد و روش‌ها

۲-۱. آنالیز ابعادی

به منظور انجام آنالیز ابعادی از روش باکینگهام استفاده شد. بر این اساس متغیرهای مؤثر در فیزیک مسئله بر اساس رابطه ۱ بیان شد.

$$f(Q_a, Q_b, S, g, \rho_t, \rho_a, Q_i, \theta, d, h, H, B, W, n, D, h_f, U, \nu) = 0 \quad (1)$$



شکل ۲. (a) نمای کانال از کنار (b) نمای کانال در پلان

صفحه‌های جانبی هستند. همچنین $Fr_d = \frac{U}{\sqrt{g'h_f \cos \alpha}}$ و $Re = \frac{Uh_f}{\nu}$ به ترتیب عدد فرود دنسیمتریک و عدد رینولدز پیشانی جریان غلیظ است. در تمامی آزمایش‌ها جریان زیر بحرانی $Fr_d < 1$ است. همچنین با توجه به محدوده عدد رینولدز جریان در حالت متلاطم بوده $Re > 2000$ پس از این عدد صرف نظر شد. در نهایت رابطه ۳ حاصل شد.

$$\% \Delta Q = f(n, \theta, \frac{h}{H}, \frac{D}{B}) \quad (3)$$

متغیرهای Q_i و W به عنوان متغیر تکراری در نظر گرفته شدند و رابطه ۲ حاصل شد.

$$f(n, \theta, \% \Delta Q, \frac{h}{H}, \frac{D}{B}, Fr, Re) = 0 \quad (2)$$

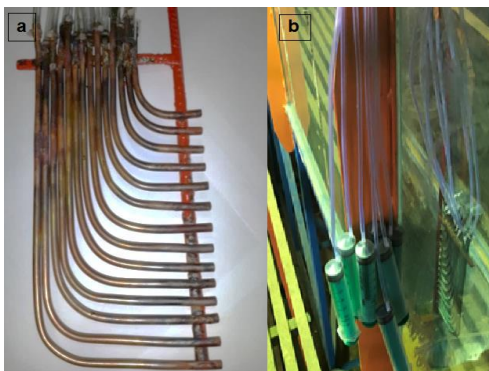
در این رابطه $\% \Delta Q = \frac{Q_b - Q_a}{Q_a} \times 100$ درصد کنترل دبی غلظت پیشانی جریان غلیظ، n تعداد ردیف صفحه‌های جانبی، $\frac{h}{H}$ فاصله نسبی صفحه‌های جانبی و $\frac{D}{B}$

۲-۲. روش انجام آزمایش

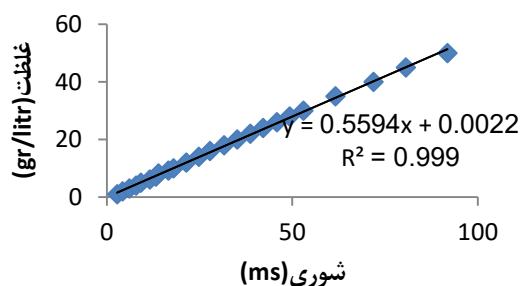
اندازه‌گیری غلظت پیشانی جریان غلیظ و بدنه آن، از نمونه‌گیر سیفونی استفاده (شکل ۴) و نمونه‌برداری قبل و بعد از عبور جریان از موانع انجام شد. نخستین نمونه‌گیر سیفونی با روش سعی و خطا در محل ۲/۳۵ متری از دریچه ابتدایی قرار گرفت به صورتی که جریان غلیظ به‌طور کامل توسعه پیدا کرده، پیشانی و بدنه آن به‌طور کامل تشکیل شوند. پس از برداشت نمونه‌ها، مقدار شوری آن‌ها با دستگاه شوری‌سنج قرائت و با استفاده از نمودار واسنجی شکل ۵، به غلظت برحسب گرم بر لیتر تبدیل شد.



