



دانشگاه گوارن و منابع طبیعی گوارن

نشریه پژوهش‌های حفاظت آب و خاک

جلد بیست و سوم، شماره ششم، ۱۳۹۵

<http://jwsc.gau.ac.ir>

بررسی آزمایشگاهی تأثیر شکل، آرایش و مساحت صفحه‌های نفوذناپذیر مستغرق بر مشخصه‌های جریان غلیظ

*زهرا قربانی^۱، حسین خزیمه‌نژاد^۲ و یوسف رضانی^۲

^۱دانشجوی کارشناسی ارشد سازه‌های آبی دانشگاه بیرجند، استادیار گروه علوم و مهندسی آب، دانشگاه بیرجند

تاریخ دریافت: ۹۴/۱۱/۱۶؛ تاریخ پذیرش: ۹۵/۶/۲

چکیده

سابقه و هدف: امروزه احداث سدها یکی از مهم‌ترین راهکارها برای ذخیره آب‌های سطحی می‌باشد. در مخازن سدها، جریان غلیظ معمولاً عامل انتقال و ته‌نشینی رسوبات است. اگر جریان غلیظ به‌طور کامل در مناطق میانی مخزن سد متوقف شود، مقدار رسوب‌گذاری در پای دیواره سد کاهش یافته و در نتیجه وظایف اصلی سد مختل نخواهد شد بنابراین مطالعه در خصوص شناخت دقیق این پدیده از اهمیت خاصی برخوردار است. یکی از روش‌های تغییر هیدرولیک جریان غلیظ و کندکردن آن، زبرکردن یا استفاده از مانع در بستر است. تاکنون پژوهش‌های زیادی در زمینه سرعت پیشروی جریان غلیظ و کنترل آن به‌وسیله موانع و زبری انجام گرفته شده است اما بررسی منابع موجود نشان می‌دهد که در زمینه تأثیر صفحه‌های نفوذناپذیر مستغرق بر جریان غلیظ پژوهشی صورت نگرفته است.

مواد و روش‌ها: در این پژوهش، سرعت رأس و ارتفاع پیشانی جریان غلیظ بر روی بستر با نصب صفحه‌های نفوذناپذیر مستغرق مورد بررسی قرار گرفت. بدین‌منظور از فلومی به عرض ۳۰ سانتی‌متر، به طول ۱۰ متر و ارتفاع ۶۶ سانتی‌متر استفاده گردید. جریان غلیظ با غلظت ۲۰ گرم بر لیتر در دو شیب ۱ و ۲ درصد و ۴۰ گرم بر لیتر در دو شیب ۱ و ۲ درصد وارد فلوم آزمایشگاهی شد و صفحه‌های نفوذناپذیر با دو مساحت ۱۶ و ۳۶ سانتی‌متر مربع تحت پنج شکل مربع، مستطیل، مثلث، متوازی‌الاضلاع و دوزنقه با آرایش موازی و همچنین شکل مربع با مساحت ۱۶ سانتی‌متر مربع تحت پنج آرایش موازی، شطرنجی، همگرا، واگرا و Z شکل در مسیر جریان قرار گرفت.

یافته‌ها: اندازه‌گیری سرعت در ۶ مقطع به فاصله ۵۰ سانتی‌متر از هم و اندازه‌گیری ارتفاع پیشانی در ۲۱ مقطع به فاصله ۱۵ سانتی‌متر از هم انجام گرفت. سپس براساس داده‌های به‌دست آمده و با انجام آنالیز ابعادی به روش پای باکینگهام، نمودارهای بی‌بعد مربوط به سرعت، ارتفاع و عدد فرود پیشانی جریان غلیظ رسم شد. در اثر برخورد جریان غلیظ با صفحه‌ها، سرعت بی‌بعد در طول مسیر نصب، به‌میزان قابل‌توجهی کاهش یافت. همچنین بررسی ارتفاع پیشانی جریان غلیظ در طول مسیر نیز نشان داد، در ابتدای مسیر، صفحه‌ها باعث کاهش ارتفاع پیشانی جریان شدند اما به‌تدریج و در انتهای مسیر باعث افزایش پیشانی جریان شدند و بنابراین عدد فرود در طول مسیر جریان روند کاهشی داشت.

* مسئول مکاتبه: zahraghorbani303@yahoo.com

نتیجه‌گیری: نتایج نشان داد که سرعت پیشروی جریان غلیظ نسبت به بستر صاف در وضعیت نصب صفحه‌هایی با شکل‌های مختلف به میزان ۲۵ تا ۴۸ درصد و ارتفاع پیشانی نیز به میزان ۵/۱ تا ۱۸/۴ درصد کاهش یافت. همچنین در آرایش‌های مختلف نیز سرعت پیشروی به میزان ۱۱/۲ تا ۴۵/۱ درصد و ارتفاع پیشانی نیز به میزان ۰/۴ تا ۱۸/۴ درصد کاهش یافت. در غلظت ۲۰ گرم بر لیتر آرایش همگرا و در غلظت ۴۰ گرم بر لیتر آرایش موازی بهترین آرایش مشخص شدند. با تغییر مساحت صفحه‌ها از ۱۶ به ۳۶ سانتی‌متر مربع بین شکل‌های مختلف، شکل متوازی‌الاضلاع با ۲۲/۲ درصد بیش‌ترین تأثیر را در کاهش سرعت نشان داد.

واژه‌های کلیدی: جریان غلیظ، صفحه‌های نفوذناپذیر مستغرق، شکل و آرایش صفحه‌ها، سرعت و ارتفاع پیشانی

$$g' = g \left(\frac{\rho_d - \rho_a}{\rho_a} \right) = g \left(\frac{\Delta \rho}{\rho_a} \right) \quad (1)$$

که در آن، g' شتاب ثقل کاهش یافته، g شتاب ثقل زمین (9.81 m/s^2)، ρ_d و ρ_a به ترتیب جرم مخصوص سیال پیرامون و سیال غلیظ می‌باشد (۵). همانند جریان در مجاری روباز، در جریان‌های غلیظ نیز اثر نیروی ثقل به نیروی اینرسی بسیار با اهمیت است به طوری که عدد فرود در جریان غلیظ به صورت زیر بیان می‌شود:

$$Fr_d = \frac{U}{\sqrt{g'h \cos \theta}} \quad (2)$$

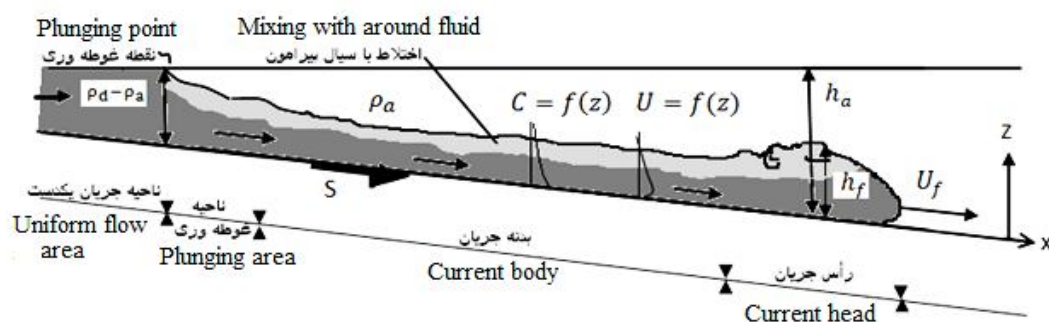
به این پارامتر بدون بعد عدد فرود دنسیمیتریک می‌گویند. U سرعت متوسط، h عمق جریان و پارامتر θ زاویه بستر با افق می‌باشد. فرم متداول دربرگیرنده نیروی ثقل و اینرسی به صورت رابطه زیر است که تحت عنوان عدد ریچاردسون بیان می‌شود (۱۷):

$$Ri = \frac{1}{Fr_d^2} = \frac{g'h \cos \theta}{U^2} \quad (3)$$

یکی از قسمت‌های بسیار مهم و قابل بررسی در دینامیک جریان غلیظ، بخش پیش‌رونده جریان غلیظ (پیشانی جریان) است (شکل ۱). بر خلاف جریان نسبتاً یکنواخت و دائمی بدنه جریان غلیظ، پیشانی جریان دارای جریان غیردائمی بوده و باعث جابجایی سیال محیطی می‌شود. نیروی جلوبرنده و محرک در پیشانی جریان گرادیان فشار حاصل از اختلاف چگالی میان پیشانی جریان و سیال محیطی است (۱).

مقدمه

امروزه احداث سدها یکی از مهم‌ترین راهکارها برای ذخیره آب‌های سطحی می‌باشد. احداث سدهای مخزنی جهت کنترل منابع آب سطحی در کشور ما ایران نیز، که از محدودیت منابع آب شیرین رنج می‌برد، امری اجتناب‌ناپذیر و بلکه ضروری محسوب می‌شود. یکی از چالش‌های مهمی که عملکرد و وظایف مخازن پشت سدها را تهدید می‌کند مسأله ته‌نشین شدن رسوبات می‌باشد. همه‌ساله بخش اعظمی از حجم مؤثر مفید مخازن سدها به واسطه رسوب‌گذاری کاهش می‌یابد. با توجه به این موضوع که عامل اصلی حرکت رسوبات در مخازن سد پدیده‌ای به نام جریان غلیظ می‌باشد، بنابراین مطالعه در خصوص شناخت دقیق این پدیده از اهمیت خاصی برخوردار است. یکی از بهترین روش‌هایی که در کنترل پیشروی جریان غلیظ می‌تواند مؤثر واقع شود، جلوگیری از تغذیه این جریان می‌باشد. اصولاً جریان غلیظ را می‌توان ورود یک سیال با جرم مخصوص معلوم به یک توده سیال با جرم مخصوص متفاوت، به دلیل تأثیر شتاب ثقل بر روی اختلاف جرم مخصوص توصیف کرد. اختلاف در جرم مخصوص می‌تواند ناشی از وجود مواد معلق، مواد محلول، اختلاف دما یا ترکیبی از آن‌ها باشد (۵). شتاب ثقل مؤثر بر جریان که به عنوان نیروی محرک در جریان غلیظ مطرح می‌باشد به صورت رابطه ۱ بیان می‌گردد:



شکل ۱- نمای کلی از جریان غلیظ و قسمت‌های مختلف آن (۱، ۵).

Figure 1. Schematic side view of turbidity current and different parts (1 and 5).

