

بررسی آزمایشگاهی اثر تغییر عرض ناگهانی بر هیدرودینامیک جبهه جریان غلیظ

و اندرکنش نیروهای مؤثر

پویا اهدائی^۱ | مهدی قمشی^{۲*} | مهدی دریایی^۳ | محمد رضا زایری^۴

۱. دانشجوی دکتری، گروه سازه‌های آبی، دانشکده مهندسی آب و محیط زیست، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران. رایانامه: pouya_ehdaei@yahoo.com
۲. استاد، گروه سازه‌های آبی، دانشکده مهندسی آب و محیط زیست، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران. (* نویسنده مسئول) رایانامه: ghomeshi@scu.ac.ir
۳. دانشیار، گروه سازه‌های آبی، دانشکده مهندسی آب و محیط زیست، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران. رایانامه: M.Daryaee@scu.ac.ir
۴. استادیار، گروه سازه‌های آبی، دانشکده مهندسی آب و محیط زیست، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران. رایانامه: M.Zayri@scu.ac.ir

چکیده

در این پژوهش، ۱۸ آزمایش جهت بررسی اثر تنگ‌شدگی و بازشدگی ناگهانی، بر هیدرودینامیک پیشانی انجام شد. دبی جریان ۱/۱ لیتر بر ثانیه و متغیرها شامل غلظت‌های ۵ و ۱۰ گرم بر لیتر، شیب‌های صفر، ۱/۵ و ۳ درصد و نسبت‌های عرض ۰/۳۹، ۰/۶۴ و ۰/۹۲ بودند. رژیم جریان شامل هر سه حالت زیر بحرانی، بحرانی و فوق بحرانی بود. در تنگ‌شدگی با نسبت‌های ۰/۳۹ و ۰/۶۴، سرعت پیشانی ابتدا، به دلیل افزایش شار شناوری تا یک نقطه افزایش یافته و سپس تحت تأثیر اختلاط کاهش می‌یابد. افزایش شدت تنگ‌شدگی و شیب، سرعت پیشینه را بیشتر و محل وقوع آن را دورتر می‌کند؛ به نحویکه، در شیب ۳ درصد، سرعت پیشینه در نسبت ۰/۳۹ در مقایسه با نسبت ۰/۶۴، برای غلظت‌های ۵ و ۱۰ گرم بر لیتر به ترتیب ۲۰/۲۹ و ۲۴/۴۹ درصد افزایش یافت. در بازشدگی با دو نسبت مزبور، روند تغییرات سرعت با فاصله، به دلیل تشدید ناپایداری‌های تلاطمی کاهشی بود؛ که شدت آن برای نسبت ۰/۳۹ بیشتر بود. در نسبت ۰/۹۲، تنگ‌شدگی و بازشدگی تأثیر خاصی نداشته و تغییرات سرعت با فاصله، مشابه کانال با عرض ثابت، برای شیب صفر، نزولی و در کانال شیبدار، صعودی بود. تغییرات ارتفاع پیشانی با فاصله، در تنگ‌شدگی و بازشدگی، برای تمام نسبت‌ها، صعودی بود؛ که شدت آن برای نسبت کمتر، بیشتر بود. عملکرد تنگ‌شدگی به نفع نیروی رانش جریان است؛ که با افزایش شیب تقویت و با افزایش غلظت تضعیف می‌شود. در بازشدگی، مقاومت ناشی از اختلاط غلبه دارد؛ که با افزایش غلظت تقویت و با افزایش شیب تضعیف می‌گردد.

کلید واژه‌ها: بازشدگی ناگهانی، تنگ‌شدگی ناگهانی، مقاومت ناشی از اختلاط، ناپایداری‌های کلون-هلمهولتز، نیروی رانش

۱. مقدمه

یکی از مهم‌ترین پدیده‌هایی که مدیریت آن می‌تواند؛ نقشی مؤثر در استفاده بهینه از سدهای مخزنی داشته باشد؛ جریان غلیظ^۱ است (Ghomeshi et al., 2019). این پدیده، علاوه بر جریان‌های رسوبی ورودی به مخازن سدها، به شکل‌های دیگری مانند ورود پساب‌های کشاورزی، شهری و صنعتی به رودخانه‌ها و یا نشت مواد نفتی در دریاها نیز روی می‌دهد. لذا، بررسی هیدرولیک این جریان، از منظر مسائل زیست محیطی نیز ضروری است (Ahadiyan et al., 2016; Heidari et al., 2018). رایج‌ترین نوع جریان غلیظ، از نظر شکل حرکت، جریان زیرگذر^۲ می‌باشد؛ که هنگامی رخ می‌دهد؛ که سیال ورودی، به دلیل تفاوت در یکی از سه مشخصه دما، غلظت ذرات معلق و یا غلظت مواد محلول، دارای چگالی بیشتری نسبت به سیال پذیرنده باشد (Ghomeshi et al., 2019). همچنین، نیروی محرک یا رانش جریان غلیظ، شار شناوری^۳ است؛ که بر اساس رابطه‌ی زیر تعریف می‌شود (Ghomeshi, 1995; Ahadiyan and Musavi-Jahromi, 2009):

$$B = g'q \quad (1)$$

که در آن، q دبی واحد عرض جریان است. همچنین، g' شتاب ثقل شناوری مؤثر می‌باشد؛ که بر اساس رابطه ارائه شده توسط Kullenberg (1977) تعریف می‌شود:

$$g' = g \left(\frac{\rho_t - \rho_a}{\rho_a} \right) \quad (2)$$

در این رابطه، ρ_t چگالی سیال غلیظ، ρ_a چگالی سیال پیرامونی و g شتاب ثقل هستند.

جریان غلیظ از دو قسمت اصلی تشکیل شده است. قسمت اول، که یک جبهه به شدت متلاطم و حاوی جریان‌های گردابی است؛ پیشانی^۴ نامیده شده و شرایط جریان در آن به صورت غیردائمی می‌باشد. قسمت دوم موسوم به بدنه^۵ بوده و جریان در آن به صورت شبه دائمی است (Goleaje et al., 2014; Kooti and kashefipour, 2018). در ارتباط با جریان‌های گردابه‌ای موجود در پیشانی، که موسوم به ناپایداری‌های کلون-هلمهولتز^۶ (یا به اختصار K-H) هستند؛ باید عنوان نمود؛ که منشأ آن‌ها تنش برشی ناشی از اختلاف سرعت دو سیال غلیظ و پیرامونی است (Groenenberg et al., 2007; Wells et al, 2010). این ناپایداری‌ها، که به صورت ضعیف‌تر، در مرز بدنه جریان غلیظ و سیال پیرامونی نیز شکل می‌گیرند؛ عامل اختلاط دو سیال و ورود یا کشش^۷ سیال پیرامونی به درون پیشانی و بدنه جریان غلیظ هستند. شکل (۱) طرحی کلی از جریان غلیظ زیرگذر، اجزاء مختلف آن و پدیده‌های حاکم در آن را نشان می‌دهد.

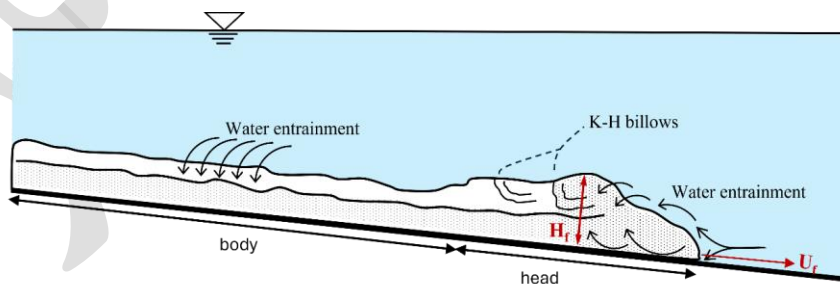


Figure 1. A sketch of a dense underflow, its components and the dominant phenomena