شکل ۳. صفحه‌های جانبی شیشه‌ای نصب‌شده در فلوم



شکل ۴. (a) نمونه‌گیر سیفونی. (b) سرنگ نمونه‌گیری



شکل ۵. نمودار واسنجی شوری-غلظت

برای به‌دست آوردن سرعت متوسط پیشانی جریان غلیظ، در طول فلوم، اشل افقی با فواصل ۰/۵ متری نصب شد. از ابتدای

تحقیق پیش‌رو یک مطالعه آزمایشگاهی است که در آزمایشگاه مدل‌های فیزیکی دانشکده مهندسی آب و محیط‌زیست دانشگاه شهید چمران اهواز در فلومی به طول ۱۲، ارتفاع ۰/۸ و عرض ۰/۴ متر انجام شد. آب مورد استفاده برای سیال پیرامون، آب شهری بود که با سه پمپ با توانایی پمپاژ ۱۰۰ لیتر بر ثانیه تأمین می‌شد. سیال مورد استفاده به‌عنوان جریان غلیظ، محلول آب و نمک با غلظت ۲۰ گرم بر لیتر بود. سیال غلیظ از انحلال میزان لازم نمک در مخزن با حجم مشخص از آب تهیه و بعد از پمپاژ و رسیدن به تراز موردنظر وارد محفظه جریان غلیظ می‌شد. این محفظه با استفاده از یک دریچه کشویی از بقیه فلوم جدا شده و باقی قسمت فلوم با استفاده از آب شهری (سیال پیرامون) پر می‌شد. پس از اینکه تراز آب پیرامون و جریان غلیظ در دو طرف دریچه به یک اندازه می‌رسید، دریچه کشویی به میزان ۱۰ سانتی‌متر باز شده و جریان غلیظ به‌صورت زیرگذر از سیال پیرامون عبور می‌کرد. در انتهای فلوم یک شیر تخلیه وجود داشت که پس از رسیدن جریان غلیظ به انتهای فلوم، به اندازه‌ای باز می‌شد که جریان غلیظ بدون برهم خوردن یکنواختی بدنه آن، از فلوم خارج شود. در تمام آزمایش‌ها شیب فلوم به‌صورت افقی، دبی جریان غلیظ معادل ۰/۶ لیتر بر ثانیه و غلظت جریان غلیظ ورودی معادل ۲۰ گرم بر لیتر و ثابت در نظر گرفته شد. دبی ورودی با یک دستگاه دبی‌سنج الکترومغناطیسی کنترل می‌شد. در همه آزمایش‌ها، دمای سیال غلیظ و پیرامون با دماسنج دیجیتال اندازه‌گیری می‌شد تا توسعه جریان غلیظ فقط ناشی از اختلاف چگالی باشد. جنس موانع از شیشه به ضخامت ۴ میلی‌متر (شکل ۳) با سه ارتفاع نسبی $\frac{h}{H} = 0.5, 1, 1.5$ به ترتیب ۳، ۶ و ۹ سانتی‌متر بود که با سه زاویه نصب ۳۰، ۶۰ و ۹۰ درجه نسبت به دیواره فلوم در یک، دو و سه ردیف نصب شدند. حالت چهارم نصب صفحه‌ها به صورتی در نظر گرفته شد که صفحه‌ها، عرض کانال را به‌طور کامل مسدود کنند. برای فاصله بین ردیف‌ها در حالت دو و سه ردیف، سه فاصله نسبی ۰/۵، ۱ و ۱/۵ به ترتیب ۲۰، ۴۰ و ۶۰ سانتی‌متر در نظر گرفته شد. برای

۳. یافته‌ها و بحث

۳-۱. درصد کنترل پیشانی جریان غلیظ

همان‌طور که گفته شد در تحقیق حاضر، هدف از نصب موانع به صورت صفحه‌های جانبی، کنترل پیشانی جریان غلیظ است. در جدول ۱، مقادیر کنترل دبی پیشانی جریان غلیظ برای سناریوهای موردنظر در این تحقیق ارائه شده است.

باز شدن دریچه محفظه جریان غلیظ، از حرکت جریان فیلم‌برداری شد، با استفاده از دستگاه زمان‌سنج و فواصل طی شده با جریان غلیظ، سرعت متوسط پیشانی محاسبه شد. ارتفاع پیشانی جریان غلیظ با استفاده از نصب اشل‌های قائم نصب‌شده روی دیواره فلوم تعیین شد. به‌منظور تعیین دبی پیشانی جریان غلیظ از رابطه ۴ استفاده شد.

$$Q = U * B * h_f * C \quad (4)$$

در این رابطه C غلظت^۴ متوسط پیشانی است که در واقع متوسط غلظت پیشانی در فواصل ۴ و ۶ سانتی‌متری از کف فلوم می‌باشد.