زیر با کاهش سرعت پیشروی در جریان غلیظ باعث افزایش اثر ویسکوزیته در مقایسه با اینرسی در مسیر پیشروی جریان شده و ایجاد دو رژیم مختلف جریان طی مسیر می‌کند که در حالت اول نیروی شناوری و اینرسی غالب بوده و در رژیم دوم نیروی شناوری و ویسکوزیته سیال غالب می‌باشد. او با نرمال‌سازی ارتفاع پیشانی با ارتفاع جریان غلیظ بر روی سطوح زیر نشان داد که پارامتر نرمال‌شده ارتفاع پیشانی جریان حدود ۳۰ درصد بیشتر از مقدار آن بر روی سطوح صاف است (۱۲). اوهی (۲۰۰۲) به تأثیر روش‌های مختلف از جمله احداث مانع، احداث مانع مشبک، جت آب ۴۵ و ۹۰ درجه و دیواره حباب بر کنترل جریان غلیظ در مخازن سدها پرداخت. او برای یک ارتفاع مانع و برای دو شیب صفر و ۴/۶۴ درصد به بررسی وضعیت جریان عبوری از مانع پرداخت و به‌طور کلی نتیجه‌گیری نمود که احداث مانع در جریان زیر بحرانی برای کنترل جریان مناسب است (۱۱). اوهی و شلیس (۲۰۰۷) به بررسی آزمایشگاهی تأثیر موانع نفوذپذیر و غیرقابل نفوذ بر روی جریان غلیظ پرداخته و نتایج را با شبیه‌سازی عددی مقایسه کردند. توزیع سرعت و نحوه رسوب‌گذاری در مدل فیزیکی بررسی شد. بهترین حالت برای موانع نفوذپذیر با تخلخل بین ۳۶ تا ۴۱ درصد و اندازه شبکه با قطر

اولین ثبت رخداد این گونه از جریان‌ها در سال ۱۹۲۹ در ساحل گراند در نیوفنلاند بر می‌گردد که در اثر وقوع زلزله‌ای در ساحل، تعداد زیادی از سیم‌های تلگراف که در زیر دریا قرار داشتند، پاره شدند. ابتدا تصور می‌شد که خود زلزله باعث چنین گسیختگی در کابل‌ها شده است اما ۲۳ سال بعد اوینلگ و هیلزن (۱۹۵۲) پژوهش‌هایی را روی این مسأله انجام دادند. نتایج کارهای آن‌ها نشان داد که زلزله باعث نشست و گسیختگی توده عظیمی از گل در ساحل شده و در اثر ایجاد اختلاف چگالی زیاد، جریان غلیظ ایجاد گردیده است (۱۵). پریوز (۱۹۹۹) مطالعاتی در خصوص تأثیر شکل مانع بر روی کنترل جریان غلیظ انجام داد. او در آزمایش‌های خود از دو مانع به شکل نیم‌دایره و مثلی با ارتفاع یکسان استفاده نمود و به این نتیجه رسید که شکل مانع تأثیر معنی‌داری در کنترل جریان غلیظ نخواهد داشت. همچنین برای محدوده عدد فرود دنسیمتریک $0.7 \leq Fr_d \leq 0.8$ در صورتی که ارتفاع مانع ۲ برابر ارتفاع بدنه جریان غلیظ باشد، جریان به‌صورت کامل مهار خواهد شد (۱۴). پترز (۱۹۹۹) با ایجاد زیری‌های دوبعدی (به اندازه ۶، ۱۳، ۱۹، ۲۵ میلی‌متر) در طول یک فلوم آزمایشگاهی با شیب افقی، سرعت پیشروی جریان غلیظ نمکی را بر روی سطوح زیر مورد بررسی قرار داد. نتایج نشان داد که سطوح

نصرالله‌پور و قمشی (۲۰۱۲) به بررسی اثر شکل زبری بر مشخصه‌های پیشانی جریان غلیظ پرداختند. آن‌ها دو نوع شکل زبری مخروطی و استوانه‌ای را برای ارتفاع‌های ۱ و ۲/۵ و ۴ سانتی‌متر مورد بررسی قرار دادند و نتیجه گرفتند که با افزایش ارتفاع زبری برای یک شکل ثابت و همچنین با افزایش سطح زبری با ارتفاع ثابت، غلظت و سرعت پیشانی جریان غلیظ کاهش و ارتفاع آن افزایش می‌یابد (۸). قربان‌مقدم و همکاران (۲۰۱۳) به بررسی آزمایشگاهی تأثیر موانع استوانه‌ای شکل بر حرکت رأس جریان غلیظ پرداختند. آن‌ها آزمایش‌هایی را با شیب‌های ۰/۵، ۱/۲۵ و ۲ درصد و غلظت‌های ۱۰ و ۲۰ گرم در لیتر ایجاد کرده و موانع استوانه‌ای به قطر ۱ و ارتفاع ۳۰ سانتی‌متر را در فواصل مختلف از ابتدای نهر پایدار مورد بررسی قرار داده و نتیجه گرفتند که غلظت، سرعت و ارتفاع جریان غلیظ با قراردادن موانع استوانه‌ای در بستر نسبت به حالت بدون مانع کاهش می‌یابد (۴). پورکاید و همکاران (۲۰۱۴) در پژوهشی تأثیر هم‌زمان زبری، شیب بستر و غلظت بر روی سرعت متوسط بدنه جریان غلیظ را مورد بررسی قرار دادند. ۳۲ آزمایش انجام شد و نتایج نشان داد که با افزایش ارتفاع زبری، سرعت متوسط بدنه جریان غلیظ کاهش، با افزایش شیب، افزایش و با افزایش غلظت نیز سرعت متوسط بدنه افزایش می‌یابد. در انتها با استفاده از نرم‌افزارهای Datafit و SPSS رابطه‌ای به‌منظور پیش‌بینی سرعت بدنه جریان غلیظ با در نظر گرفتن زبری و شیب ارائه گردید (۱۳). ورجاوند و همکاران (۲۰۱۴) در پژوهشی به بررسی آزمایشگاهی جریان‌های غلیظ نمکی بر روی بسترهایی با زبری مصنوعی پرداختند. دو شکل زبری استوانه‌ای و مخروطی با سه ارتفاع زبری مورد استفاده قرار گرفت. پروفیل سرعت با استفاده از دستگاه

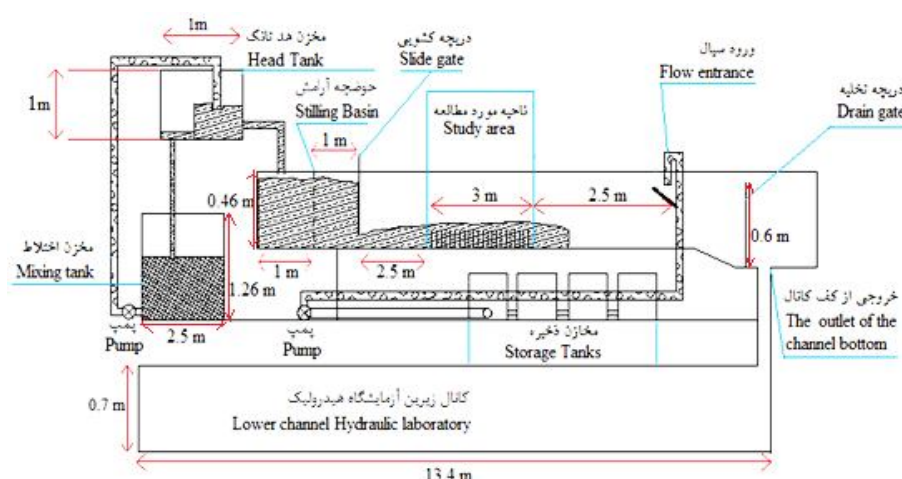
هیدرولیکی ۰/۵ تا ۱/۲ میلی‌متر برآورد شد (۱۰). ایسلام و ایمران (۲۰۱۰) به بررسی پروفیل توزیع سرعت و غلظت و همچنین تلاطم در بدنه و پیشانی جریان غلیظ نمکی و رسوبی پیوسته به‌صورت آزمایشگاهی پرداختند. جریان از روی یک شیب به بستر افقی می‌رسید. پروفیل سرعت لحظه‌ای به‌وسیله دو دستگاه سرعت‌سنج صوتی اندازه‌گیری شده و با استفاده از نتایج به‌دست آمده پروفیل متوسط زمانی سرعت، انرژی جنبشی تلاطم و مؤلفه‌های تنش رینولدز استخراج شدند. پروفیل‌های تنش رینولدز و انرژی جنبشی تلاطم شباهت زیادی را در منطقه نزدیک دیواره نشان دادند. پروفیل عمودی انرژی جنبشی تلاطم دارای دو مقدار ماکزیمم در نزدیکی محل وقوع سرعت ماکزیمم بودند. نسبت مقدار ماکزیمم انرژی جنبشی تلاطم به متوسط آن تقریباً ۱/۵ بوده و مقدار انرژی جنبشی تلاطم در منطقه بین دو مقدار ماکزیمم، تقریباً ۵۰ درصد متوسط عمقی آن می‌باشد (۶). اصغری‌پری (۲۰۱۰) با انجام آزمایش‌های جریان غلیظ نمکی به بررسی ارتفاعی از مانع که باعث کنترل جریان غلیظ در شرایط مختلف ورودی که شامل دبی، غلظت و شیب می‌شود، پرداخت. نتایج این پژوهشگر نشان داد که با افزایش شیب، اثر ارتفاع مانع در توقف جریان غلیظ کاهش می‌یابد (۲). نورمحمدی و همکاران (۲۰۱۱) ساختار جریان غلیظ رها شده بر روی بستر شیب‌دار را به‌صورت آزمایشگاهی مورد بررسی قرار دادند. با توجه به نتایج آزمایشگاهی این‌طور مشخص شد که اگر جریان غلیظ در یک کانال حرکت کند ممکن است به‌دلیل پرش هیدرولیکی ضخامت آن افزایش یابد. این پدیده در حالت‌های خاص جریان ورودی اتفاق می‌افتد و بر روی ساختار جریان شامل سرعت، ارتفاع جریان و تنش برشی بستر تأثیر محسوس می‌گذارد (۹).

به بستر صاف به میزان ۱۳ تا ۲۸/۵ درصد و غلظت جریان بین ۵۳/۵۴ تا ۸۱/۲۸ درصد کاهش می‌یابد. همچنین تراکم ۱/۴ درصد مؤثرترین تراکم برای کاهش سرعت و غلظت پیشانی جریان غلیظ می‌باشد (۷). تاکنون پژوهش‌های زیادی در زمینه سرعت پیشروی جریان غلیظ و کنترل آن به وسیله موانع و زبری انجام گرفته شده است اما بررسی منابع موجود نشان می‌دهد که در زمینه تأثیر صفحه‌های نفوذناپذیر مستغرق بر جریان غلیظ پژوهشی صورت نگرفته است. در پژوهش حاضر به بررسی اثر آرایش، شکل و مساحت صفحه‌های نفوذناپذیر مستغرق بر شرایط جریان غلیظ پرداخته شد. به منظور بررسی اثر شیب و غلظت نیز آرایش صفحه‌ها در غلظت‌های ۲۰ و ۴۰ گرم بر لیتر و در شیب‌های بستر ۱ و ۲ درصد مورد بررسی قرار گرفت.