هیدرودینامیک جریان غلیظ، به شکل‌های مختلف، مورد توجه محققین بوده است. (Keulegan (1958), Simpson and Britter (1979), Britter and Linden (1980), Altinakar et al. (1990) و Ghomeshi (1995) را می‌توان از جمله تحقیقات پیشگام در تحلیل ساختار پیشانی جریان‌های غلیظ برشمرد. تحقیقاتی مانند Kim et al. (2002), (2009) and Ahadiyan and Musavi-Jahromi (2008), Sajadifar and Ahadiyan (2016), Heidari et al. (2018) و Nadian et al. (2024) جریان‌های غلیظ به صورت جت‌های مستغرق را موضوع کار خود قرار دادند. (Sajadifar and Ahadiyan (2016) نشان دادند؛ که ضریب انتشار جت غلیظ در آب پیرامونی عمیق، با افزایش غلظت افزایش می‌یابد. همچنین، در آب پیرامونی عمیق، زیاد شدن عدد فرود چگال تا مرز ۳۰، کاهش ضریب انتشار را به دنبال داشته و پس از آن، مقدار ضریب مزبور در حدود عدد ۰/۱ ثابت می‌ماند. (Nadian et al. (2024) در کار آزمایشگاهی خود و با بهره‌گیری از روش پردازش تصاویر، مسیر گسترش جریان جت غلیظ دایره‌ای شکل افقی در آب پیرامونی کم عمق را مورد مطالعه قرار دادند. بر اساس نتایج، زیاد شدن هر یک از عوامل مومتوم و ارتفاع سقوط جت، سبب طولانی‌تر شدن مسیر گسترش جت می‌گردد. همچنین، الگوی توسعه مرزهای بیرونی جت بر روی بستر، بیضوی شکل تعیین شد. جهت تعیین مرز میان جریان غلیظ و آب پیرامونی، (Arjmandi et al. (2012) تلاش نمودند؛ تا عملکرد مدل عددی RNG را در تخمین ارتفاع غوطه‌وری ارزیابی کنند. مشخص شد؛ که هر چه اختلاف فشار در جریان متلاطم دو فازی بیشتر باشد؛ عملکرد مدل مزبور بهتر خواهد بود. مهم‌ترین عامل شیب تشخیص داده شد. کمترین اختلاف میان داده‌های آزمایشگاهی و محاسباتی مربوط به بیشترین شیب (۱۶ درصد) بود. (Goleij et al. (2014) نشان دادند؛ که مدل عددی $k-\epsilon$ از نوع RNG نسبت به نوع استاندارد آن، عملکرد بهتری در برآورد ارتفاع غوطه‌وری دارد. (Mansouri Hafshejani et al. (2016) آزمایشاتی را با سیال پیرامونی متحرک همسو و غیر همسو با جریان غلیظ نمکی انجام دادند. نتایج نشان داد؛ که با افزایش دبی سیال پیرامونی و نیز دبی و غلظت جریان غلیظ، سرعت پیشانی افزایش و ارتفاع آن کاهش می‌یابد. همچنین مشخص شد؛ که سرعت پیشانی همواره از سرعت سیال پیرامونی بیشتر است. (Kazemi Arpanahi et al. (2017) با بررسی عملکرد شش مدل عددی تلاطمی در برآورد سرعت پیشانی، مدل تلاطمی ادی و جریان آرام را دقیق‌تر از سایر موارد تشخیص دادند. تحقیقاتی مانند (Varjavand et al. (2015), (2016) Khalili Naftchali et al. (2017), Asghari Pari et al. (2020) و Baghalian and Godsian (2021) و Mansoujian et al. (2021) به بررسی اثر زبری کف و موانع بر روی هیدرودینامیک پیشانی جریان غلیظ پرداختند؛ که نتایج حاکی از اثر قابل توجه عوامل مزبور در کنترل جبهه جریان بود. یکی از عوامل تأثیرگذار بر هیدرودینامیک جریان غلیظ، تغییر ناگهانی یا تدریجی در عرض مقطع کانال است؛ که در طول مسیر رودخانه، به عنوان کانالی طبیعی و نیز در مواردی مانند ورود جریان رسوبی رودخانه به درون مخزن سد رخ می‌دهد (Fathi-Moghadam et al., 2008). (Fathi-Moghadam et al. (2008) اثر زاویه بازشدگی تدریجی را بر سرعت پیشانی جریان غلیظ نمکی مورد ارزیابی قرار دادند. نتایج حاکی از افزایش سرعت پیشانی به واسطه افزایش زاویه بازشدگی بود. همچنین، (Akbarizadeh et al. (2020) در کار خود روش ایجاد تغییر عرض کانال در ابتدای مخزن سد را با هدف کنترل جریان رسوبی بررسی نمودند. مشاهده شد؛ که این راهکار سبب افزایش قابل توجه سرعت پیشانی و در نتیجه کاهش میزان ته‌نشست رسوبات در مسیر جریان می‌شود. عملکرد کانال همگرای تدریجی نسبت به کانال موازی ضعیف‌تر تشخیص داده شد.

مروری بر منابع نشان می‌دهد؛ که تاکنون تحقیقات بسیار محدودی در زمینه اثر تغییر عرض کانال بر روی رفتار جریان غلیظ انجام شده است. با توجه به اهمیت این موضوع در درک بهتر رفتار جریان غلیظ، در تحقیق حاضر تلاش شد؛ تا به واسطه یک کار آزمایشگاهی تأثیر تغییر ناگهانی عرض به صورت تنگ‌شدگی و بازشدگی در مسیر جریان غلیظ نمکی، بر روی هیدرودینامیک جبهه جریان و پارامترهای مرتبط با آن مورد بررسی قرار گیرد.

۲. مواد و روش‌ها

۱.۲. نحوه انجام آزمایشات

آزمایشات این تحقیق در یک فلوم با قابلیت تنظیم شیب کف تا ۴ درصد و با طول ۱۲ متر، ارتفاع ۷۸ سانتی‌متر و عرض ۳۹ سانتی‌متر، واقع در آزمایشگاه مدل‌های هیدرولیکی دانشکده مهندسی آب و محیط زیست دانشگاه شهید چمران اهواز انجام شد. کانال با استفاده از یک دریچه کشویی به دو قسمت تقسیم شده بود. قسمت بالادست دریچه به عنوان مخزن سیال غلیظ عمل کرده و بخش دیگر به طول ۱۰/۸ متر از آب پیرامونی پر می‌شد. همچنین سرریزی با هدف تنظیم سطح آب، در انتهای کانال قرار داشت. جهت تهیه سیال غلیظ نمکی از یک مخزن با ظرفیت ۲۰۰۰ لیتر و مجهز به هم‌زن پروانه‌ای استفاده شد. به منظور قابل مشاهده شدن سیال غلیظ، ماده رنگی پرمگنات پتاسیم که تأثیر قابل توجهی در چگالی آن نداشت؛ اضافه گردید. بعد از تهیه سیال غلیظ، این سیال به واسطه سیستم پمپاژ و لوله‌کشی به یک مخزن تأمین هد، واقع در ارتفاع ۳ متری از سطح زمین هدایت می‌شد. همچنین، دبی ورودی سیال غلیظ به درون ناحیه بالادست دریچه در کانال، به کمک یک دبی سنج الکترومغناطیسی از نوع Megab 3000 و با دقت یک هزارم لیتر در ثانیه تنظیم گردید. ارتفاع آب پیرامونی در حالت بستر افقی در تمام طول کانال ۴۰ سانتیمتر و در وضعیت شیب‌دار در بالادست کانال ۴۰ سانتی‌متر و در پایین‌دست آن بسته به میزان شیب متفاوت بود. جهت ایجاد تغییر عرض ناگهانی در مسیر جریان از دو صفحه شیشه‌ای به طول ۲ متر، ارتفاع ۲۵ سانتی‌متر و ضخامت ۴ میلی‌متر استفاده شد. این صفحات در فاصله ۳/۶۲ متری نسبت به دریچه بالادست و با استفاده از تکیه‌گاه به دیواره کانال در دو طرف وصل شدند. به این ترتیب تنگ شدن ناگهانی در فاصله ۳/۶۲ متری و بازشدگی ناگهانی در فاصله ۵/۶۲ متری از دریچه بالادست ایجاد شد. ارتفاع صفحات با انجام یک سری آزمایشات مقدماتی و به گونه‌ای انتخاب شد؛ که همواره از ارتفاع پیشانی و بدنه جریان بیشتر باشد؛ به نحوی که تمام جریان از میان آن‌ها عبور کرده و هیچ بخشی از جریان قادر به گذشتن از روی صفحات و رفتن به پشت آن‌ها نباشد. شکل‌های (۲) و (۳) به ترتیب طرحی کلی از فلوم به همراه تجهیزات آزمایشگاهی مورد استفاده و صفحات نصب شده در کانال را نشان می‌دهند.

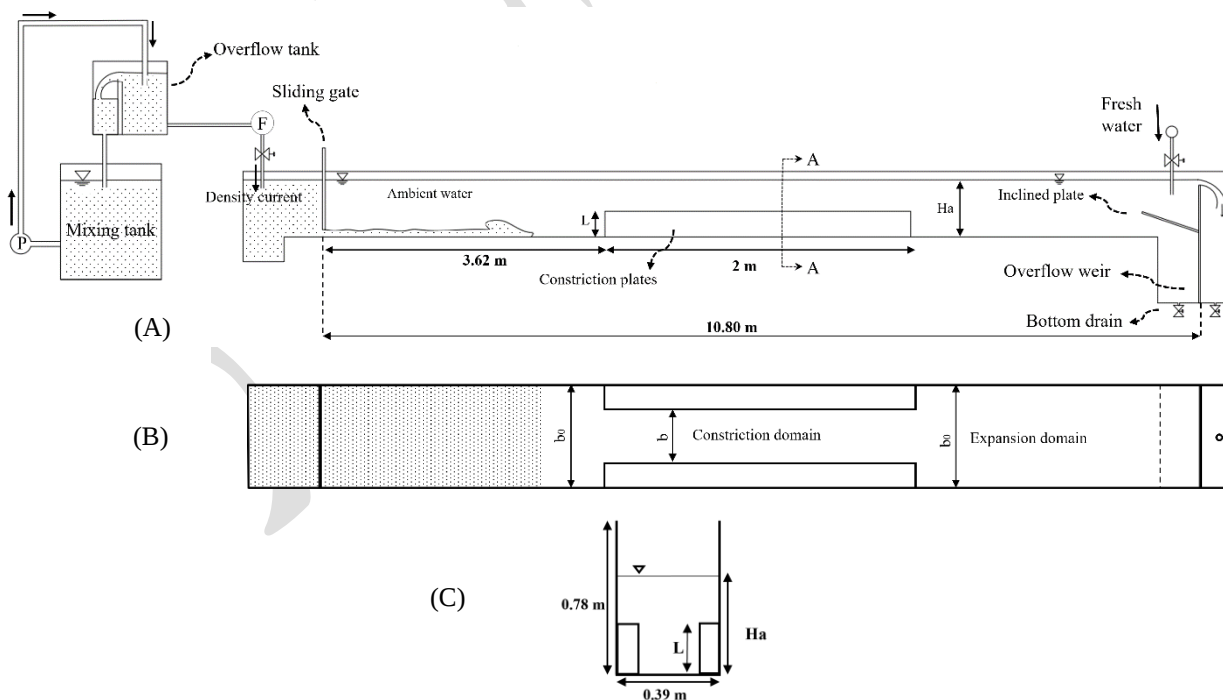


Figure 2. Schematic view of the flume and laboratory equipment, A) Side view, B) Top view, C) Cross section A-A