جدول ۱. درصد کنترل پیشانی جریان غلیظ برای حالت‌های مختلف کارگذاری صفحه‌های جانبی

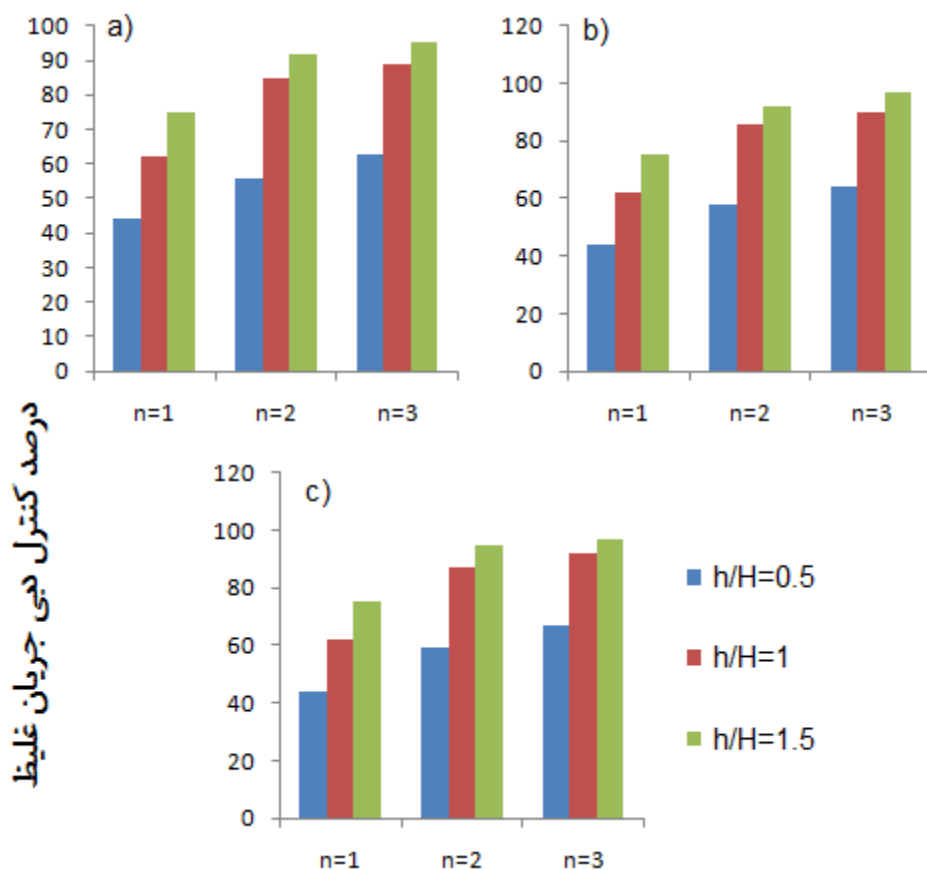
	θ	D/B=0.5			D/B=1			D/B=1.5		
		n = 1	n = 2	n = 3	n = 1	n = 2	n = 3	n = 1	n = 2	n = 3
$\frac{h}{H} = 0.5$	۳۰	۲۲	۴۱	۵۹	۲۲	۴۲	۵۹	۲۲	۴۹	۶۱
	۶۰	۴۴	۵۶	۶۳	۴۴	۵۸	۶۴	۴۴	۵۹	۶۷
	۹۰	۳۲	۴۲	۶۰	۳۲	۴۲	۶۳	۳۲	۵۶	۶۴
	حالت مسدود	۲۹	۵۳	۶۱	۲۹	۶۱	۶۴	۲۹	۶۲	۶۴
$\frac{h}{H} = 1$	۳۰	۵۹	۸۰	۸۱	۵۹	۸۲	۸۲	۵۹	۸۳	۸۵
	۶۰	۶۱	۸۵	۸۹	۶۱	۸۶	۹۰	۶۱	۸۷	۹۲
	۹۰	۶۰	۸۲	۸۵	۶۰	۸۲	۸۷	۶۰	۸۴	۸۹
	حالت مسدود	۶۲	۷۵	۸۶	۶۲	۷۷	۸۸	۶۲	۷۸	۸۸
$\frac{h}{H} = 1.5$	۳۰	۶۴	۸۹	۹۰	۶۴	۸۹	۹۲	۶۴	۹۰	۹۳
	۶۰	۸۶	۹۲	۹۵	۸۶	۹۲	۹۷	۸۶	۹۵	۹۷
	۹۰	۷۰	۹۱	۹۳	۷۰	۹۳	۹۶	۷۰	۹۵	۹۶
	حالت مسدود	۸۵	۸۸	۹۲	۸۵	۸۸	۹۲	۸۵	۸۸	۹۴