مواد و روش‌ها

آزمایش‌های این پژوهش در آزمایشگاه هیدرولیک دانشکده کشاورزی دانشگاه بیرجند انجام شد. جهت انجام آزمایش‌ها از یک فلوم به طول ۱۰ متر، عرض ۰/۳ متر و ارتفاع ۰/۴۶ متر استفاده شد. به فاصله ۲ متر از ابتدای فلوم، یک دریچه کشویی نصب شده و میزان بازشدگی این دریچه به منظور دسترسی هر چه بیش‌تر به شرایط جریان یکنواخت ۵ سانتی‌متر و فاصله شروع نصب صفحه‌ها از دریچه ۲/۵ متر می‌باشد. همچنین برای ایجاد شیب‌های مد نظر، فلوم دارای قابلیت تغییر شیب تا ۵ درصد بود. برای ایجاد جریان غلیظ از یک مخزن اختلاط به حجم مفید ۳/۱۲۵ مترمکعب استفاده شد. شکل ۲ نمای کلی از فلوم، مخزن اختلاط و هد تانک را نشان می‌دهد.

سرعت سنج صوتی برداشت گردید. پروفیل‌های قائم سرعت و غلظت به ترتیب در سه و چهار مقطع در بدنه جریان برداشت گردید. نتایج نشان داد که افزایش ارتفاع زبری نسبی، تأثیر چندانی بر روی نوسان‌های لحظه‌ای سرعت در ناحیه اختلاط بدنه جریان غلیظ ندارد و همچنین تحلیل نوسان‌های لحظه‌ای سرعت بر روی بسترهای زبر در ناحیه اختلاط نشان داد که شدت تلاطم در جهت جریان در مرز بین بدنه جریان غلیظ و سیال پیرامون برای زبری‌های استوانه‌ای و مخروطی به ترتیب حدود ۴۸ و ۳۲ درصد سرعت برشی می‌باشد (۱۸). اصغری‌پری و محققیان (۲۰۱۵) به بررسی عددی اثر استفاده از مانع صفحه‌ای و موانع ستونی زیگزاگ با زوایای بدنه ۴۵، ۶۰ و ۹۰ درجه بر کنترل جریان غلیظ پرداختند. تحلیل نتایج آن‌ها با استفاده از نرم‌افزار ANSYS-CFX نشان داد که در جریان‌های غلیظ زیربحرانی موانع ستونی با ارتفاع نسبی ۰/۵۲ برابر عمق جریان و با آرایش زیگزاگ می‌تواند موجب کاهش ۶۰ درصدی در دبی عبوری جریان غلیظ شود و با افزایش ۵ برابری تراکم موانع، دبی عبوری جریان غلیظ ۶ درصد کاهش می‌یابد. همچنین با استفاده از مانع صفحه‌ای با ارتفاع نسبی ۱/۲۶ برابر ارتفاع جریان و با زوایای ۴۵، ۶۰ و ۹۰ درجه نسبت به کف می‌توان ۸۰ درصد از جریان غلیظ را کنترل نمود (۳). خلیلی و همکاران (۲۰۱۵) با انجام آزمایش‌هایی به بررسی تأثیر تراکم پوشش گیاهی بر کاهش سرعت پیشانی جریان غلیظ پرداختند. آزمایش‌های آن‌ها در غلظت‌های ۱۰، ۲۰، ۳۰ و ۴۰ گرم بر لیتر در دو ارتفاع ۱۵ و ۲۰ سانتی‌متر و تراکم‌های ۰/۶، ۰/۸، ۱، ۱/۲، ۱/۴ انجام گرفت و نتایج آنان نشان داد که با افزایش تراکم پوشش گیاهی در ارتفاع‌های مختلف، سرعت پیشروی جریان نسبت

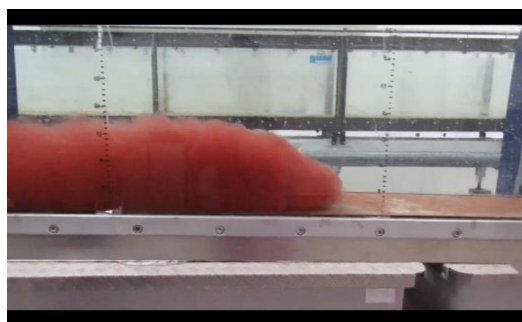


شکل ۲- نمای شماتیک فلوم آزمایشگاهی.

Figure 2. Schematic side view of a laboratory flume.

امکان سرریز کردن سیال اضافی وجود داشته و سیال غلیظ به صورت ثقلی وارد فلوم شود. برای اطمینان از این که سیال غلیظ تنها به دلیل اختلاف غلظت وارد سیال محیطی شود، دریاچه زمانی باز شد که سطح سیال محیطی و سیال پیرامون برابر باشند. شکل ۳ نمونه‌ای از جریان غلیظ تشکیل شده را نشان می‌دهد.

برای انجام آزمایش‌ها به منظور ایجاد جریان غلیظ نمکی از نمک پودری استفاده شد. سیال غلیظ با غلظت مناسب درون مخزن اختلاط حل شده و با حل کردن ماده رنگی، از سیال پیرامون قابل تفکیک بود. محلول آماده شده با استفاده از پمپ به مخزن هد ثابت انتقال داده شد. مخزن بار ثابت به دو بخش تقسیم شد تا



شکل ۳- نمونه‌ای از جریان غلیظ ایجاد شده.

Figure 3. An example of created turbidity current.

از قابل صرف نظر بودن تأثیر دما در آزمایش‌ها، دمای سیال غلیظ و سیال پیرامون کنترل می‌شد به طوری که حداکثر اختلاف دمای آن‌ها ۰/۵ درجه سلسیوس بود. آرایش صفحه‌ها به ۵ صورت موازی، شطرنجی، و اگر Z و شکل بود. شکل ۴ نمونه‌ای از آرایش همگرا و Z شکل را نشان می‌دهد.

برای برداشت ارتفاع پیشانی و همچنین محاسبه سرعت در طول فلوم از کرنومتر و دوربین فیلم برداری (Canon PowerShot SX520HS) استفاده شد و در نهایت متوسط سرعت پیشروی پیشانی جریان غلیظ در فواصل ۵۰ سانتی متری از ابتدای پوشش در ۶ مقطع و ارتفاع پیشانی در فواصل ۱۵ سانتی متری و در ۲۱ مقطع اندازه‌گیری شد. به منظور حصول اطمینان



شکل ۴- آرایش صفحه‌ها به صورت همگرا و Z شکل.

Figure 4. Array of plates for converge and Z shapes.

۱۶ و ۳۶ سانتی متر مربع تحت غلظت ۲۰ گرم بر لیتر و شیب ۱ درصد انجام شد. در جدول ۱ خلاصه‌ای از شرایط آزمایش‌های انجام شده و محدوده داده‌های آزمایشگاهی آورده شده است.

صفحه‌ها به صورت پنج شکل مربع، مستطیل، مثلث، دوزنقه و متوازی‌الاضلاع بودند. آزمایش‌های مربوط به آرایش صفحه‌ها، تحت دو غلظت ۲۰ و ۴۰ گرم بر لیتر و دو شیب ۱ و ۲ درصد انجام شد و آزمایش‌های مربوط به شکل صفحه‌ها با دو مساحت

جدول ۱- فهرستی از آزمایش‌های انجام شده.

Table 1. The list of tests performed.

تعداد آزمایش‌ها Number of experiments	عدد فرود حجمی Volumetric Froude number	عدد رینولدز $\times 10^4$ Reynolds number $\times 10^4$	غلظت‌ها (گرم بر لیتر) Concentrations ($g.l^{-1}$)	شیب‌های بستر (%) Bed slopes (%)	شکل‌ها Shapes	مساحت (سانتی متر مربع) Area(cm^2)	آرایش‌ها Arrays
4	0.47-0.71	1.28-2.3	20, 40	1, 2	0	0	شاهد Control
4	0.31-0.62	0.75-1.53	20, 40	1, 2	مربع Square	16	موازی Parallel
4	0.31-0.56	1.03-1.93	20, 40	1, 2	مربع Square	16	شطرنجی Plaid
4	0.28-0.56	0.71-1.82	20, 40	1, 2	مربع Square	16	همگرا Converge
4	0.3-0.63	0.8-2.2	20, 40	1, 2	مربع Square	16	واگرا Diverge
4	0.36-0.63	0.99-1.99	20, 40	1, 2	مربع Square	16	Z شکل Z shape
1	0.25-0.45	0.97-1.62	20	1	مربع Square	36	موازی Parallel
2	0.25-0.51	0.96-1.84	20	1	مستطیل Rectangular	16, 36	موازی Parallel
2	0.29-0.57	1.03-1.79	20	1	دوزنقه Trapezium	16, 36	موازی Parallel
2	0.23-0.55	0.98-1.42	20	1	مثلث Triangle	16, 36	موازی Parallel
2	0.2-0.56	0.79-1.3	20	1	متوازی‌الاضلاع Rhombus	16, 36	موازی Parallel

$$U_f = C_c(g'h_f)^{0.5} \quad (6)$$

که در آن، U_f سرعت پیشانی جریان غلیظ، C_c ضریب تجربی، g' شتاب ثقل موثر و h_f ارتفاع پیشانی جریان غلیظ می‌باشد. با توجه به اندازه‌گیری سرعت و ارتفاع پیشانی در آزمایش‌ها و محاسبه شتاب ثقل کاهش‌یافته، در نهایت داده‌ها با کمک نرم‌افزار SPSS برازش داده شد و ضرایب C_c مربوط به هر آزمایش استخراج گردید و در قسمت نتایج و بحث به تفصیل بیان شده است.

نتایج و بحث

در جدول ۱ محدوده اعداد رینولدز و فرود برای پیشانی جریان غلیظ ارائه شده است. همان‌طور که در این جدول مشاهده می‌شود در پژوهش حاضر تمامی آزمایش‌ها در حالت جریان زیر بحرانی و رژیم آشفته قرار دارند. با توجه به آزمایش‌های انجام شده این پژوهش، قسمت نتایج و بحث در سه بخش، تجزیه و تحلیل شده است. در بخش اول به بررسی تأثیر شکل صفحه‌ها بر سرعت و ارتفاع پیشانی جریان غلیظ، در بخش دوم به بررسی تأثیر آرایش صفحه‌ها و در بخش سوم با تغییر در مساحت شکل‌ها، به بررسی تأثیر مساحت صفحه‌ها بر سرعت و ارتفاع پیشانی جریان غلیظ پرداخته شده است.