Figure 3. Glass plates installed in the channel

نحوه انجام آزمایشات بدین صورت بود؛ که پس از پر کردن کانال در پایین دست دریچه کشویی از آب زلال و ناحیه پشت دریچه از سیال غلیظ، هنگامی که سطح دو سیال برابر می‌شد؛ دریچه به صورت ناگهانی و به اندازه ۱۰ سانتی متر باز شده و با ورود سیال غلیظ به درون آب پیرامونی، جریان غلیظ به صورت زیرگذر شکل می‌گرفت. سرعت پیشانی جریان در طول مسیر با استفاده از روش فیلمبرداری و سنجش زمان طی شده در فواصل مورد نظر و در سه محدوده قبل از صفحات، تنگ‌شدگی و بازشدگی بدست آمد. همچنین ارتفاع پیشانی به کمک شاخص‌های نصب شده در بدنه فلوم قرائت گردید. با رسیدن جریان غلیظ به انتهای کانال، جریان با استفاده از شیر تعبیه شده در کف به بیرون هدایت می‌شد. سپس شیر تنظیم سیال غلیظ بسته و فلوم جهت انجام آزمایش بعدی تخلیه و تمیز می‌شد. در مجموع ۱۸ آزمایش انجام شد. متغیرها شامل دو غلظت ورودی (C₀) ۵ و ۱۰ گرم در لیتر، سه شیب (S) صفر، ۱/۵ و ۳ درصد و سه فاصله صفحات ۱۵، ۲۵ و ۳۶ سانتی متر لحاظ گردید. همچنین، دبی ورودی در تمام آزمایشات ثابت و برابر با ۱/۱ لیتر بر ثانیه بود.

۲.۲. تحلیل ابعادی

پارامترهای هندسی، کینماتیکی و دینامیکی مطرح در این تحقیق را می‌توان مطابق با رابطه زیر در نظر گرفت:

$$\Psi (U_f, H_f, b, b_0, H_a, L, S, g' \cos \theta, v) = 0 \quad (3)$$

U_f سرعت پیشانی، H_f ارتفاع پیشانی، v لزوجت کینماتیکی جریان غلیظ و θ زاویه شیب بستر کانال می‌باشند. همچنین، مطابق با شکل (۲)، b فاصله بین صفحات، b_0 عرض اولیه کانال، L ارتفاع صفحات و H_a ارتفاع آب پیرامونی می‌باشند. چنانچه U_f و H_f ، به عنوان متغیرهای تکراری لحاظ شوند؛ با استفاده از روش باکینگهام، مشخصه‌های بدون بعد مطابق با رابطه (۴) بدست می‌آیند:

$$\Psi_1 \left(\frac{b}{b_0}, \frac{U_f}{\sqrt{H_f g' \cos \theta}}, \frac{U_f H_f}{v}, \frac{L}{H_a}, S \right) = 0 \quad (4)$$

همان طور که در بخش ۱.۲ عنوان گردید؛ ارتفاع صفحات ثابت بوده و مقدار آن‌ها در این تحقیق به نحوی انتخاب شد؛ که همواره از ارتفاع پیشانی و بدنه جریان بیشتر بوده و تمام جریان از میان آن‌ها عبور کند. از طرفی اثر ارتفاع آب پیرامونی، در اثر شیب بستر لحاظ شده است. لذا می‌توان از مشخصه L/H_a صرف نظر نمود. همچنین مشخصه‌های $U_f H_f / v$ و $U_f / \sqrt{H_f g' \cos \theta}$ ، به ترتیب اعداد رینولدز و فرود پیشانی می‌باشند. در این تحقیق آزمایشگاهی، عدد رینولدز پیشانی در محدوده ۷۱۱۸/۸۱ تا ۲۱۳۵۷/۶ قرار دارد. لذا وضعیت جریان در پیشانی به صورت آشفته است. (Altinakar et al. (1990 عنوان می‌دارند؛ که چنانچه عدد رینولدز پیشانی بیشتر از ۲۰۰۰ باشد؛ اثر آن در هیدرودینامیک پیشانی قابل چشم‌پوشی است. همچنین، در این پژوهش، محدوده عدد فرود پیشانی هنگام ورود به هر یک از نواحی تنگ‌شدگی و بازشدگی ناگهانی، به ترتیب بین ۰/۷۳ تا ۱/۱۶ و ۰/۶۹ تا ۱/۴۱ قرار داشته و بر این اساس، نتایج بدست آمده در ارتباط با

هیدرودینامیک پیشانی شامل هر سه جریان زیربحرانی، بحرانی و فوق بحرانی می‌باشد. نکته دیگر آن که، بر اساس رابطه عدد فرود پیشانی، اثر سرعت پیشانی و ارتفاع آن بر جبهه‌ی جریان، مخالف یکدیگر است (Altinakar et al., 1990)؛ که در این مورد در بخش ۴.۳ بیشتر صحبت خواهد شد. بدین ترتیب، مشخصه‌های بدون بعد مؤثر را می‌توان به صورت رابطه (۵) لحاظ نمود:

$$\Psi_2 \left(\frac{b}{b_0}, \frac{U_f}{\sqrt{H_f g' \cos \theta}}, S \right) = 0 \quad (5)$$

در صورتی که هدف استخراج معادله‌ای جهت تخمین سرعت پیشانی باشد؛ می‌توان رابطه فوق را به صورت زیر نوشت:

$$U_f = \Psi_3 \left(\frac{b}{b_0}, S \right) \sqrt{H_f g' \cos \theta} \quad (6)$$

لازم به ذکر است؛ که در این تحقیق، مشخصه b/b_0 ، نسبت عرض (W_R) نامیده شده و با توجه به فواصل انتخابی صفحات (۱۵، ۲۵ و ۳۶ سانتی‌متر) و مقدار عرض اولیه کانال (۳۹ سانتی‌متر) شامل سه مقدار ۰/۳۹، ۰/۶۴ و ۰/۹۲ می‌باشد. هر چه نسبت مزبور کوچک‌تر باشد؛ شدت تنگ‌شدگی و بازشدگی ناگهانی بیشتر است. در ادامه، نتایج پژوهش بر اساس این سه نسبت عرض ارائه می‌گردد.

۳. نتایج و بحث

۱.۳. هیدرودینامیک جبهه جریان

با ورود جریان غلیظ و حرکت آن در زیر توده آب پیرامونی، جبهه جریان ضمن پیشروی، توسعه یافته و در نهایت به یک وضعیت نسبتاً متعادل می‌رسید. لازم به ذکر است؛ که در ابتدا، تحت تأثیر مومنتوم بالای جریان ورودی، ارتفاع پیشانی نسبت به بدنه به شکل قابل توجهی بیشتر بود؛ اما با رسیدن جریان به وضعیت تعادلی، ارتفاع پیشانی پایدار شده و بدنه نیز با ارتفاعی نزدیک‌تر به ارتفاع پیشانی شکل می‌گرفت. بر اساس مشاهدات؛ وضعیت تعادلی مزبور به ازای تمام شرایط، حداکثر تا فاصله ۱/۵ متر از دریچه بالادست حاصل می‌شد. در دو نسبت ۰/۳۹ و ۰/۶۴، با رسیدن جریان به تنگ‌شدگی ناگهانی، بخشی از جریان وارد ناحیه مزبور شده و بخشی دیگر با تکیه‌گاه‌های کناری صفحات برخورد کرده و به واسطه تبدیل انرژی جنبشی به انرژی پتانسیل به طرف بالا حرکت کرده و توده‌ای از سیال غلیظ را شکل می‌داد؛ که حجم و ارتفاع آن بسته به شرایط جریان و نسبت عرض متفاوت بود. در ادامه، توده مزبور به دو قسمت تقسیم می‌شد. بخشی از آن از بالا وارد محدوده تنگ‌شدگی شده و بخشی دیگر نیز به صورت یک جریان برگشتی، به بدنه جریان در ناحیه قبل از تنگ‌شدگی اضافه می‌شد. این توده و الگوی جریان ناشی از آن، در تنگ‌شدگی با نسبت ۰/۹۲ مشاهده نشد. در واقع، در این حالت، اثر تغییر عرض آنقدر ناچیز بود؛ که جبهه جریان بدون هیچگونه تغییر خاصی وارد ناحیه تنگ‌شدگی می‌شد. شکل (۴) نمونه‌ای از وضعیت جریان غلیظ و الگوهای جریان شکل گرفته را در هنگام ورود به تنگ‌شدگی ناگهانی با نسبت‌های ۰/۹۲ و ۰/۳۹ نشان می‌دهد.