صفحه‌ها در دو ارتفاع نسبی $\frac{h}{H} = 1$ و $\frac{h}{H} = 1.5$ از یک ردیف به دو ردیف، تفاوت قابل‌ملاحظه‌ای در میزان کاهش دبی پیشانی داشته است. برای مثال در $\frac{h}{H} = 1$ در زاویه ۶۰ درجه، میزان کاهش دبی پیشانی برای حالت تک ردیف مانع ۶۱ درصد و در حالت دو ردیف مانع ۸۵ درصد است. اما با افزایش موانع به سه ردیف، میزان کاهش ۸۹ درصد شده است که تفاوت معناداری با دو ردیف ندارد. علت این مسئله را می‌توان این موضوع دانست که بخش زیادی از دبی جریان در اثر برخورد با دو ردیف مانع مهار شده، جریان با سرعت و

طبق آنچه در جدول ۱ مشاهده می‌شود، براساس نتایج آزمایش‌ها، در تمامی فواصل بین صفحه‌ها و ارتفاع نسبی صفحه‌ها و زوایای نصب، با افزایش تعداد ردیف صفحه‌ها، درصد کنترل دبی پیشانی افزایش یافت. با افزایش تعداد ردیف، بخشی از جریان غلیظ که با برخورد به ردیف اول صفحه‌ها، از روی آن‌ها و فضای خالی صفحه‌ها عبور کرده، به ردیف بعدی برخورد کرده و دوباره بخشی از جریان در پشت صفحه متوقف شده یا سرعت آن کمتر می‌شود. می‌توان در شکل ۶ مشاهده کرد، افزایش تعداد ردیف

مجرا را به‌طور کامل مسدود کرده‌اند، میزان کاهش دبی پیشانی، تفاوت معنادار یا کاهش قابل‌ملاحظه‌ای با حالت نصب صفحه‌ها به‌صورت زاویه‌دار نداشته و در بعضی موارد حتی کمتر کاهش یافته است، برای مثال در جدول ۱ در $\frac{h}{H} = 0.5$ در حالت مجرای مسدود، ۲۹ درصد کاهش دبی پیشانی محاسبه شده که نسبت به زوایای ۶۰ و ۹۰ درجه به ترتیب ۱۵ و ۳ درصد کمتر است. با توجه به اینکه نصب صفحه‌ها به صورتی که مجرا را مسدود کنند، از نظر اجرایی سخت و از نظر پایداری به علت نشست رسوبات در پشت آن‌ها ضعیف‌تر است، می‌توان گفت روش نصب صفحه‌ها به‌صورت زاویه‌دار نسبت به روش مجرای مسدود برتری دارد.

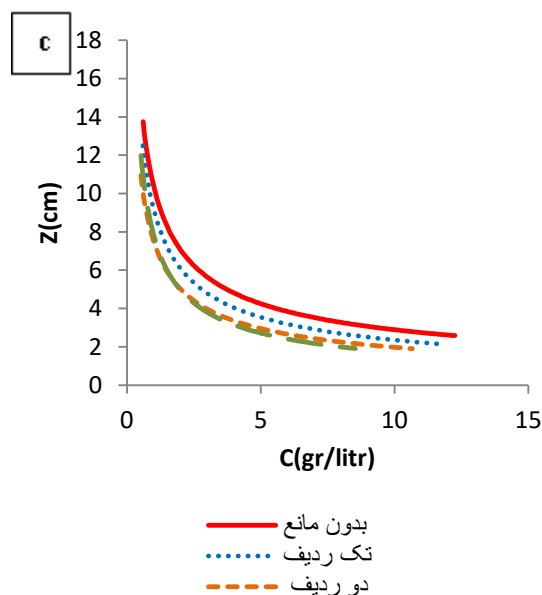
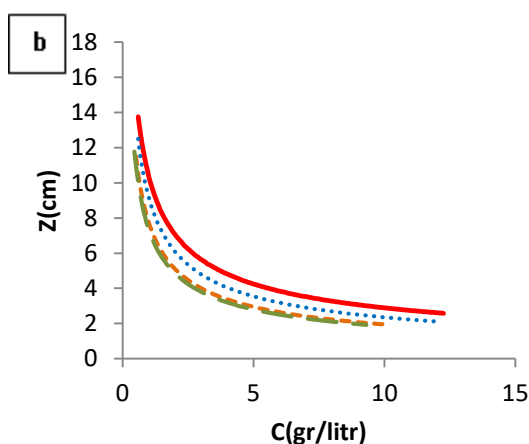
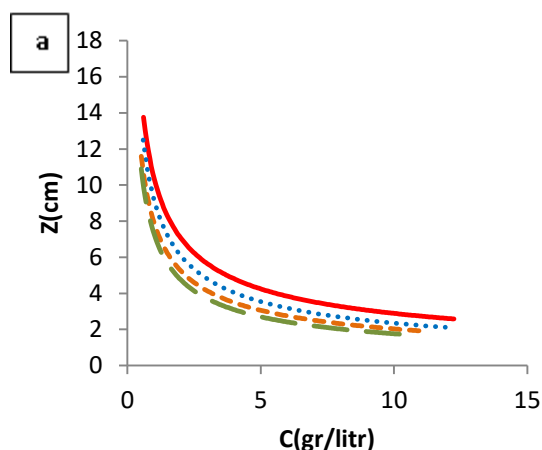
غلظت کمتری به ردیف سوم می‌رسد. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که استفاده از دو ردیف مانع در کاربرد، اقتصادی‌تر خواهد بود. اما در $\frac{h}{H} = 0.5$ همچنان تفاوت در میزان مهار پیشانی با افزایش تعداد ردیف‌ها معنادار است. می‌توان علت آن را تأثیر بیشتر تعداد ردیف صفحه‌ها در ارتفاع کم آن‌ها دانست، زیرا ارتفاع صفحه‌ها در این حالت به‌تنهایی نمی‌تواند در کاهش غلظت و سرعت پیشانی جریان غلیظ مؤثر باشد و با افزایش تعداد صفحه‌ها، بخش بیشتری از جریان پشت صفحه‌ها مانده و سرعت و غلظت آن کاهش می‌یابد. همچنین می‌توان ملاحظه نمود که نصب صفحه‌ها با زاویه ۶۰ درجه نسبت به جداره‌ها نسبت به دو زاویه ۳۰ و ۹۰ درجه میزان کنترل پیشانی جریان غلیظ را افزایش داده اما وقتی صفحه‌ها