اثر شکل صفحه‌های نفوذناپذیر مستغرق بر مشخصه‌های جریان غلیظ: شکل ۵ محدوده تغییرات سرعت بی‌بعد پیشروی جریان را در شش مقطع به فواصل ۵۰ سانتی‌متر و برای پنج شکل صفحه نشان می‌دهد. U_f ، سرعت پیشانی جریان غلیظ در بستر دارای صفحه، U ، سرعت در بستر صاف (آزمایش شاهد) U_f/U ، نشان‌دهنده میزان قابلیت صفحه‌ها برای کنترل جریان غلیظ نسبت به بستر صاف می‌باشد. همچنین X ، فواصل اندازه‌گیری داده‌ها از ابتدای نصب صفحه‌ها تا مقطع مورد نظر (سرعت و ارتفاع پیشانی) و X_a ، طول کل نصب صفحه‌ها (۳ متر)

آنالیز ابعادی: پارامترهای مؤثر صفحه‌های نفوذناپذیر مستغرق بر پیشروی جریان غلیظ در این پژوهش، را می‌توان با استفاده از رابطه ۴ به صورت زیر نشان داد:

$$f(P, A, F, S, \Delta c, \rho_a, h_b, h_f, U_f, \mu_{d,c}, g' \cos \theta) = 0 \quad (4)$$

که در آن، P آرایش صفحه‌های نفوذناپذیر مستغرق، A مساحت صفحه‌های نفوذناپذیر مستغرق، F شکل صفحه‌های نفوذناپذیر مستغرق، S شیب کف فلوم، Δc اختلاف غلظت جریان غلیظ با سیال پیرامون (در واقع همان غلظت جریان غلیظ می‌باشد)، h_b ارتفاع بدنه جریان غلیظ، h_f ارتفاع پیشانی جریان غلیظ، U_f سرعت پیشانی جریان غلیظ، ρ_a جرم مخصوص سیال پیرامون، $\mu_{d,c}$ لزجت دینامیکی جریان غلیظ، θ زاویه بستر با افق و g' شتاب ثقل کاهش‌یافته (که به دلیل اختلاف دانسیته جریان غلیظ با سیال پیرامون به وجود می‌آید و عامل حرکت جریان غلیظ می‌باشد) می‌باشد. با در نظر گرفتن سه پارامتر تکراری U_f ، h_f و ρ_a آنالیز ابعادی به روش پای باکینگهام انجام گرفت همچنین از آنجایی که آزمایش‌های این پژوهش در فلوم و در شرایط جریان آزاد صورت پذیرفت و عدد رینولدز جریان غلیظ $(\frac{\rho_a \times U_f \times h_f}{\mu_{d,c}})$ نیز همواره در محدوده جریان متلاطم قرار دارد، از تأثیر آن صرف‌نظر شده است. بنابراین عدد فرود حجمی جریان و پارامترهای مؤثر بر آن طبق رابطه ۵ می‌باشد:

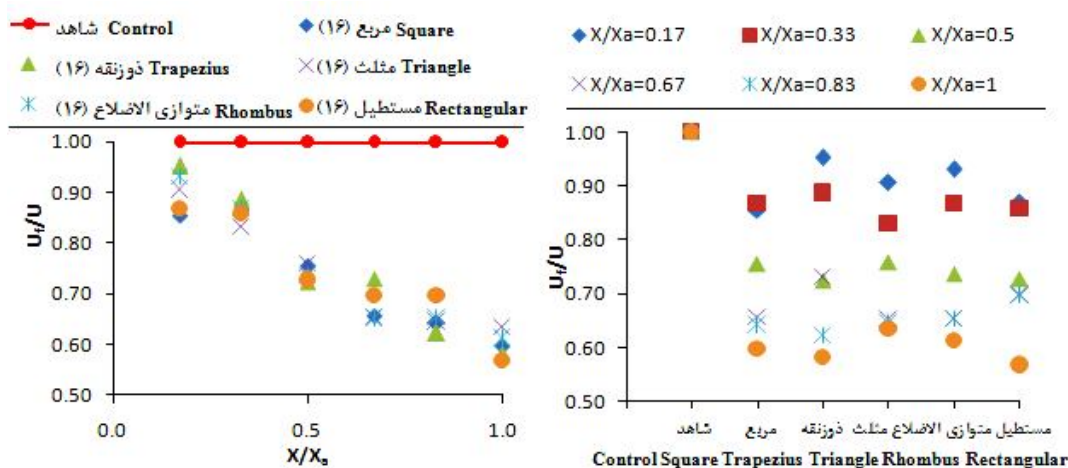
$$F_{rd,c} = \frac{U_f}{\sqrt{g' \times \cos \theta \times h_f}} \quad (5)$$

$$= f^*(P, \frac{A}{h_f^2}, F, S, \frac{\Delta c}{\rho_a}, \frac{h_b}{h_f}, \frac{X}{h_f})$$

در انتها پژوهشگران مختلف از روی معادله سرعت ارائه شده توسط کنولگان (۱۹۵۸)، ضرایب تجربی برای سرعت ارائه دادند. ضریب C_c با بررسی سرعت پیشانی جریان غلیظ در برابر سرعت برشی حجمی حاصل می‌شود. در این پژوهش نیز برای محاسبه ضریب C_c از رابطه زیر استفاده گردید:

بیشترین میزان کاهش سرعت را دارند اما با میانگین گرفتن از میزان درصد کاهش سرعت در مقطع ۳ متر، شکل مربع با ۲۷/۱ درصد بیشترین میزان کاهش سرعت را به خود اختصاص داده و پس از آن شکل مستطیل و مثلث به ترتیب با ۲۶/۴ و ۲۶/۲ درصد کاهش سرعت، در رتبه دوم و شکل متوازی الاضلاع و دوزنقه نیز با ۲۵/۸ و ۲۵ درصد کاهش سرعت، در رتبه سوم قرار می‌گیرند. دلیل این امر آن است که با حرکت جریان غلیظ در طول فلوم، نیروی مقاوم (نیروی دراگ) به صفحه‌ها برخورد می‌کند و تمام پارامترهای این نیرو مثل چگالی، مساحت و سرعت برخورد یکسان بوده و تنها تفاوت در ضریب C_d (ضریب تجربی که در رابطه نیروی دراگ وجود دارد) شکل‌ها بوده است.

است. همان‌طور که در شکل ۵ مشخص است در اثر برخورد جریان غلیظ با صفحه‌ها، سرعت بی‌بعد در طول مسیر نصب، به میزان قابل توجهی کاهش می‌یابد، همچنین نتایج قربانمقدم و همکاران (۲۰۱۳) نشان دادند که سرعت پیشروی جریان غلیظ با قرار دادن موانع کاهش می‌یابد (۴). این پدیده به دلیل برخورد جریان غلیظ با صفحه، ایجاد اصطکاک و همچنین افزایش ورود سیال پیرامون به پیشانی جریان غلیظ می‌باشد که در نتیجه آن اختلاف چگالی سیال غلیظ با سیال پیرامون کاهش یافته و قدرت جریان کم می‌شود که مشابه نتیجه اوهی (۲۰۰۲) می‌باشد که احداث مانع را برای کنترل جریان مناسب دانست (۱۱). برای شکل‌های مختلف، همان‌طور که در شکل ۵ مشخص است، در هر مقطع از مسیر یکی از شکل‌ها،

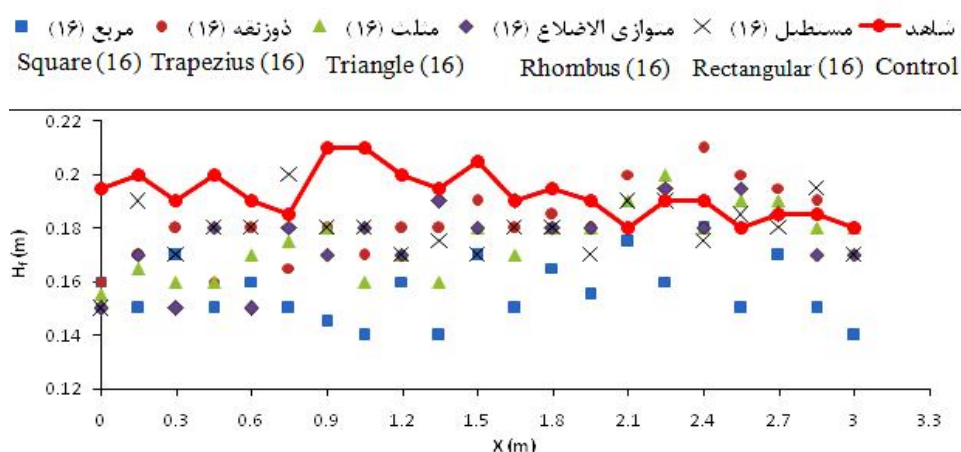


شکل ۵- تغییرات سرعت بی‌بعد پیشروی پیشانی جریان غلیظ نسبت به بستر صاف در شکل‌های متفاوت صفحه‌ها.

Figure 5. Dimensionless velocity variations of turbidity current head compared to smooth bed in different shapes of plates.

انتهای مسیر سرعت جریان غلیظ بیشترین کاهش را دارد و جریان با عبور از روی موانع با سرعت کم و ارتفاع پیشانی زیاد ادامه مسیر را طی می‌کند. همچنین همان‌طور که در شکل ۶ مشخص است شکل مربع با ۱۸/۴ درصد بیشترین درصد کاهش ارتفاع پیشانی را دارا می‌باشد.

بررسی ارتفاع پیشانی جریان غلیظ در طول مسیر نیز نشان می‌دهد که در ابتدای مسیر صفحه‌ها باعث کاهش ارتفاع پیشانی جریان شده‌اند که مشابه نتیجه پژوهش قربانمقدم و همکاران (۲۰۱۳) می‌باشد (۴)، اما به تدریج و در انتهای مسیر باعث افزایش ارتفاع پیشانی جریان شده‌اند. دلیل این امر آن است که در

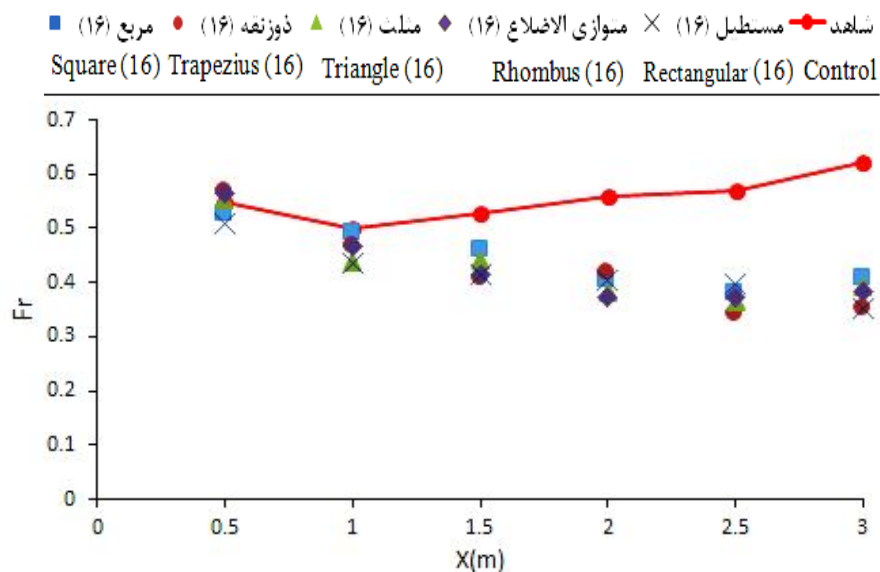


شکل ۶- تغییر ارتفاع پیشانی جریان غلیظ در شیب بستر ۱ درصد و غلظت ۲۰ گرم بر لیتر.

Figure 6. Height variation of turbidity current head in bed slope 1% and concentration 20 g.l⁻¹.