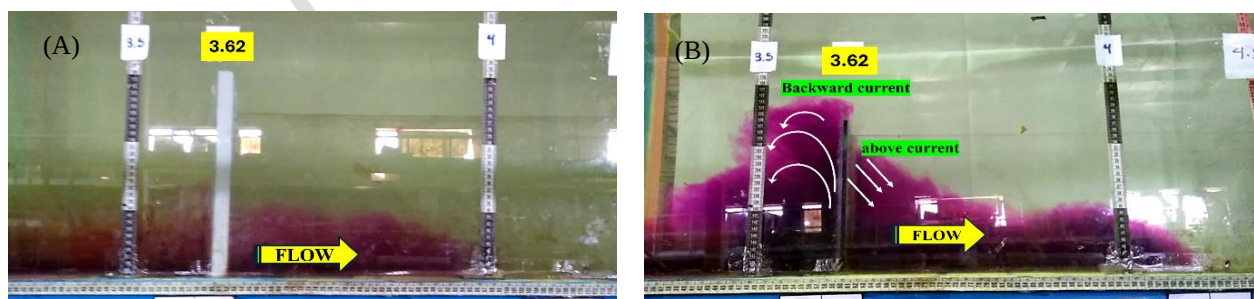


Figure 4. Flow entering the sudden constriction, A) $W_R=0.92$, B) $W_R=0.39$

با رسیدن جریان به بازشدگی ناگهانی، ضمن وقوع پدیده جدا شدگی^۵ در خطوط جریان و شکل‌گیری گردابه‌های افقی ناشی از آن (شکل ۵)، ارتفاع پیشانی، تحت تأثیر افزایش عرض، ناگهان دچار افت می‌شود. بعد از وقوع این افت ناگهانی و در ادامه پیشروی جریان به طرف پایین‌دست، ارتفاع پیشانی به سرعت افزایش یافته؛ که این امر توأم با تشکیل یک خیزاب بزرگ K-H^۹ در پیشانی بود. با ادامه حرکت پیشانی، این خیزاب به عقب حرکت کرده و در نهایت شکسته شده و پیشانی به یک وضعیت تعادلی می‌رسید. محل وقوع این وضعیت تعادلی بسته به نسبت عرض و شرایط آزمایش متفاوت بود؛ اما بر اساس مشاهدات، حداکثر تا فاصله ۷ متر از دریچه بالادست رخ می‌داد. همچنین، شدت جداشدگی خطوط جریان و گردابه‌های افقی ناشی از آن و نیز خیزاب K-H تشکیل شده در پیشانی، برای بازشدگی با نسبت ۰/۳۹ بیشتر از دو نسبت دیگر بود. شکل (۶) نمونه‌ای از شکل‌گیری الگوی جریان در بازشدگی ناگهانی با نسبت ۰/۳۹ را نشان می‌دهد.

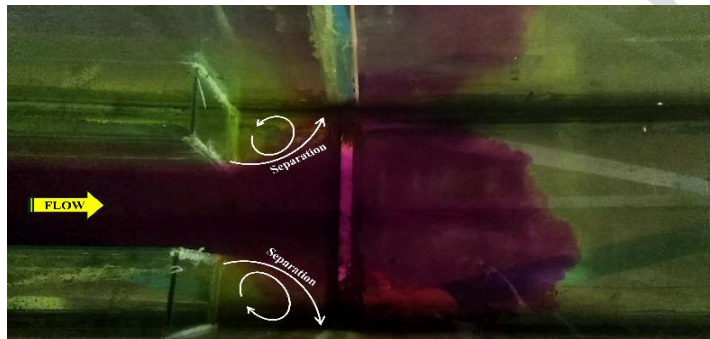
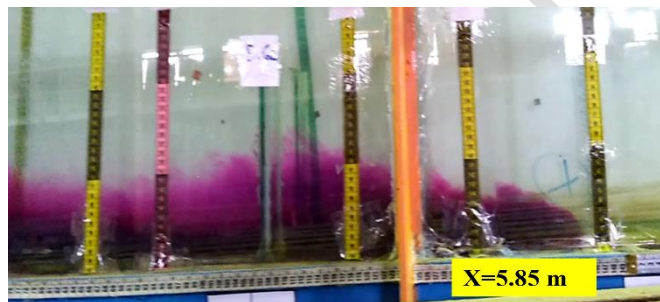
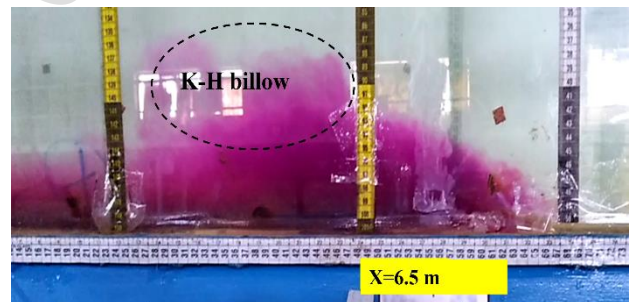


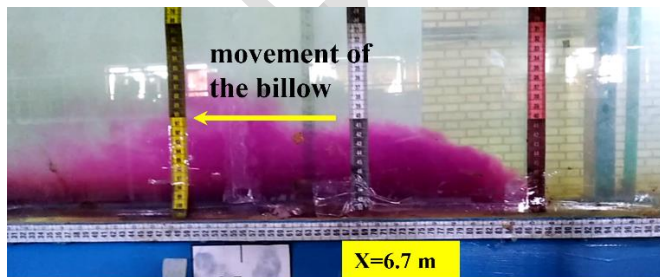
Figure 5. Separation of the flow in the sudden expansion for $W_R=0.39$



(A)



(B)



(C)

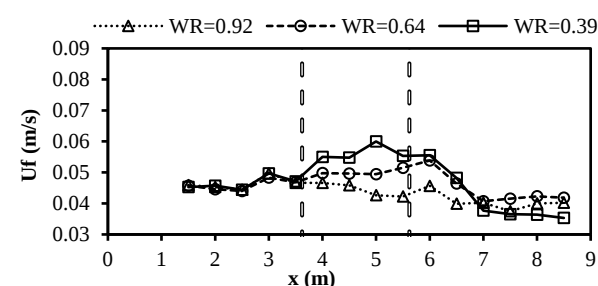


(D)

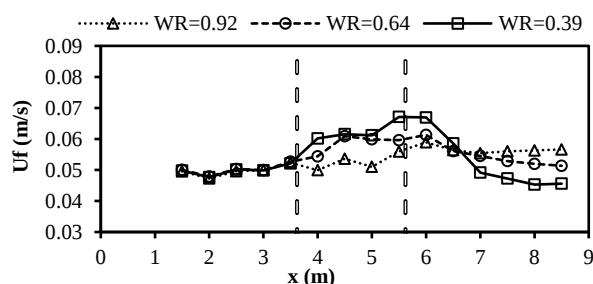
Figure 6. Flow pattern downstream of the sudden expansion, A) Entering the sudden expansion, B) Development of the K-H billow in the flow front, C) The beginning of breaking the billow and D) Stabilization of the flow front

۲.۳. سرعت پیشانی

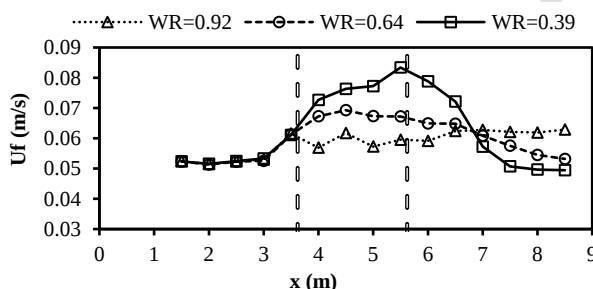
به منظور بررسی روند تغییرات سرعت پیشانی جریان (U_f) در طول کانال، به ازای شیب‌های مختلف و در سه محدوده قبل از تنگ‌شدگی، محدوده تنگ‌شدگی و محدوده بازشدگی، نمودارهای شکل‌های (۷) و (۸)، به ترتیب برای دو غلظت ورودی ۵ و ۱۰ گرم در لیتر استخراج گردید.