شکل ۶. میزان درصد کنترل دبی پیشانی جریان غلیظ در زاویه نصب ۶۰ درجه (a) $D/B=0.5$ (b) $D/B=1$ (c) $D/B=1.5$

درصد کنترل دبی پیشانی شده اما تغییر فاصله، اثر قابل‌ملاحظه‌ای بر کاهش دبی پیشانی نداشته و تفاوت معناداری در درصد کنترل پیشانی جریان غلیظ در دو و سه ردیف مانع در تمام زوایای نصب و ارتفاع‌های نسبی مشاهده

در رابطه با اثر فاصله بین ردیف موانع بر کنترل دبی پیشانی جریان غلیظ، می‌توان از جدول ۱ دریافت که اگرچه افزایش فاصله بین ردیف صفحه‌ها در برخی حالت‌ها مانند زوایای ۶۰ و ۹۰ درجه در همه ارتفاعات نسبی صفحه‌ها سبب افزایش



شکل ۷ پروفیل بدنه جریان غلیظ (a) D/B=0.5 (b) D/B=1 (c) D/B=1.5

نمی‌شود. برای مثال درصد مهار دبی پیشانی جریان غلیظ در ارتفاع نسبی $\frac{h}{H} = 1.5$ در فاصله $\frac{D}{B} = 1.5$ ، نسبت به دو فاصله نسبی دیگر در تمام تعداد ردیف‌ها، کاهش نداشته است. از آنجاکه بخش زیادی از ساختار جریان پس از برخورد به ردیف موانع از بین رفته و مدتی طول می‌کشد تا دوباره ساختار جریان غلیظ متشکل از پیشانی و بدنه شکل بگیرد، بنابراین فواصل انتخابی در این تشکیل دوباره ساختار اثری نخواهد داشت. در نتیجه اثر ارتفاع صفحه‌ها جانبی و تعداد آن‌ها در روند افزایش مهار جریان غلیظ بیشتر از فاصله آن‌ها است. نتایج تحقیق حاضر برای شیب بستر صفر بوده و نتایج برای شیب‌های بیشتر ممکن است متفاوت باشد. بیشترین میزان کنترل دبی پیشانی جریان غلیظ در حالتی که سه ردیف مانع با فاصله ۶۰ سانتی‌متر بین ردیف‌ها، ارتفاع نسبی $\frac{h}{H} = 1.5$ و زاویه نصب ۶۰ درجه به میزان ۹۷ درصد و کمترین درصد کنترل در حالتی که یک ردیف مانع با ارتفاع نسبی $\frac{h}{H} = 0.5$ که صفحه‌ها با زاویه ۳۰ درجه نسبت به جداره نصب شده‌اند، با مقدار ۲۲ درصد رخ داده است.