دارد و این روند به‌ازای تمام موانع تقریباً مشابه می‌باشد. دلیل کاهش عدد فرود این است که در اثر برخورد جریان به صفحه‌ها، سرعت جریان در طول مسیر کاهش می‌یابد و ارتفاع پیشانی تا حدودی به دلیل نصب صفحه‌ها افزایش می‌یابد. همچنین میزان کاهش سرعت بیش‌تر از میزان افزایش ارتفاع پیشانی جریان می‌باشد و عدد فرود کاهش می‌یابد.

نتایج حاصل از مقایسه عدد فرود نسبت به شکل صفحه‌ها در شیب و غلظت ثابت در ۶ مقطع در شکل ۷ نشان داده شده است. همان‌طور که در شکل ۷ مشخص است، عدد فرود در آزمایش شاهد روند افزایشی دارد و علت آن شیب فلوم و در نتیجه روند افزایشی سرعت در طول مسیر جریان می‌باشد. همچنین مشاهده می‌شود با نصب صفحه‌ها در تمامی شکل‌ها، عدد فرود در طول مسیر جریان روند کاهشی

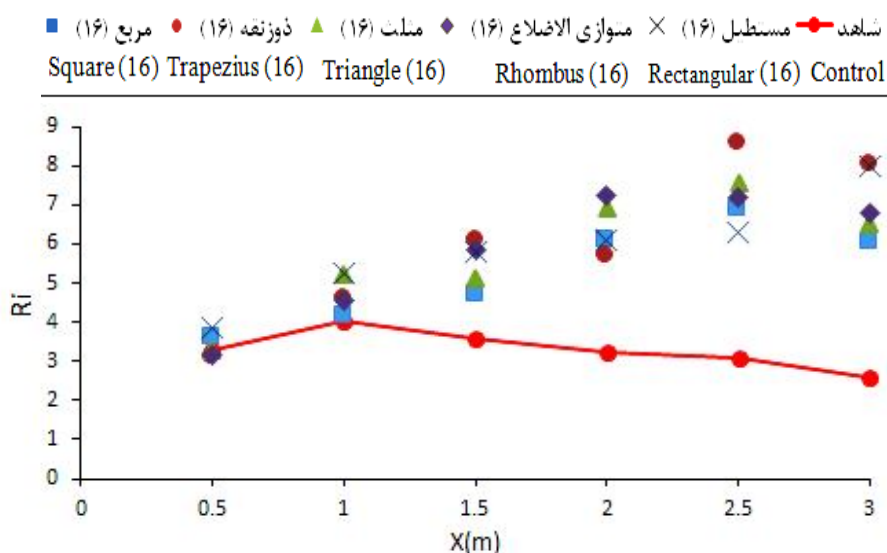


شکل ۷- تغییر عدد فرود در صفحه‌های با شکل‌های مختلف در شیب بستر ۱ درصد و غلظت ۲۰ گرم بر لیتر.

Figure 7. Froude number variation in different shapes in bed slope 1% and concentration 20 g.l⁻¹.

روند افزایشی است. علت آن تغییرات سرعت در طول مسیر جریان و به دنبال آن تغییرات عدد فرود جریان می‌باشد که این عدد هم عکس مجذور عدد فرود بوده و همان‌طور که مشاهده می‌شود، روند تغییرات آن نیز عکس عدد فرود می‌باشد.

نتایج حاصل از مقایسه عدد ریچاردسون نسبت به شکل صفحه‌ها در شیب و غلظت ثابت در ۶ مقطع در شکل ۸ نشان داده شده است. با توجه به شکل ۸ در آزمایش شاهد روند تغییرات عدد ریچاردسون به صورت کاهشی می‌باشد و با نصب صفحه‌ها، این



شکل ۸- تغییرات عدد ریچاردسون در صفحه‌های با شکل‌های مختلف در غلظت ۲۰ گرم بر لیتر و شیب بستر ۱ درصد.

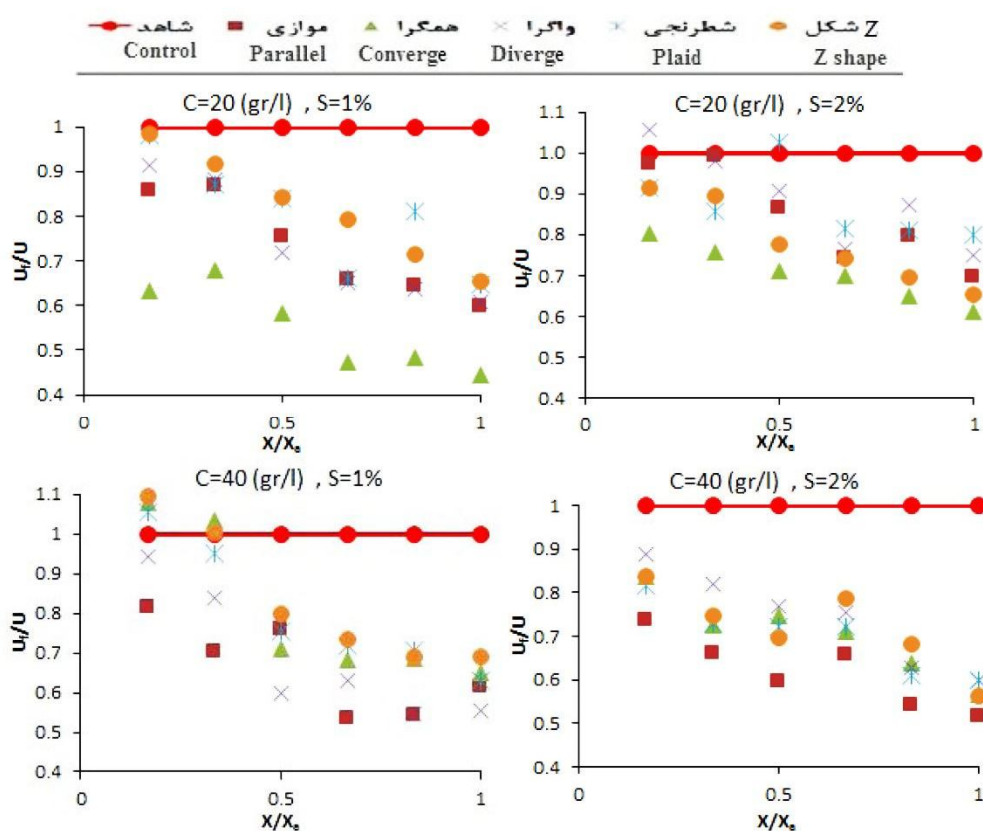
Figure 8. Richardson number variations in different shapes in bed slope 1% and concentration 20 g.l⁻¹.

سیال پیرامون شده و به دنبال آن جریان شتاب گرفته و شتاب ثقل کاهش یافته (عامل حرکت جریان غلیظ)، زیاد بوده و پدیده درون آمیختگی آب زلال به درون جریان غلیظ بیشتر شده است، همچنین از طرفی به دلیل وجود مانع در مسیر جریان و افزایش اصطکاک در اثر برخورد با صفحه و کاهش قدرت محرکه جریان، سرعت پیشانی جریان از صفحه‌های مستغرق تأثیر بیشتری می‌پذیرد و کاهش بیشتری را نمایان می‌سازد. به طور مشابه پورکاید و همکاران (۲۰۱۴) این نتیجه را برای سرعت متوسط بدنه جریان غلیظ گزارش نمودند (۱۳). همچنین در غلظت ۲۰ گرم بر لیتر آرایش همگرا با میزان کاهش ۴۵/۱ درصد در شیب ۱ درصد و ۲۹/۵ درصد در شیب ۲ درصد

اثر آرایش صفحه‌های نفوذناپذیر مستغرق بر مشخصه‌های جریان غلیظ: همان‌طور که در شکل ۹ مشخص است در اثر برخورد جریان غلیظ با صفحه‌ها، سرعت بی‌بعد به میزان قابل توجهی کاهش می‌یابد. به طور کلی در هر دو غلظت، سرعت در حالت نصب صفحه نسبت به سرعت در بستر صاف، کم‌تر می‌شود و این میزان افت سرعت، در غلظت ۲۰ گرم بر لیتر نسبت به غلظت ۴۰ گرم بر لیتر، بیشتر می‌باشد. در نتیجه در غلظت ۲۰ گرم بر لیتر، با افزایش طول نصب صفحه‌ها (بیشتر از ۳ متر)، تأثیر کاهش سرعت جریان نسبت به غلظت ۴۰ گرم بر لیتر بیشتر خواهد بود. در مقاطع ثابت افزایش غلظت باعث افزایش اختلاف چگالی بین جریان غلیظ و

می‌یابد که مشابه نتیجه پژوهش اصغری‌پری (۲۰۱۰) بر روی سرعت پیشانی جریان غلیظ و پورکاید و همکاران (۲۰۱۴) بر روی سرعت متوسط بدنه جریان غلیظ می‌باشد (۲، ۱۳). در این حالت از تأثیر مقاومت موانع، کم شده و شدت اختلاط سیال پیرامون و سیال غلیظ کم می‌شود و پایداری جریان افزایش می‌یابد.

نسبت به بقیه آرایش‌ها روی کاهش سرعت پیشروی جریان تأثیر بیش‌تری دارد و در غلظت ۴۰ گرم بر لیتر آرایش موازی با ۳۳/۹ درصد در شیب ۱ درصد و ۳۸/۳ درصد در شیب ۲ درصد بهترین آرایش برای کاهش سرعت می‌باشد. از طرفی در هر دو غلظت، با افزایش شیب بستر، سرعت پیشروی جریان افزایش می‌یابد و اثر مانع در کاهش سرعت پیشروی کاهش

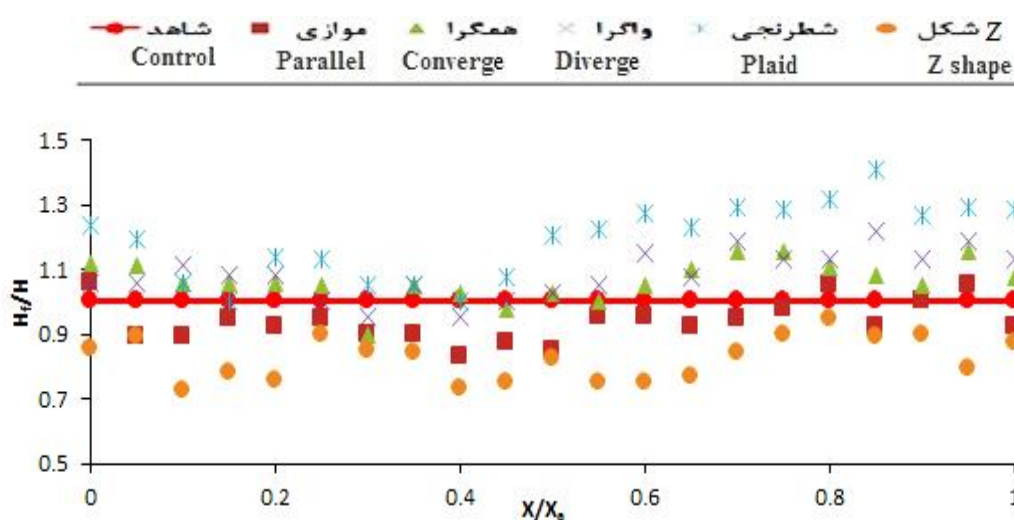


شکل ۹- تغییرات سرعت بی‌بعد نسبت به تغییر شیب و غلظت.