(A)

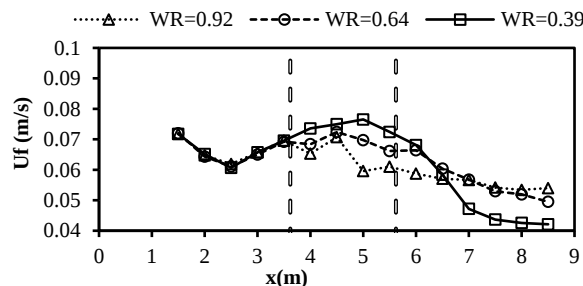


(B)

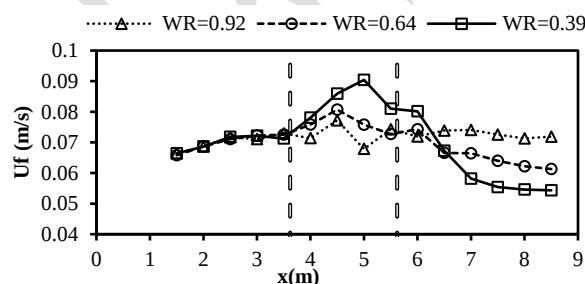


(C)

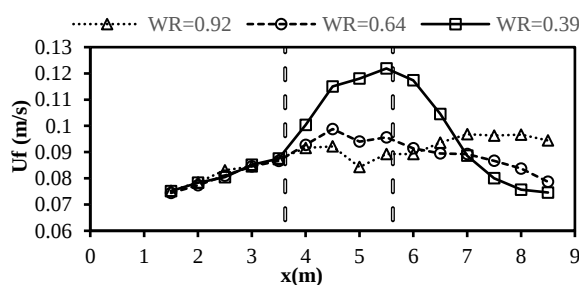
Figure 7. Changes of the front speed along the channel for $Q_0=1.1$ l/s and $C_0=5$ gr/l; A) $S=0\%$, B) $S=1.5\%$ and C) $S=3\%$



(A)



(B)



(C)

Figure 8. Changes of the front speed along the channel for $Q_0=1.1$ l/s and $C_0=10$ gr/l; A) $S=0\%$, B) $S=1.5\%$ and C) $S=3\%$

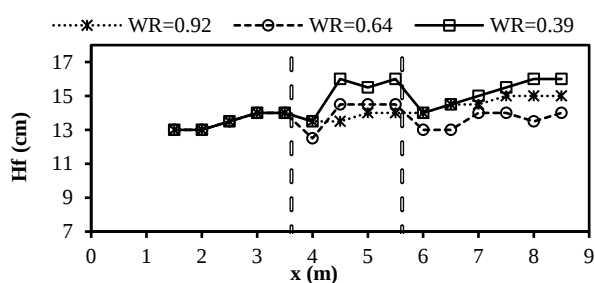
در این نمودارها، محورهای افقی و قائم به ترتیب بیان‌گر فاصله از دریچه بالادست و سرعت پیشانی هستند. همچنین، خط‌چین‌های قائم محل مقاطع تنگ‌شدگی و بازشدگی ناگهانی را نشان می‌دهند؛ که به ترتیب برابر با $3/62$ و $5/62$ متر از دریچه بالادست می‌باشند. سرعت جبهه جریان در بازه $1/5$ تا $8/5$ متر از دریچه بالادست و در فواصل نیم متری برداشت شد. بر اساس نتایج، در وضعیت کانال افقی (نمودارهای A از شکل‌های ۷ و ۸) و برای نسبت عرض $0/92$ ، به ازای هر دو غلظت ورودی، سرعت پیشانی از یک روند پیوسته نزولی، در کل کانال تبعیت می‌کند. البته این روند توأم با نوساناتی است؛ که می‌توان آن‌ها را ناشی از حرکت تناوبی برآمدگی‌های^{۱۰} ایجاد شده در جبهه جریان به واسطه ناپایداری‌های انتقالی^{۱۱} دانست (Altınakar et al., 1990). این روند نزولی، با نتایج مشاهده شده توسط Britter and Lindon

(1980)، (Altinakar et al. (1990)، Ghomeshi et al. (1995) و Mansoujjan et al. (2021) برای کانال با عرض ثابت و شیب صفر یا کمتر از ۰/۰۰۸۷ همخوانی دارد. بر اساس نظر Britter and Lindon (1980) در کانال با شیب کمتر از ۰/۰۰۸۷، همزمان با حرکت پیشانی به سمت پایین‌دست، ورود آب پیرامونی به درون پیشانی افزایش یافته و این امر سبب تضعیف نیروی رانش جریان و در نتیجه غلبه اصطکاک بستر بر آن می‌شود. در اینجا لازم به ذکر است؛ که همان طور که پیش‌تر در بخش ۱.۳ عنوان شد؛ در نسبت عرض ۰/۹۲، تغییر عرض کانال به قدری کم است؛ که عملاً اثری بر روی الگوی جریان نمی‌گذارد. لذا روند حاکم بر تغییرات U_f با فاصله راه، در این حالت، می‌توان مشابه کانال با عرض ثابت دانست. همچنین، در کانال با شیب صفر و دو نسبت عرض ۰/۳۹ و ۰/۶۴، روند تغییرات پیشانی با فاصله، در محدوده قبل از تنگ‌شدگی مشابه با نسبت ۰/۹۲ می‌باشد؛ اما با ورود پیشانی به ناحیه تنگ‌شدگی، سرعت آن، ابتدا تا یک نقطه مشخص از کانال، زیاد شده و سپس از یک روند کاهشی تبعیت می‌کند. با پیشروی جریان در محدوده بازشدگی ناگهانی، روند کاهشی سرعت پیشانی ادامه داشته و در نهایت در نقاط انتهایی ناحیه بازشدگی، مقدار سرعت تقریباً ثابت می‌شود. مطابق با نمودارهای B و C از شکل‌های (۷) و (۸)، در کانال شیب‌دار با نسبت عرض ۰/۹۲، روند تغییرات سرعت پیشانی با فاصله، به طور پیوسته و در تمام محدوده‌های کانال، به صورت صعودی است. این روند با نتایج بدست آمده توسط Altinakar et al. (1990)، kooti (2010)، Baghalian و Asghari Pari et al. (2017) and Godsian (2022) موافقت دارد. در مورد دلیل این روند افزایشی، می‌توان به دو نکته اشاره کرد. اول آن که، بر اساس نظر Britter and Lindon (1980)، در کانال با شیب بیشتر از ۰/۰۰۸۷ درصد، اثر مؤلفه مماسی وزن سیال و در نتیجه شار شناوری به اندازه کافی بزرگ است؛ که بتواند بر اصطکاک بستر غلبه کند. از طرف دیگر، هنگام حرکت سیال غلیظ و براساس اصل پیوستگی، جریان‌هایی چرخشی در آب پیرامونی شکل می‌گیرند؛ که به طور کلی دارای اثری کاهنده در سرعت جبهه جریان می‌باشند (Ghomeshi, 1995). در یک کانال شیب‌دار با پیشروی جریان و افزایش عمق آب پیرامونی، اثر کاهنده مزبور تضعیف و حذف می‌شود. در صورتی که، این پدیده بر اثر کاهنده‌ی رقیق‌شدگی ناشی از اختلاط در پیشانی غلبه نماید؛ می‌تواند سبب افزایش سرعت پیشانی شود. همچنین، بر اساس نتایج، روند حاکم بر تغییرات سرعت پیشانی با فاصله، در کانال شیب‌دار با دو نسبت عرض ۰/۳۹ و ۰/۶۴، مشابه روند مشاهده شده؛ در کانال افقی با نسبت‌های عرض مزبور است. در ارتباط با روند صعودی سرعت پیشانی، در ناحیه تنگ‌شدگی با دو نسبت عرض ۰/۳۹ و ۰/۶۴، همان طور که در شکل‌های (۷) و (۸) مشاهده می‌شود؛ در اکثر موارد، مقدار سرعت بیشینه در تنگ‌شدگی با نسبت ۰/۳۹، در مقایسه با نسبت ۰/۶۴ بیشتر می‌باشد. این امر بخصوص در ارتباط با شیب ۳ درصد مشهود است؛ به نحوی که مقادیر سرعت بیشینه پیشانی در تنگ‌شدگی با نسبت ۰/۳۹، در کانال با شیب ۳ درصد و به ازای غلظت‌های ۵ و ۱۰ گرم در لیتر، به ترتیب ۲۰/۲۹ و ۲۴/۴۹ درصد بیشتر از موارد نظیر در نسبت عرض ۰/۶۴ می‌باشد؛ در حالیکه که در کانال با شیب صفر درصد، اعداد مزبور به ترتیب ۲/۷ و ۷/۲۷ درصد برآورد شده‌اند. همچنین، نقطه وقوع سرعت بیشینه برای نسبت ۰/۳۹ دیرتر رخ داده؛ به طوری که در برخی موارد و به ویژه در شیب ۳ درصد، نقطه مزبور در انتهای محدوده تنگ‌شدگی حاصل و روند صعودی تا انتهای تنگ‌شدگی حفظ شده است (نمودار C از شکل‌های ۷ و ۸). دلیل این مشاهدات را می‌توان ناشی از اثر کاهش عرض و افزایش شیب در بالا بردن شار شناوری به عنوان نیروی محرک جبهه جریان دانست. مطابق با رابطه (۱) هرچه عرض کانال کوچک‌تر باشد؛ دبی واحد عرض جریان بزرگ‌تر و در نتیجه شار شناوری بیشتر است. همچنین، شیب بیشتر نیز، به واسطه مؤلفه مماسی وزن سیال، افزایش گرادیان فشار ناشی از اختلاف چگالی دو سیال و در نتیجه افزایش شار شناوری را به دنبال دارد (Ohey, 2003). بعلاوه، همان طور که در همین بخش بیان شد؛ در کانال شیب‌دار، افزایش ارتفاع آب پیرامونی در طول مسیر جریان و در نتیجه، تضعیف جریان‌های چرخشی موجود در آب پیرامونی، در روند افزایشی سرعت پیشانی مؤثر است. کاهشی شدن روند تغییرات سرعت پیشانی با فاصله، بعد از حصول سرعت بیشینه پیشانی در تنگ‌شدگی با نسبت‌های ۰/۳۹ و ۰/۶۴ و ادامه روند مزبور در بازشدگی نیز به اثر افزایش اختلاط و ورود