۳-۲. بررسی پروفیل غلظت بدنه جریان غلیظ

در شکل ۷، اثر تعداد ردیف صفحه‌های جانبی و فاصله بین این صفحه‌ها بر پروفیل^۵ بدنه جریان غلیظ در حالت بیشینه کاهش دبی پیشانی جریان غلیظ ($\frac{h}{H} = 1.5$) و زاویه نصب ۶۰ درجه) برای سه فاصله نصب بین صفحه‌ها نشان داده شده است. با برخورد جریان غلیظ به صفحه‌های جانبی و برهم خوردن ساختار آن شامل پیشانی و بدنه، جریان باقی‌مانده جریان رقیق‌تری خواهد بود، در نتیجه همان‌طور که در شکل ۷ مشاهده می‌شود، با افزایش تعداد ردیف صفحه‌های جانبی، غلظت بدنه جریان غلیظ در تمام فواصل بین صفحه‌های کاهش یافته است. برای مثال در فاصله $\frac{D}{B} = 0.5$ بین صفحه‌های جانبی، میزان کاهش غلظت بدنه در نقطه نمونه‌گیری ۶ سانتی‌متر از کف، برای حالت تک ردیف، دو ردیف و سه ردیف صفحه‌های جانبی به ترتیب معادل ۳۰ درصد، ۳۷ درصد و ۴۰ درصد بوده است.

اما مانند آنچه که در کنترل دبی پیشانی جریان غلیظ مشاهده شد، با افزایش تعداد ردیف صفحه‌های جانبی از دو به سه ردیف، کاهش معناداری رخ نداده است، برای مثال در حالت نصب سه ردیف صفحه جانبی که با فاصله $\frac{D}{B} = 1.5$ به یکدیگر قرار گرفته‌اند، در عمق نمونه‌گیری ۶ سانتی‌متر از کف کانال کاهش ۴۰ درصدی و در فاصله $\frac{D}{B} = 1$ بین صفحه‌ها در نقطه نمونه‌گیری مشابه ۳۶ درصد کاهش در غلظت بدنه مشاهده شد. علت در برخورد جریان غلیظ به ردیف دوم صفحه‌هاست که غلظت جریان را به میزان زیادی کاهش داده و جریان باقی‌مانده رقیقی که به ردیف سوم موانع برخورد می‌کند، کاهش قابل‌ملاحظه‌ای در غلظت بدنه نخواهد داشت. غلظت بدنه جریان غلیظ با افزایش فاصله بین صفحه‌ها، اگرچه کاهش یافته است اما این کاهش معنادار نیست. پس از برخورد جریان به موانع، بخشی از آن که از رو و میان صفحه‌ها گذر می‌کند، پس از مدتی بسته به شرایط جریان، دوباره ساختار اصلی جریان غلیظ شامل پیشانی و بدنه را می‌تواند شکل دهد، اما با افزایش تعداد ردیف صفحه‌ها، کاهش سرعت و غلظت بیشتر شده تا جایی که جریان رقیق باقی‌مانده توانایی تشکیل ساختار یک جریان غلیظ را از دست داده و در نتیجه افزایش فاصله بین صفحه‌ها، تأثیر قابل‌ملاحظه‌ای بر کاهش غلظت بدنه نداشته و این مشخصه بیشتر تابعی از تعداد صفحه‌هاست.