Figure 9. Dimensionless velocity variations compared to slope and concentration.

لیتر و شیب ۲ درصد آرایش Z شکل با ۱۷/۷ درصد بیش‌ترین میزان کاهش ارتفاع پیشانی نسبت به حالت شاهد را سبب شده و در بقیه شرایط و آزمایش‌های دیگر آرایش موازی تأثیر بیش‌تری بر کاهش ارتفاع جریان غلیظ گذاشته است.

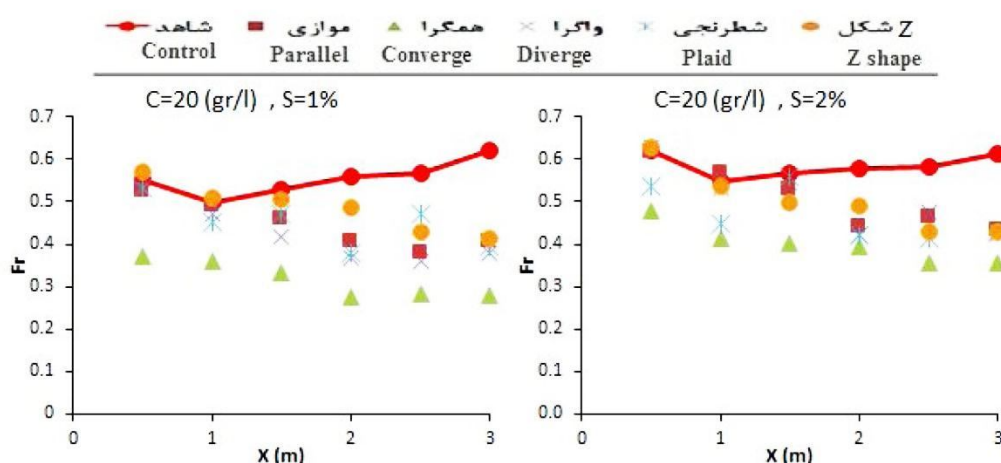
ارتفاع جریان غلیظ در طول مسیر جریان روند افزایشی دارد و به دلیل این‌که دبی جریان غلیظ در طول مسیر تقریباً ثابت می‌باشد، افزایش ارتفاع و افزایش سطح اشغال شده توسط پیشانی جریان غلیظ، الزاماً کاهش سرعت پیشانی را در پی دارد. همان‌طور که در شکل ۱۰ مشاهده می‌شود در غلظت ۲۰ گرم بر



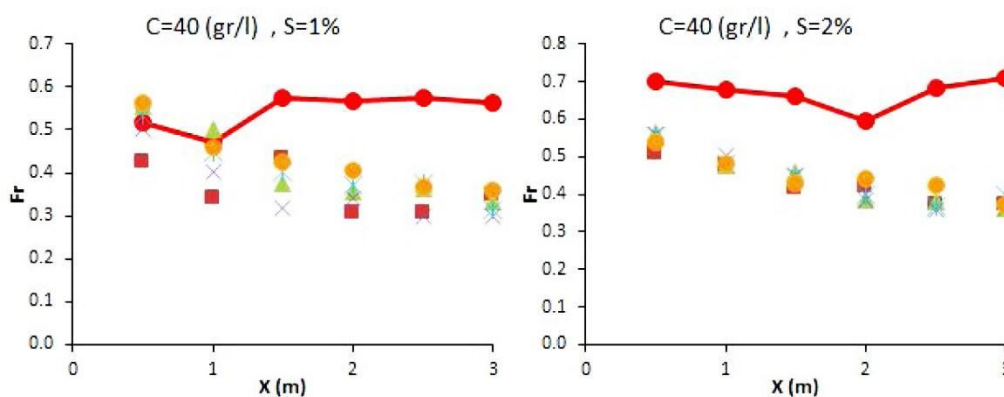
شکل ۱۰- تغییر ارتفاع پیشانی جریان غلیظ در تمامی آرایش‌ها در شیب بستر ۲ درصد و غلظت ۲۰ گرم بر لیتر.
 Figure 10. Height variation of turbidity current head in all arrays in bed slope 2% and concentration 20 g.l⁻¹.

آزمایش‌های طباطبایی (۲۰۱۴) بر روی آرایش‌های پوشش گیاهی می‌باشد (۱۶). همچنین در غلظت ۴۰ گرم بر لیتر آرایش موازی کم‌ترین عدد فرود را نسبت به شاهد نشان می‌دهد و بهترین نوع آرایش برای این غلظت می‌باشد. جدول ۲ نیز میانگین درصد کاهش عدد فرود را نسبت به حالت شاهد نشان می‌دهد. مطابق جدول ۲ در غلظت ۲۰ گرم بر لیتر آرایش همگرا با ۴۲/۲ درصد در شیب ۱ درصد و با ۳۱/۵ درصد در شیب ۲ درصد بیش‌ترین کاهش عدد فرود را نسبت به حالت شاهد دارد. همچنین در غلظت ۴۰ گرم بر لیتر آرایش موازی با ۳۳/۶ درصد در شیب ۱ درصد و با ۳۶/۳ درصد بیش‌ترین درصد کاهش عدد فرود را دارا می‌باشد.

با توجه به شکل ۱۱ با امتداد پیشروی پیشانی جریان غلیظ در طول کانال به دلیل کاهش سرعت پیشانی، از عدد فرود کاسته شده است. همچنین با افزایش شیب بستر مقدار عدد فرود به دلیل افزایش سرعت پیشانی جریان غلیظ افزایش می‌یابد. با افزایش غلظت، مقدار g' و سرعت پیشانی جریان غلیظ افزایش یافته و ارتفاع پیشانی کاهش می‌یابد و در نتیجه عدد فرود افزایش می‌یابد همچنین نتایج اصغری‌پری (۲۰۱۰) نشان داد که با افزایش غلظت، ارتفاع جریان غلیظ کم و عدد فرود افزایش می‌یابد (۲). همچنین با توجه به شکل ۱۱ در غلظت ۲۰ گرم بر لیتر در هر دو شیب آرایش همگرا در تمامی نقاط مسیر عدد فرود کم‌تری نسبت به بقیه آرایش‌ها نشان می‌دهد و بهترین آرایش برای این غلظت تشخیص داده شد که مشابه نتایج



شکل ۱۱-الف- تغییر عدد فرود در آرایش‌های مختلف در غلظت ۲۰ گرم بر لیتر و دو شیب بستر ۱ و ۲ درصد.
Figure 11. a- Froude number variation in different arrays in concentration 20 g.l⁻¹ and bed slopes 1 and 2%.



شکل ۱۱-ب- تغییر عدد فرود در آرایش‌های مختلف در غلظت ۴۰ گرم بر لیتر و دو شیب بستر ۱ و ۲ درصد.
Figure 11. b- Froude number variation in different arrays in concentration 40 g.l⁻¹ and bed slopes 1 and 2%.

جدول ۲- میانگین درصد کاهش عدد فرود در آرایش‌های مختلف نسبت به بستر صاف تحت شیب‌های بستر ۱ و ۲ درصد و غلظت‌های ۲۰ و ۴۰ گرم بر لیتر.

Table 2. The average percentage of reduction of Froude number in different arrays compared to smooth bed in bed slopes 1 and 2 % and concentrations 20 and 40 g.l⁻¹.

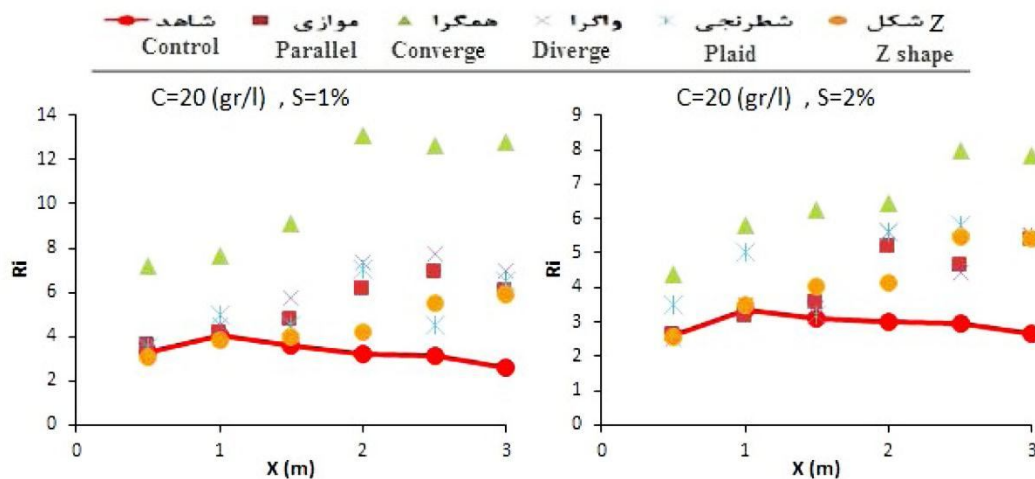
غلظت‌ها (گرم بر لیتر) Concentrations(g.l ⁻¹)	شیب‌ها (%) Slopes	Z شکل Z shape	شطرنجی Plaid	واگرا Diverge	همگرا Converge	موازی Parallel	مساحت و شکل Area and Shape
20	1%	11.6	18.4	22.7	42.2	19.0	مربع با مساحت ۱۶
20	2%	14.0	19.9	14.4	31.5	12.9	سانتی‌مترمربع
40	1%	20.1	24.3	32.9	22.8	33.6	Square with 16
40	2%	33.0	34.3	34.8	34.8	36.3	cm ² area

ریچاردسون روندی افزایشی دارد و در حالت شاهد روند کاهشی دارد. همچنین با توجه به شکل ۱۲ با افزایش شیب در هر دو غلظت، عدد ریچاردسون

باتوجه به شکل ۱۲ با امتداد پیشروی پیشانی جریان غلیظ در طول کانال با توجه به این‌که با نصب صفحه‌ها از عدد فرود کاسته می‌شود بنابراین عدد

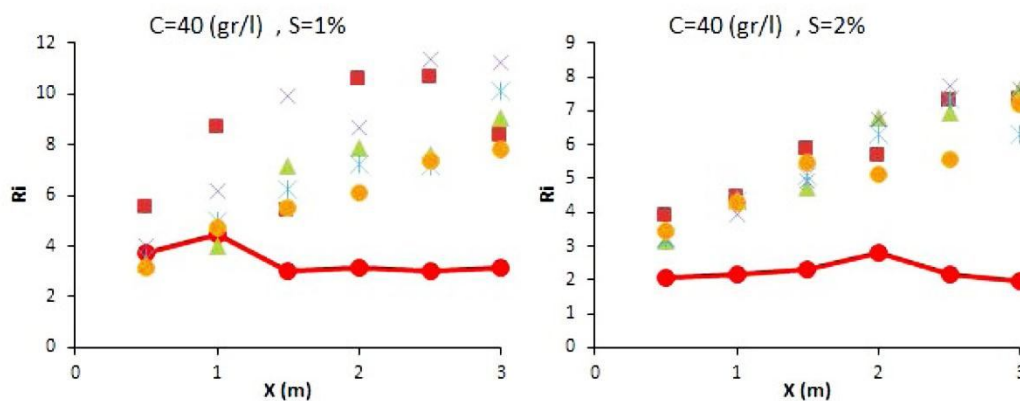
در تمام مقاطع آزمایشی اتفاق نمی‌افتد اما به‌طور کلی و در بیش‌تر مقاطع قابل مشاهده است.