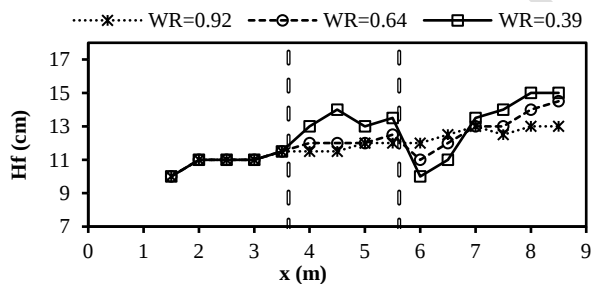
آب پیرامونی به پیشانی و غلبه آن بر شار شناوری جریان برمی گردد؛ که در بخش ۴.۳ بیشتر در مورد آن صحبت خواهد شد. همچنین، Fathi-Moghadam et al., (2008) روند تغییرات سرعت پیشانی با فاصله را در بازشدگی تدریجی به صورت صعودی دیده اند؛ که این مخالف با مشاهدات تحقیق حاضر است. دلیل این امر را می توان در متفاوت بودن الگوی جریان در بازشدگی ناگهانی و شدیدتر بودن ناپایداری های تلاطمی (و اختلاط) در آن، نسبت به نوع تدریجی دانست.

۳.۳ ارتفاع پیشانی

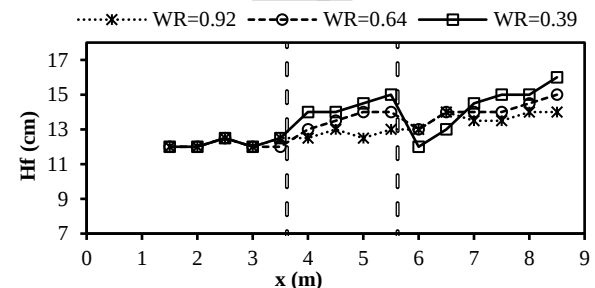
روند تغییرات ارتفاع پیشانی جریان در طول کانال برای دو غلظت ۵ و ۱۰ گرم در لیتر به ترتیب در شکل های ۹ (A تا C) و ۱۰ (A تا C) ارائه شده است. منظور از ارتفاع پیشانی، ارتفاع بلندترین نقطه جبهه جریان می باشد (شکل ۱).



(A)

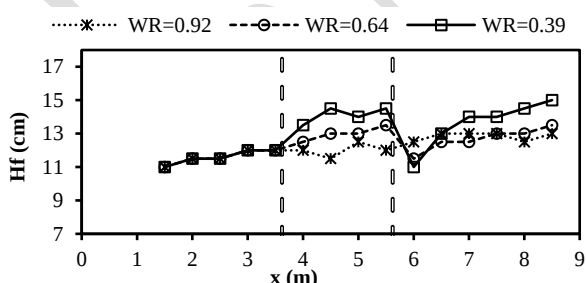


(B)

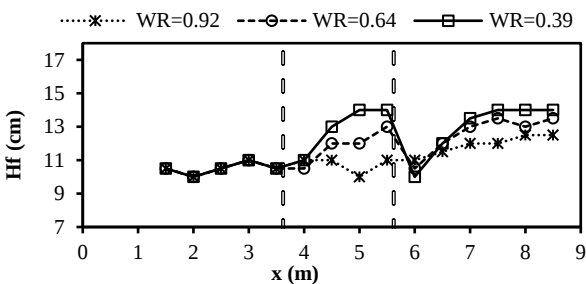


(C)

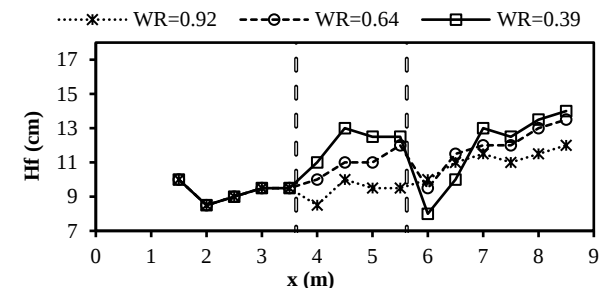
Figure 9. Changes of the front height along the channel for $Q_0=1.1$ l/s and $C_0=5$ gr/l; A) $S=0\%$, B) $S=1.5\%$ and C) $S=3\%$



(A)



(B)



(C)

Figure 10. Changes of the front height along the channel for $Q_0=1.1$ l/s and $C_0=10$ gr/l; A) $S=0\%$, B) $S=1.5\%$ and C) $S=3\%$

بر اساس نتایج، به طور کلی، روند حاکم بر تغییرات ارتفاع پیشانی با فاصله، برای هر سه نسبت عرض، و در تمام محدوده‌ها، یک روند صعودی است؛ که این امر به افزایش اختلاط در پیشانی با پیشروی جریان برمی‌گردد. هر چه نسبت عرض کوچک‌تر و شدت تنگ‌شدگی و بازشدگی بیشتر باشد؛ روند صعودی مزبور شدیدتر است. البته همان‌طور که در نمودارها مشهود است و در بخش ۱.۳ نیز توضیح داده شد؛ در هر دو نسبت عرض ۰/۳۹ و ۰/۶۴، هنگام ورود جریان به بازشدگی ناگهانی، ارتفاع پیشانی، ابتدا دچار افت ناگهانی شده؛ اما در ادامه، و با پیشروی جریان، شروع به افزایش می‌کند؛ به نحوی که میزان آن در نقاط انتهایی محدوده بازشدگی، نسبت به مقادیر نظیر در نسبت ۰/۹۲، که در آن ارتفاع پیشانی (بعد از باز شدگی) بدون افت است؛ بیشتر می‌شود؛ که در این مورد در بخش بعدی بیشتر صحبت خواهد شد.

۴.۳. اندرکنش میان نیروهای مؤثر در جبهه جریان

همان‌طور که در بخش ۲.۲ بیان شد؛ اثر سرعت و ارتفاع پیشانی بر هیدرودینامیک جبهه جریان مخالف یکدیگر است. بر اساس نظر Altinakar et al. (1990) سرعت پیشانی را می‌توان به عنوان نماینده نیروی محرک جبهه جریان و مقدار ارتفاع پیشانی را نشان‌دهنده شدت اختلاط سیال غلیظ و آب پیرامونی، به عنوان عاملی مؤثر در ایجاد مقاومت در مقابل پیشروی جریان تلقی نمود. لازم به ذکر است؛ که پدیده اختلاط از دو طریق سبب تضعیف نیروی محرک جریان می‌شود. یکی از طریق رقیق شدن و کاهش غلظت پیشانی و در نتیجه تقویت اثر نیروی اصطکاک بستر و دومی از راه انتقال مومنتوم از پیشانی به آب پیرامونی کشیده شده؛ که این امر توأم با ایجاد نیروی مقاوم به نام نیروی کشش اختلاط^{۱۲} است (Britter and lindon, 1980; Gray, 2006). بدین ترتیب، جهت بررسی دقیق‌تر اثر تغییر ناگهانی عرض کانال بر پارامترهای جبهه جریان و اندرکنش میان نیروی‌های محرک و مقاوم، درصد تغییرات مقادیر متوسط سرعت و ارتفاع پیشانی در نواحی تنگ‌شدگی (ΔU_{fave_C} , ΔH_{fave_C}) و بازشدگی ناگهانی (ΔU_{fave_E} , ΔH_{fave_E}) نسبت به محدوده قبل از صفحات محاسبه و در جدول (۱) ارائه شده است. متوسط سرعت و ارتفاع پیشانی در بازشدگی ناگهانی با استفاده از مقادیر آن‌ها در بازه ۷ تا ۸/۵ متر از دریچه بالادست محاسبه گردید؛ زیرا پیشانی در این بازه به یک وضعیت پایدار و تعادلی می‌رسید (بخش ۱.۳).