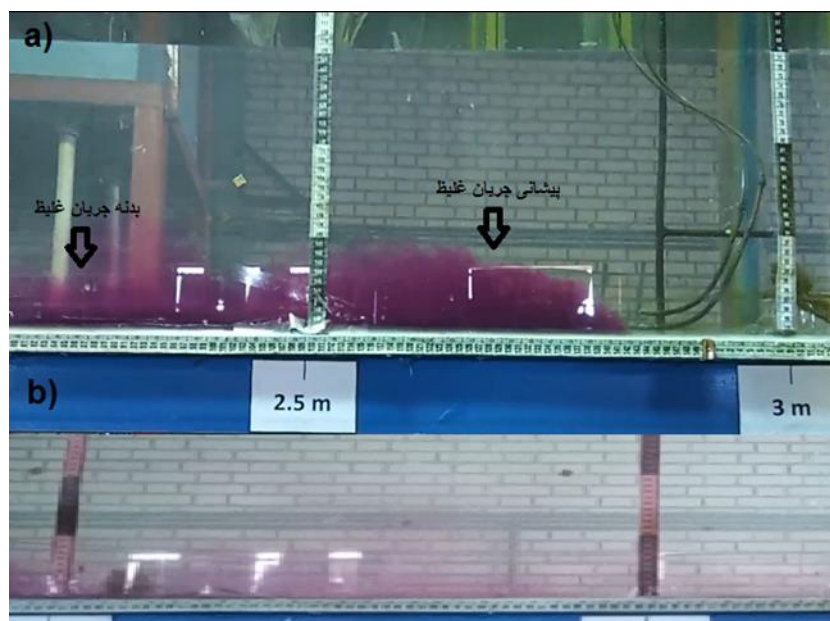
۴. نتیجه‌گیری

ایجاد موانع در مقابل جریان غلیظ می‌تواند در کاهش سرعت و غلظت آن مؤثر باشد و در نتیجه آن، جریان غلیظ در رسیدن به بدنه سد کنترل شود. مطالعات پیشین نشان داده که این موانع می‌توانند طیف وسیعی از شکل‌ها، تعداد، زوایا و خصوصیات هندسی و هیدرولیکی دیگری را دربر بگیرند، بنابراین بررسی و مطالعه این خصوصیات تا یافتن نتیجه‌ای که از نظر اجرایی، اقتصادی و ملاحظات زیست‌محیطی و

اجتماعی مطلوب باشد، ضرورت دارد. در این مطالعه موانع به صورت صفحه‌های جانبی در نظر گرفته شد. بر اساس یافته‌های این تحقیق، با افزایش تعداد ردیف و ارتفاع صفحه‌ها، میزان کنترل دبی پیشانی جریان غلیظ افزایش یافت، به طوری که ۳ ردیف مانع با ارتفاع نسبی $\frac{1}{5}$ برابر ارتفاع بدنه جریان غلیظ هنگامی که صفحه‌ها با زاویه ۶۰ درجه نسبت به جداره نصب شده بودند، در حدود ۹۷ درصد پیشانی جریان را کنترل کرد. جریان غلیظ هنگامی که به ردیف موانع می‌رسید و با آن برخورد می‌کرد، بخشی از آن از میان و روی موانع گذر می‌کرد و بخشی از آن به سمت بالادست حرکت می‌کرد و پس از مدتی دوباره ساختار آن شامل پیشانی و بدنه با غلظت و سرعت کمتر شکل می‌گرفت. در حالت تعدد ردیف موانع، جریان فرصت کافی برای تشکیل مجدد ساختار را پیدا نمی‌کرد، با طی مسافت کوتاهی به ردیف بعدی برخورد می‌کرد و آنچه پس از گذشتن از تمام موانع باقی می‌ماند، یک جریان رقیق، کم‌سرعت با ساختار کاملاً دگرگون بود که ماهیت جریان غلیظ را نداشت (شکل ۸). در ارتفاع نسبی نصف ارتفاع بدنه، کارایی صفحه‌ها حتی با وجود تعدد ردیف صفحه‌ها حداکثر در حدود ۷۰ درصد بود که در مقایسه با دو ارتفاع دیگر، کارایی کمتری داشت.

افزایش فاصله بین ردیف‌ها تأثیر محسوسی در کاهش میزان دبی پیشانی بعد از موانع نداشت که می‌توان علت آن را از بین رفتن ساختار جریان در اثر برخوردهای متعدد به ردیف موانع دانست.

نصب موانع به صورت صفحه‌های جانبی، علاوه بر تأثیر بر غلظت و سرعت پیشانی جریان غلیظ، بر غلظت بدنه آن نیز تأثیر می‌گذارد، به صورتی که غلظت بدنه نیز پس از برخورد جریان غلیظ به موانع مانند غلظت پیشانی آن کاهش می‌یابد، این کاهش بیشتر تحت تأثیر تعداد ردیف صفحه‌هاست.



شکل ۸ (a) ساختار جریان غلیظ قبل از برخورد به مانع شامل پیشانی و بندنه (b) ساختار از بین رفته پس از برخورد به مانع

[9] Oehy CD, Schleiss AJ. Control of turbidity currents in reservoirs by solid and permeable obstacles. *Journal of Hydraulic Engineering*. 2007 Jun;133(6):637-48.

[10] Varjavand P, Ghomeshi M, Dalir AH, Farsadizadeh D, Gorgij AD. Experimental observation of saline underflows and turbidity currents, flowing over rough beds. *Canadian Journal of Civil Engineering*. 2015;42(11):834-44.

[۱۱] جهانگیر علیرضا، اسماعیلی کاظم، فغفور مغربی محمود. بررسی آزمایشگاهی اثر تخلخل و زاویه موانع نفوذپذیر بر رسوب گذاری جریان غلیظ. نشریه مهندسی عمران امیرکبیر. ۱۳۹۹؛ ۵۲(۶): ۱۴۵۵-۱۴۶۸.