کاهش می‌یابد. با افزایش غلظت عدد ریچاردسون کاهش می‌یابد البته این موضوع در تمام آرایش‌ها و



شکل ۱۲- الف- تغییر عدد ریچاردسون در آرایش‌های مختلف در دو شیب بستر ۱ و ۲ درصد و غلظت ۲۰ گرم بر لیتر.

Figure 12. a- Richardson number variation in different arrays in concentration 20 g.l^{-1} and bed slopes 1 and 2%.



شکل ۱۲- ب- تغییر عدد ریچاردسون در آرایش‌های مختلف در دو شیب بستر ۱ و ۲ درصد و غلظت ۴۰ گرم بر لیتر.

Figure 12. b- Richardson number variation in different arrays in concentration 40 g.l^{-1} and bed slopes 1 and 2%.

است با افزایش شیب بستر مقادیر ضریب C_c افزایش می‌یابد. مقدار این ضریب در تمامی غلظت‌ها و شیب‌ها، در حالت شاهد بیش‌تر از حالت وجود صفحه‌ها می‌باشد و به دلیل تأثیر هم‌زمان سرعت و ارتفاع پیشانی جریان غلیظ این ضریب برای هر آرایش متفاوت می‌باشد.

ضریب سرعت رأس جریان غلیظ: در این پژوهش برای هر کدام از آرایش‌ها در هر شیب و غلظت به‌طور جداگانه ضریب سرعت رأس جریان غلیظ (C_c) محاسبه شد. در جدول ۳ این ضریب برای آرایش‌های مختلف به تفکیک شیب و غلظت نشان داده شده است. همان‌طور که در جدول ۳ مشخص

جدول ۳- ضرایب سرعت رأس جریان غلیظ در آرایش‌های مختلف.

Table 3. Velocity coefficients of the turbidity current head in different arrays.

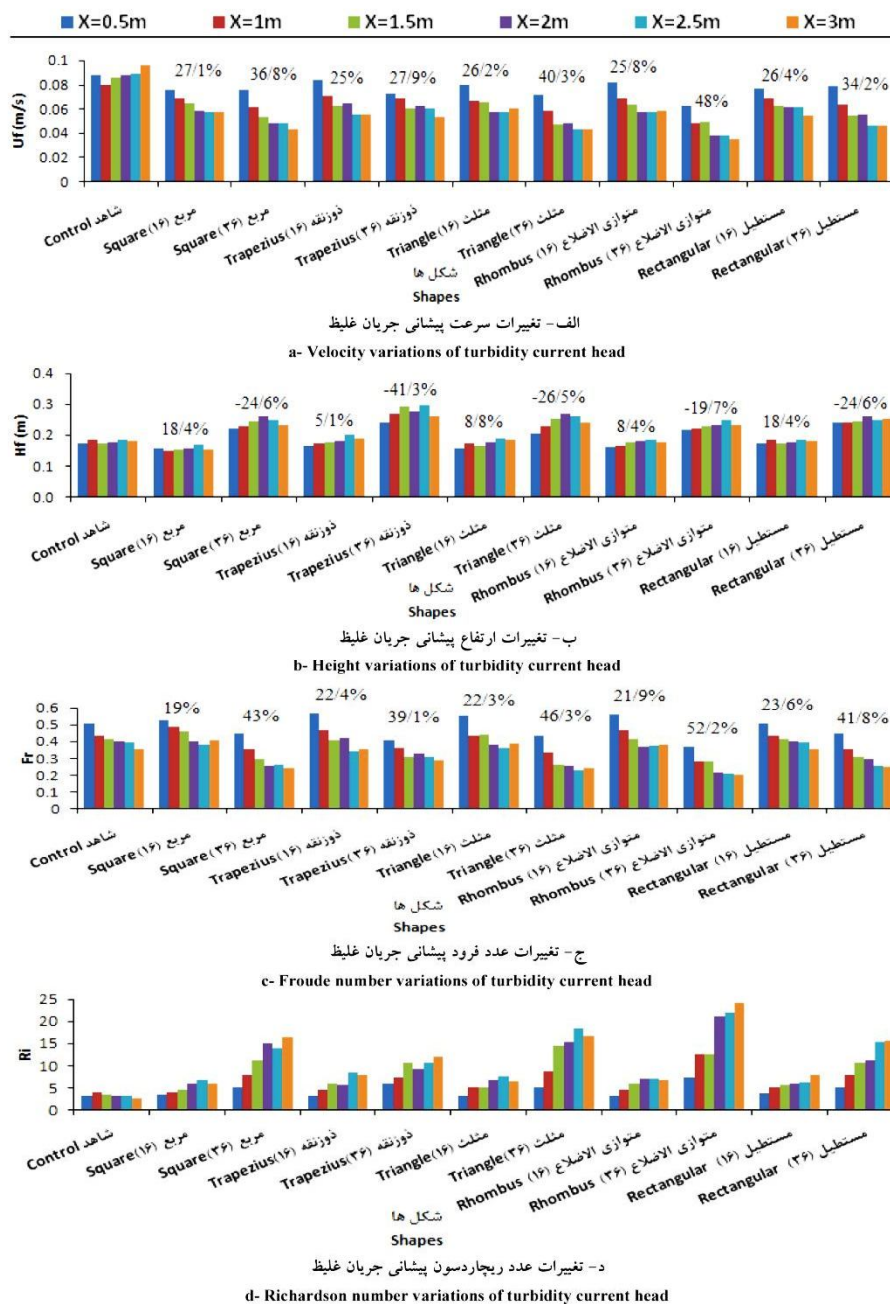
C=40 g.l ⁻¹ S=2%	C=40 g.l ⁻¹ S=1%	C=20 g.l ⁻¹ S=2%	C=20 g.l ⁻¹ S=1%	آرایش‌ها Arrays
0.671	0.543	0.584	0.553	شاهد Control
0.425	0.360	0.505	0.443	موازی Parallel
0.432	0.409	0.398	0.316	شطرنجی Plaid
0.432	0.357	0.496	0.421	همگرا Converge
0.437	0.404	0.463	0.450	واگرا Diverge
0.447	0.429	0.498	0.485	Z شکل Z shape

پیشانی جریان غلیظ را مشاهده نمودند (۸). همان‌طور که در شکل ۱۳ نیز مشخص شده میانگین درصدهای کاهش سرعت، ارتفاع و عدد فرود پیشانی جریان غلیظ نسبت به بستر صاف، برای هر شکل در طول مسیر جریان محاسبه شده و در بالای ستون مربوط به هر شکل نشان داده شده است (اعداد منفی در نمودار ارتفاع پیشانی، نشان‌دهنده افزایش ارتفاع نسبت به حالت شاهد یا بستر صاف می‌باشد). بیش‌ترین افزایش ارتفاع پیشانی مربوط به شکل دوزنقه می‌باشد با وجودی که این شکل تأثیر چندانی بر روی میزان کاهش سرعت پیشانی جریان نداشته است که علت آن را می‌توان این‌گونه بیان کرد با توجه به این‌که شکل دوزنقه از قاعده بزرگ‌تر بر روی کف کانال نصب شد و تقریباً تمام مسیر جریان غلیظ را مسدود نمود، جریان غلیظ با رسیدن به این شکل، با پرش از روی آن با ارتفاع زیاد و سرعتی که داشت ادامه مسیر را طی نمود بنابراین نصب این شکل با ارتفاع زیاد پیشانی و تغییر ناچیز در سرعت پیشانی همراه بود. با مشاهده نمودار مربوط به اعداد فرود و با بررسی درصد کاهش این عدد در دو مساحت می‌توان نتیجه گرفت بیش‌ترین کاهش عدد فرود در شکل متوازی‌الاضلاع با مساحت

اثر مساحت صفحه‌های نفوذناپذیر مستغرق بر مشخصه‌های جریان غلیظ: در شکل ۱۳ با توجه به شکل‌های متفاوت صفحه‌های نفوذناپذیر، به بررسی مقایسه‌ای دو مساحت ۱۶ و ۳۶ سانتی‌متر مربع بر ارتفاع پیشانی، سرعت رأس، عدد فرود و عدد ریچاردسون پیشانی جریان غلیظ پرداخته شد. همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود با تغییر مساحت از ۱۶ به ۳۶ سانتی‌متر مربع بین شکل‌های مختلف، شکل متوازی‌الاضلاع با ۲۲/۲ درصد بیش‌ترین تأثیر را در کاهش سرعت داشته است، بعد از آن به ترتیب مثلث با ۱۴/۱ درصد، مربع با ۹/۷ درصد، مستطیل با ۷/۸ درصد در رتبه‌های بعد قرار دارند. شکل دوزنقه با ۲/۹ درصد، تغییر چندانی در میزان کاهش سرعت پیشانی ایجاد نکرده است. همچنین مشاهده شد که افزایش مساحت بر روی افزایش ارتفاع پیشانی جریان نیز مؤثر بوده که این به دلیل زیاد شدن ارتفاع صفحات نسبت به مساحت کوچک‌تر می‌باشد. ارتفاع زیاد صفحه‌ها، چون باعث جهش یا پرش جریان غلیظ از روی آن‌ها شده بنابراین ارتفاع پیشانی جریان را نیز افزایش داده است که مشابه نتیجه نصرالله‌پور و قمشی (۲۰۱۲) می‌باشد که با افزایش سطح زبری، کاهش سرعت و افزایش ارتفاع

در حالت شاهد کم‌ترین مقدار را داراست و با تغییر مساحت از ۱۶ به ۳۶ شکل متوازی‌الاضلاع بیش‌ترین تغییر را در نمودار نشان می‌دهد و این افزایش عدد ریچاردسون ناشی از کاهش عدد فرود و سرعت پیشانی جریان غلیظ می‌باشد.

۳۶ سانتی‌متر مربع می‌باشد. همچنین تغییر مساحت تأثیر زیادی بر روی کاهش این عدد داشته است که علت آن کم شدن سرعت می‌باشد. بعد از شکل متوازی‌الاضلاع، به‌ترتیب شکل مربع و مثلث، مستطیل و در نهایت دوزنقه با تغییر مساحت بر کاهش عدد فرود مؤثر بوده‌اند. همچنین با توجه به شکل ۱۳ عدد ریچاردسون



شکل ۱۳- مقایسه اثر دو مساحت ۱۶ و ۳۶ سانتی‌متر مربع صفحه‌ها بر مشخصه‌های پیشانی جریان غلیظ.