Table 1. The percentage of changes in the average values of front speed and height in different domains

W_R	C_0 (gr/l)	S (%)	ΔU_{fave_C} (%)	ΔH_{fave_C} (%)	ΔU_{fave_E} (%)	ΔH_{fave_E} (%)
0.39	5	0	+21.18	+14.02	-21.46	+16.82
0.64	5	0	+9.14	+4.67	-9.36	+3.74
0.92	5	0	-4.43	+2.80	-14.88	+11.22
0.39	5	1.5	+25.18	+18.56	-6.21	+24.74
0.64	5	1.5	+18.03	+12.37	+5.00	+18.56
0.92	5	1.5	+5.81	+5.16	+12.77	+13.40
0.39	5	3	+42.91	+24.42	-4.43	+34.88
0.64	5	3	+24.55	+12.79	+4.77	+25.58
0.92	5	3	+8.67	+9.30	+15.24	+17.83
0.39	10	0	+11.71	+22.83	-34.08	+25.00
0.64	10	0	+4.29	+13.04	-20.42	+13.04
0.92	10	0	-3.86	+4.35	-18.24	+11.96
0.39	10	1.5	+19.72	+23.81	-20.60	+29.76
0.64	10	1.5	+8.85	+13.10	-9.40	+26.19
0.92	10	1.5	+3.62	+2.38	+3.29	+12.70
0.39	10	3	+39.97	+32.43	-5.95	+43.24
0.64	10	3	+17.92	+18.92	+3.21	+36.49
0.92	10	3	+9.32	+1.35	+17.54	+18.92

بر اساس نتایج، در نسبت ۰/۹۲، برای شیب افقی و هر دو غلظت ۵ و ۱۰ گرم در لیتر، متوسط سرعت پیشانی در تنگ‌شدگی، تحت تأثیر بالا رفتن میزان اختلاط در پیشانی، نسبت به محدوده قبل از آن کاهش داشته است؛ در صورتی که با کوچکتر شدن نسبت عرض، پارامتر مزبور به جای کاهش، افزایش یافته است؛ که بیشترین میزان آن مربوط به تنگ‌شدگی با نسبت ۰/۳۹ می‌باشد. در حالت شیبدار، درصد تغییرات متوسط سرعت پیشانی در تنگ‌شدگی، در تمام موارد به صورت افزایش است؛ اما میزان این افزایش برای دو نسبت ۰/۳۹ و ۰/۶۴، در مقایسه با نسبت ۰/۹۲، به ترتیب بین ۳/۰۳ تا ۳/۴۵ و ۱/۱ تا ۳/۱ برابر بیشتر می‌باشد. بنابراین، هر چه تنگ‌شدگی ناگهانی شدیدتر باشد؛ نیروی محرک جریان غلیظ را بیشتر افزایش خواهد داد. همچنین، در هر دو غلظت ورودی، تندتر شدن شیب بستر سبب تشدید تأثیر تنگ‌شدگی در افزایش متوسط سرعت پیشانی شده است. به عنوان مثال، برای غلظت ۵ گرم در لیتر و $W_R=0.39$ ، افزایش شیب از صفر به ۳ درصد، سبب دو برابر شدن درصد افزایش سرعت در تنگ‌شدگی شده است؛ در وضعیت مشابه و برای غلظت ۱۰ گرم در لیتر، درصد مزبور افزایش ۳/۴ برابری داشت. همانطور که در بخش ۲.۳ بیان شد؛ دلیل این امر را می‌توان در تقویت نیروی رانش جریان غلیظ، در اثر مؤلفه مماسی وزن سیال در کانال شیبدار دانست. همچنین، به ازای $W_R=0.39$ و $W_R=0.64$ ، درصد افزایش متوسط سرعت پیشانی در تنگ‌شدگی، برای غلظت ۵ گرم در لیتر، بین ۱/۰۷ تا ۲/۰۴ برابر بیشتر از مقادیر متناظر در غلظت ۱۰ گرم در لیتر می‌باشد.

بر اساس جدول (۱)، در بازشدگی به ازای $W_R=0.39$ ، متوسط سرعت پیشانی در تمام موارد دچار کاهش شده؛ که بیشترین میزان آن در حدود ۳۴ درصد و مربوط به شیب صفر درصد و غلظت ۱۰ گرم در لیتر می‌باشد. از طرفی، در بازشدگی با نسبت ۰/۹۲ و در کانال افقی، مقادیر درصد کاهش متوسط سرعت، در مقایسه با $W_R=0.39$ کمتر بوده و در حالت کانال شیبدار نیز به جای کاهش، افزایش رخ داده است. این در حالی است؛ که برای $W_R=0.64$ و به ازای غلظت ۵ گرم در لیتر، تنها در وضعیت بستر افقی، کاهش در متوسط سرعت پیشانی مشاهده شده و در وضعیت کانال شیبدار، مشخصه مزبور افزایش داشته؛ که البته میزان آن، نسبت به $W_R=0.92$ بسیار کمتر می‌باشد. برای مثال، به ازای شیب ۳ درصد و غلظت ۵ گرم در لیتر، درصد افزایش سرعت در بازشدگی با نسبت ۰/۶۴، حدود یک سوم مشخصه مزبور برای نسبت ۰/۹۲ می‌باشد. با افزایش غلظت ورودی جریان به ۱۰ گرم در لیتر، علاوه بر شیب صفر، در شیب ۱/۵ درصد نیز متوسط سرعت پیشانی در بازشدگی با نسبت ۰/۶۴ با کاهش همراه بوده است. همچنین، در این غلظت و برای شیب ۳ درصد، میزان افزایش متوسط سرعت در بازشدگی ناگهانی برای نسبت ۰/۶۴، در مقایسه با نسبت ۰/۹۲ به شکل قابل توجهی کمتر است. بدین ترتیب، به طور کلی می‌توان عنوان نمود؛ که برای $W_R=0.39$ و $W_R=0.64$ ، بازشدگی ناگهانی اثر قابل توجهی در کاهش نیروی رانش جریان داشته است. این تأثیر کاهنده همان طور که پیش‌تر در بخش ۱.۳ بیان شد؛ به بالا رفتن میزان اختلاط دو سیال، در اثر افزایش شدت ناپایداری‌های تلاطمی در بازشدگی ناگهانی و در نتیجه کاهش غلظت پیشانی جریان برمی‌گردد. همچنین، تندتر شدن شیب کف، به دلیل عامل مؤلفه مماسی وزن سیال، به طور قابل ملاحظه‌ای اثر کاهنده بازشدگی ناگهانی را بر روی متوسط سرعت پیشانی تضعیف می‌کند. برای مثال، به ازای $W_R=0.39$ و غلظت ۵ گرم در لیتر، افزایش شیب از صفر به ۳ درصد، میزان درصد کاهش متوسط سرعت را تا ۷۹ درصد کم کرده است. این میزان برای غلظت ۱۰ گرم در لیتر به ۸۳ درصد رسیده است. از طرفی، افزایش غلظت از ۵ به ۱۰ گرم در لیتر، سبب تقویت اثر کاهنده بازشدگی در نیروی رانش جریان شده است. برای مثال، در نسبت ۰/۳۹ و شیب افقی، افزایش غلظت مزبور، درصد کاهش متوسط سرعت را حدود دو برابر افزایش داده است. همچنین، در بازشدگی با نسبت ۰/۶۴، در مواردی که متوسط سرعت به جای کاهش، افزایش داشته؛ افزایش غلظت موجب شده تا مشخصه مزبور یا کاهش یابد و یا اینکه کمتر دچار افزایش شود. باید توجه داشت؛ که افزایش غلظت، در ابتدا، به واسطه تشدید اختلاف چگالی میان دو سیال، سبب افزایش سرعت جریان غلیظ می‌شود؛ اما در ادامه، افزایش سرعت مزبور، سبب تقویت تنش برشی و ناپایداری-

های K-H در پیشانی شده (Wells et al. 2010)؛ که نتیجه نهایی آن افزایش شدت اختلاط و کاهش سرعت پیشانی در بازشدگی ناگهانی است.

نتایج جدول (۱) نشان می‌دهد؛ که بیشترین میزان افزایش متوسط ارتفاع پیشانی در تنگ‌شدگی و بازشدگی ناگهانی مربوط به کمترین نسبت عرض یعنی $W_R=0.39$ است. برای $W_R=0.64$ نیز جز یک مورد (شیب صفر درصد و غلظت ۵ گرم در لیتر)، در بقیه موارد میزان افزایش متوسط ارتفاع در هر دو ناحیه مورد بحث، بیشتر از حالت $W_R=0.92$ می‌باشد. در مورد تنگ‌شدگی ناگهانی با دو نسبت 0.39 و 0.64 ، همان طور که در بخش ۲.۳ بیان شد؛ یک روند صعودی در سرعت پیشانی شکل می‌گیرد؛ که همین مسئله سبب تقویت تنش برشی و ناپایداری‌های تلاطمی در مرز دو سیال و در نتیجه افزایش اختلاط و ارتفاع پیشانی می‌شود. در بازشدگی ناگهانی نیز، عامل اصلی بالا رفتن میزان اختلاط دو سیال و در نتیجه متوسط ارتفاع پیشانی، تشکیل خیزاب بزرگ K-H است (بخش ۱.۳). هر چه شدت تغییر عرض کانال بیشتر باشد؛ عوامل مزبور قوی‌تر و در نتیجه شدت اختلاط و میزان افزایش ارتفاع پیشانی بیشتر خواهد بود. همچنین، در هر دو حالت تنگ‌شدگی و بازشدگی ناگهانی، به طور کلی افزایش شیب بستر از صفر به ۳ درصد، سبب افزایش متوسط ارتفاع پیشانی می‌شود. برای مثال در بازشدگی به ازای $W_R=0.39$ و غلظت ۵ گرم در لیتر، افزایش شیب مزبور، باعث بالا رفتن درصد افزایش متوسط ارتفاع پیشانی به میزان ۱۰۷ درصد شده است. بنابراین درست است؛ که افزایش شیب موجب افزایش سرعت می‌شود؛ اما از طرف دیگر به واسطه افزایش تنش برشی در مرز دو سیال، موجب افزایش ناپایداری‌های تلاطمی موجود در پیشانی و تشدید اختلاط در آن می‌شود. همچنین، دو برابر شدن غلظت جریان، سبب افزایش درصد افزایش متوسط ارتفاع پیشانی در هر دو محدوده تنگ‌شدگی و بازشدگی ناگهانی شده است؛ که به معنای بیشتر شدن میزان اختلاط است.