[12] Nasrollahpour R, Jamal MH, Ismail Z, Ibrahim Z, Jumain M, Mohd Haniffah MR, Ishak DS. Velocity structure of density currents propagating over rough beds. *Water*. 2021 May 23;13(11):1460.

[۱۳] اصغری پری سید امین، کاشفی پور سید محمود. قمشی مهدی. بررسی اثر غلظت جریان در کنترل جریان غلیظ با مانع در مخازن سدها. مجموعه مقالات هشتمین سمینار بین المللی مهندسی رودخانه؛ ۶-۸ بهمن ۱۳۸۸؛ دانشگاه شهید چمران. اهواز. ایران.

[۱۴] اصغری پری سید امین، محققیان سید مالک. بررسی عددی تأثیر ایجاد گودال‌های حفاظتی در بستر بر مهار

سپاسگزاری

بدین وسیله از حمایت مالی معاونت پژوهش و فناوری دانشگاه شهید چمران اهواز در قالب پژوهانه GN:(SCU.WH1401.31370) در انجام این تحقیق قدردانی می‌شود.

مراجع

- [1] Forel FA. *Les ravins sous-lacustres des fleuves glaciaires*. Paris, France: Gauthier-Villars; 1885.
- [2] Grover NC, Howard CS. The passage of turbid water through Lake Mead. *Transactions of the American Society of Civil Engineers*. 1938 Jan;103(1):720-81.
- [3] Ford DE, Johnson MC. An assessment of reservoir density currents and inflow processes.
- [4] Akiyama J, Stefan H. Turbidity current with erosion and deposition. *Journal of Hydraulic Engineering*. 1985 Dec;111(12):1473-96.
- [5] Altinakar MS, Graf WH, Hopfinger EJ. Flow structure in turbidity currents. *Journal of Hydraulic Research*. 1996 Sep 1;34(5):713-8.
- [6] Lee HY, Yu WS. Experimental study of reservoir turbidity current. *Journal of Hydraulic Engineering*. 1997 Jun;123(6):520-8.
- [7] Jiahua F. Turbid density currents in reservoirs. *Water International*. 1986 Jan 1;11(3):107-16.
- [8] Alves E, Ferreira RL, Cardoso AH. One-dimensional numerical modelling of turbidity currents: hydrodynamics and deposition.

کردن جریان غلیظ. مجله مهندسی منابع آب. ۱۳۹۳؛
۷(۲۳): ۱-۱۲.

[۱۵] دریایی مهدی، کاشفی پور سید محمود، قمشی مهدی.
بررسی آزمایشگاهی اثر شیب و زبری کف بر روی
سرعت پیشانی و بدنه جریان غلیظ رسوبی. مجله علوم و
مهندسی آبیاری. ۱۳۹۳؛ ۳۷(۳): ۲۱-۳۱.

[۱۶] خسروپور سلیمان، کاشفی پور سید محمود، دریایی
مهدی. بررسی تراکم و آرایش بلوک‌های زبری به
همراه مانع روی کنترل پیشانی جریان غلیظ. نشریه
هیدرولیک. ۱۳۹۸؛ ۱۴(۲): ۱۰۵-۱۱۵.

[۱۷] توزنده جانی محمد، حقی آبی امیر حمزه، کاشفی پور
سید محمود، ترابی پوده حسن. بررسی آزمایشگاهی
تأثیر موانع متوالی بر روی سرعت پیشانی و بدنه جریان
غلیظ رسوبی و نمکی. نشریه علمی و پژوهشی مهندسی
آبیاری و آب ایران. ۱۳۹۸؛ ۱۰(۱): ۳۴-۵۰.

[18] Soler M, Colomer J, Serra T, Casamitjana X,
Folkard AM. Sediment deposition from turbidity
currents in simulated aquatic vegetation
canopies. *Sedimentology*. 2017 Jun;64(4):1132-
46.

[19] Abhari MN, Iranshahi M, Ghodsian M,
Firoozabadi B. Experimental study of obstacle
effect on sediment transport of turbidity currents.
Journal of Hydraulic Research. 2018 Sep
3;56(5):618-29.

[۲۰] حبیب محمدی میرعلی، اصغری پری سید امین. سجادی
سید محسن. بررسی آزمایشگاهی اثر ارتفاع، شکل و
محل قرارگیری موانع گابیونی در کنترل جریان غلیظ
رسوبی. نشریه پژوهش‌های حفاظت آب و خاک. ۱۳۹۵؛
۲۳(۴): ۲۵۱-۲۶۵.

پی‌نوشت‌ها

1. Density current
2. Turbidity Current
3. Obstacle
4. Concentration
5. Profile