Figure 13. Comparison of the effect two area of plates 16 and 36 cm² on turbidity current head characteristics.

در حالت نصب صفحه‌ها این ضریب کاهش می‌یابد. همچنین با افزایش مساحت، ضریب سرعت جریان کاهش بیشتری می‌یابد که این نشان‌دهنده تأثیر افزایش مساحت صفحه‌ها بر کاهش سرعت جریان می‌باشد و در شکل متوازی‌الاضلاع بیش‌ترین کاهش ضریب سرعت مشاهده می‌شود.

ضریب سرعت رأس جریان غلیظ: در جدول ۴ ضریب سرعت رأس جریان غلیظ برای شکل‌های مختلف صفحه‌های مستغرق در شیب ۱ درصد و غلظت ۲۰ گرم بر لیتر مشخص شده‌اند. همان‌طور که در جدول مشاهده می‌شود در حالت شاهد ضریب سرعت در معادله سرعت بیش‌ترین مقدار را دارد و

جدول ۴- ضرایب سرعت رأس جریان غلیظ در صفحه‌های با شکل‌های مختلف در شیب ۱ درصد و غلظت ۲۰ گرم بر لیتر.

Table 4. Velocity coefficients of the turbidity current head in different shapes of plates in bed slope 1% and concentration 20 g.l⁻¹.

مساحت ۳۶ سانتی‌مترمربع 36 cm ² area	مساحت ۱۶ سانتی‌مترمربع 16 cm ² area	شکل‌ها Shapes
0.553	0.553	شاهد Control
0.309	0.443	مربع Square
0.318	0.419	مستطیل Rectangular
0.332	0.421	دوزنقه Trapezium
0.289	0.424	مثلث Triangle
0.260	0.426	متوازی‌الاضلاع Rhombus

شکل برای کاهش سرعت پیشانی متفاوت می‌باشد و در مساحت ۱۶ سانتی‌مترمربع، شکل مربع با ۲۷/۱۱ درصد و در مساحت ۳۶ سانتی‌مترمربع، شکل متوازی‌الاضلاع با ۴۸/۰۲ درصد بهترین شکل برای کاهش سرعت پیشانی جریان غلیظ می‌باشد. بررسی آرایش‌های صفحه‌ها نیز در دو غلظت ۲۰ و ۴۰ گرم بر لیتر نتایج متفاوتی داشت و در غلظت ۲۰ گرم بر لیتر آرایش همگرا با ۲۹/۵ و ۴۵/۱ درصد و در غلظت ۴۰ گرم بر لیتر موازی با ۳۳/۹ و ۳۸/۳ درصد بیش‌ترین تأثیر را بر کاهش سرعت پیشانی جریان داشتند. بررسی شیب‌ها نیز نشان داد در غلظت ۲۰ و

نتیجه‌گیری کلی

پیشروی جریان غلیظ به عوامل زیادی از جمله اصطکاک بستر بستگی دارد. در این پژوهش به بررسی تأثیر صفحه‌های نفوذناپذیر مستغرق بر سرعت و ارتفاع پیشانی جریان غلیظ نمکی پرداخته شد. آزمایش‌ها نشان داد که با قرار دادن صفحه‌های نفوذناپذیر در مسیر جریان غلیظ به‌دلیل برخورد جریان با صفحه و ایجاد اصطکاک و کمک به افزایش تنش در فصل مشترک دو سیال، سرعت پیشروی جریان به‌میزان قابل‌توجهی کاهش می‌یابد. نتایج نشان داد که در دو مساحت ۱۶ و ۳۶ سانتی‌مترمربع بهترین

۴۰ گرم بر لیتر افزایش شیب از تأثیر صفحه‌ها بر روی سرعت می‌کاهد. پیشنهاد می‌شود با توجه به نتایج این مقاله در شیب‌های تند رودخانه از صفحه‌های مستغرق با آرایش موازی و در غلظت‌های کم‌تر از آرایش همگرا استفاده شود، در این صورت ضمن کاهش سرعت پیشروی جریان غلیظ و جلوگیری از فرسایش بستر، می‌توان باعث افزایش عمر مفید سدهای ساخته شده نیز شد.

منابع

1. Altinakar, M.S., Graf, W.H., and Hopfinger, E.J. 1990. Weakly depositing turbidity current on a small slope. *J. Hydr. Res.* 28: 1. 55-80.
2. Asghari Pari, S.A. 2010. Effect of Baffle Barrier Height on Reservoir Sedimentation during Current Flow. Ph.D. Thesis, Water Sciences Engineering Faculty, University of Shahid Chamran Ahvaz, Department of Hydraulic Structures. (In Persian)
3. Asghari Pari, S.A., and Mohagheghiyani, S.M. 2015. Numerical investigation effect in using plate and tilt columnar barrier in controlling turbidity current. *Iran. J. Irrig. Drain.* 9: 2. 357-366. (In Persian)
4. Ghorban Moghadam, A.A., Ghomeshi, M., and Nasrollahpur, R. 2013. Nine int River Engineering Conference (9 IREC). University of Shahid Chamran Ahvaz. (In Persian)
5. Graf, W.H. 1983. Hydraulics of reservoir sedimentation. *International Water Power and Dam Construction.* 35: 45-52.
6. Islam, M.A., and Imran, J. 2010. Vertical structure of continuous release saline and turbidity currents. *J. Geophysic. Res.* 115: 1-14.
7. Khalili, A., Khozaymehzad, H., Akbarpour, A., and Varjavand, P. 2015. Experimental study on the effects of artificial vegetation density on gravity current's flow characteristics. *Iran. J. Irrig. Drain.* 9: 1. 83-95. (In Persian)
8. Nasrollahpour, R., and Ghomeshi, M. 2012. Effect of Roughness Geometry on Characteristics of Density Currents Head. *Ind. J. Sci. Technol.* 12: 0974-6846.
9. Nourmohammadi, Z., Afshin, H., and Firoozabadi, B. 2011. Experimental observation of the flow structure of turbidity currents. *J. Hydr. Res. IAHR.* 40: 2. 168-177.
10. Oehy, C.D., and Schleiss, A.J. 2007. Control of turbidity currents in reservoirs by solid and permeable obstacles. *J. Hydr. Engin.* 133: 6. 637-648.
11. Oehy, Ch. 2002. Effects of obstacles and jets on reservoir sedimentation due to turbidity currents, Communication No. 15 of the Laboratory of Hydraulic Structures LCH, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne EPFL, Switzerland.
12. Peters, W.D. 1999. Rough surface gravity current flows. Ph.D. Thesis, University of New Brunswick. Canada.
13. Pourkayd, S., Hasunizade, H., Kashefipour, M., and Kaydkhorde, A. 2014. In Vitro Study of Roughness, Slope and Concentration on Body Average Speed of Current Sedimentary Flow, The First National Congress on Water Crisis, Islamic Azad University Khorasgan Branch (Isfahan), 15 and 16 May 2013. (In Persian)
14. Prinos, P. 1999. Two-dimensional density currents over obstacles. *Proc.*, 28th IAHR Congress (CD-ROM: Graz, Austria, Theme D).
15. Simpson, J.E. 1997. Gravity currents. *The Environment and The Laboratory.* 2nd ed., Cambridge University Press, Cambridge, UK.
16. Tabatabaei, S.M. 2014. Bed slope effect and array of plants cover on saline density current at laboratory conditions. M.Sc. thesis, Water resources management, University of birjand, Faculty of agriculture. 120p. (In Persian)
17. Turner, J.S. 1973. Buoyancy Effects in Fluids, Cambridge University Press London, U.K.
18. Varjavand, P., Hosseinzadeh Dalir, A., Ghomeshi, M., and Farsadizadeh, D. 2013. Experimental study on the effects of artificial bed roughness on instantaneous velocity fluctuations of saline density currents. *J. Water Soil.* 27: 4. 839-849. (In Persian)



Experimental study on the effects of the shapes and arrays of submerged impermeable plates on turbidity current characteristics

***Z. Ghorbani¹, H. Khozayemnezhad² and Y. Ramezani²**

¹M.Sc. Student of Water Structures, University of Birjand,

²Assistant Prof., Dept. of Science and Water Engineering, University of Birjand

Received: 02/05/2016; Accepted: 08/23/2016

Abstract

Background and Objectives: Nowadays, dams are one of the most important structures to store surface water. Turbidity currents are usually the reason of sediment transport and deposition in deep reservoirs. As the turbidity current is completely stopped in the middle regions of the reservoir, sediment deposition reduces near the dam wall and as a result the main tasks of the dam are not disrupted. So, it is important to study the phenomenon. Roughening up or using obstacle the bed is a technique for changing the turbidity current hydraulics or reducing of its velocity. Some researches have been studied at this field, however, it is necessary to evaluate the effect of submerged impermeable plates on turbidity currents.

Materials and Methods: In the present research, the head velocity and height of the turbidity current head were studied on the bed with submerged impermeable plates. For this purpose an experimental, flume with 30 cm width, 10 m length and 46 cm height was used. The turbidity current was entered into the flume with concentration of 20 g.l⁻¹ with 1 and 2 percent bed slopes and concentration of 40 g.l⁻¹ with 1 and 2 percent bed slopes. Impermeable plates which came into two different areas (16 and 36 cm²) in five shapes (Square, rectangular, triangle, rhombus and trapezium) were located across the current. Also, square impermeable plates were placed as five arrays (parallel, plaid, converge, diverge and Z-shape) with an area of 16 cm².

Results: Flow velocity was measured in 6 sections with distance 50 cm and the height of head in 21 sections with distance 15 cm. Then, non-dimensional graphs of velocity, height, Froude number and Richardson number of turbidity current head were drawn by using the data which obtained by Buckingham dimensional analysis method. Dimensionless velocity during the installation significantly decreased due to the collision of turbidity current with plates. Also, the height of turbidity current head along flow path indicated that plates gradually reduced the height of head at the beginning of the route. Height of turbidity current head was increased and the current path Froude number was decreased at the end of the path.

Conclusion: Results showed that the development velocity of the turbidity current reduced between 25-48 percent proportion to smooth bed in the condition of plate's installation with different shapes and also the height of head reduced between 5.1-18.4 percent. Also, development velocity was reduced between 11.2-45.1 percent and the height of head was reduced between 0.4-18.4 percent in different arrays. Converge array in the concentration of 20 g.l⁻¹ and Parallel array in the concentration of 40 g.l⁻¹ were determined as the best array. By changing the area of plates from 16 to 36 cm² between different shapes, the shape of rhombus with 22.2 percent, showed the greatest effect in reducing velocity.

Keywords: Turbidity current, Submerged impermeable plates, Shapes and arrays of plates, Velocity and height of head

* Corresponding Author; Email: zahraghorbani303@yahoo.com