می‌توان با در نظر گرفتن همزمان نتایج مربوط به متوسط سرعت و ارتفاع پیشانی برای دو نسبت عرض 0.39 و 0.64 (که در آنها اثر تغییر عرض بر هیدرودینامیک جریان قابل توجه است)، مسئله اندرکنش میان نیروی‌های محرک و مقاوم را مورد بررسی دقیق‌تر قرار داد. بر اساس نتایج؛ در تنگ‌شدگی ناگهانی، هر دو پارامتر متوسط سرعت و ارتفاع پیشانی افزایش می‌یابد؛ و بیشترین افزایش در متوسط سرعت پیشانی در همان مواردی رخ داده؛ که بیشترین افزایش در متوسط ارتفاع پیشانی را داشته‌اند. از طرف دیگر، همانطور که در بخش ۲.۳ بیان شد؛ هر چه تنگ‌شدگی بیشتر باشد؛ نقطه وقوع سرعت بیشینه دیرتر رخ داده و روند صعودی تغییرات سرعت پیشانی با فاصله، طولانی‌تر می‌شود. لذا، علی‌رغم اینکه تنگ‌شدگی ناگهانی تقویت‌کننده هر دو نیروی رانش و مقاوم می‌باشد؛ عملکرد تنگ‌شدگی در مجموع به نفع نیروی رانش است. با استدلالی مشابه، می‌توان عنوان نمود؛ اثر تندتر شدن شیب بر کارکرد تنگ‌شدگی، در راستای تقویت نیروی محرک است. همچنین، از آنجا که با غلیظت‌تر شدن جریان در تنگ‌شدگی ناگهانی، درصد افزایش متوسط ارتفاع پیشانی بیشتر و درصد افزایش متوسط سرعت پیشانی کمتر می‌شود؛ می‌توان نتیجه گرفت؛ که افزایش غلظت سبب تعدیل اثر تنگ‌شدگی ناگهانی بر روی جبهه جریان، به نفع مقاومت ناشی از اختلاط می‌شود. در ارتباط با بازشدگی ناگهانی، نتایج حاکی از غلبه اثر اختلاط و مقاومت ناشی از آن بر نیروی رانش جریان است؛ زیرا در این ناحیه، متوسط ارتفاع پیشانی افزایش و متوسط سرعت پیشانی کاهش می‌یابد. همچنین به ازای شرایط مشابه، با افزایش شیب بستر، با وجود بیشتر شدن درصد افزایش ارتفاع متوسط پیشانی، درصد کاهش متوسط سرعت پیشانی کمتر و حتی در برخی موارد، برای $W_R=0.64$ ، تبدیل به درصد افزایش می‌شود. بنابراین در بازشدگی ناگهانی، افزایش شیب بستر سبب تضعیف نیروی مقاوم و تقویت نیروی رانش می‌شود. در ارتباط با اثر افزایش غلظت در عملکرد بازشدگی نیز، این امر سبب افزایش متوسط ارتفاع پیشانی و به دنبال آن بالاتر رفتن میزان کاهش متوسط سرعت پیشانی شده است. همچنین در مواردی که متوسط سرعت در محدوده مزبور به جای کاهش،

افزایش داشته؛ افزایش غلظت موجب شده تا این افزایش کمتر شود و یا اینکه کاهش رخ دهد. بنابراین، اثر افزایش غلظت بر عملکرد بازشدگی ناگهانی، در راستای تقویت نیروی مقاوم است.

۴. نتیجه گیری

در این تحقیق آزمایشگاهی اثر تنگ‌شدگی و بازشدگی ناگهانی در مسیر جریان غلیظ نمکی بر روی هیدرودینامیک جبهه جریان و نیروی‌های مرتبط با آن مورد بررسی قرار گرفت. دبی ورودی ثابت (۱ لیتر بر ثانیه) و متغیرها شامل دو غلظت (۵ و ۱۰ گرم در لیتر)، سه شیب (صفر، ۱/۵ و ۳ درصد) و سه نسبت عرض (۰/۳۹، ۰/۶۴ و ۰/۹۲) لحاظ گردید. بر اساس محاسبات، عدد فرود پیشانی در هنگام ورود به هر یک از نواحی تنگ‌شدگی و بازشدگی ناگهانی، به ترتیب بین ۰/۷۳ تا ۱/۱۶ و ۰/۶۹ تا ۱/۴۱ قرار داشته و لذا رژیم جریان شامل هر سه حالت زیربحرانی، بحرانی و فوق بحرانی بود. مهم‌ترین نتایج به شرح زیر است:

- در نسبت‌های عرض ۰/۳۹ و ۰/۶۴، برخلاف نسبت عرض ۰/۹۲، اثر تنگ‌شدگی و بازشدگی ناگهانی بر هیدرودینامیک جبهه جریان قابل توجه بوده؛ به نحوی که روند حاکم بر تغییرات پارامترهای پیشانی با فاصله را تحت الشعاع قرار می‌دهد. به طور کلی، در تنگ‌شدگی با دو نسبت مزبور، به دلیل افزایش شار شناوری، سرعت پیشانی تا یک فاصله مشخص افزایش یافته و پس از آن، به دلیل غلبه اثر ناشی از اختلاط در پیشانی، از یک روند نزولی تبعیت می‌کند. هر چه میزان تنگ‌شدگی و شیب کانال (و در نتیجه شار شناوری) بیشتر باشد؛ مقدار سرعت بیشینه بالاتر و محل وقوع آن دورتر خواهد بود. همچنین، روند تغییرات سرعت با فاصله، در بازشدگی با نسبت‌های مزبور، تحت تأثیر تشدید ناپایداری‌های K-H، به صورت کاهشی است؛ که شدت آن با کاهش نسبت عرض بیشتر می‌شود. در نسبت عرض ۰/۹۲ که در آن تغییر عرض ناگهانی ناچیز بوده و اثر چندانی بر هیدرودینامیک جریان نداشت؛ روند حاکم بر تغییرات سرعت پیشانی با فاصله، در هر دو ناحیه تنگ‌شدگی و بازشدگی، برای شیب صفر به صورت نزولی و برای کانال شیبدار به صورت صعودی بود. در ارتباط با تغییرات ارتفاع پیشانی در طول کانال، باید عنوان نمود؛ که روند کلی برای تنگ‌شدگی و بازشدگی با هر سه نسبت ۰/۳۹، ۰/۶۴ و ۰/۹۲ به صورت صعودی است. هر چه تغییر ناگهانی عرض، شدیدتر (و نسبت عرض کوچک‌تر باشد)؛ بر شدت این روند افزایشی افزوده می‌شود؛ که علت آن به اثر تغییر مزبور در تشدید ناپایداری‌های تلاطمی در پیشانی و در نتیجه افزایش میزان اختلاط برمی‌گردد.
- علی‌رغم اینکه تنگ‌شدگی ناگهانی تقویت‌کننده هر دو نیروی رانش و مقاوم می‌باشد؛ الگوی جریان به گونه‌ایست که عملکرد نهایی به نفع نیروی رانش جریان غلیظ است. این برتری با افزایش شیب کانال و ورود مؤلفه مماسی وزن سیال در اندرکنش مزبور، تقویت می‌شود. همچنین افزایش غلظت، به دلیل تشدید تنش برشی و ناپایداری‌های تلاطمی K-H در مرز مشترک دو سیال، سبب تعدیل اثر تنگ‌شدگی ناگهانی، به نفع نیروی مقاوم ناشی از اختلاط می‌شود. در بازشدگی ناگهانی، نتایج حاکی از غلبه مقاومت ناشی از اختلاط بر نیروی محرک می‌باشد. این برتری با افزایش شیب تضعیف و با افزایش غلظت تقویت می‌شود.

۵. پی‌نوشت

1. Density Current
2. Underflow

3. Buoyancy flux
4. Head
5. Body
6. Kelvin-Helmholtz Instability
7. Entrainment
8. Separation
9. Billow
10. Lobe
11. Convective Instabilities
12. Entrainment Drag

۶. تشکر و قدردانی

بدینوسیله از حمایت مالی معاونت پژوهش و فناوری دانشگاه شهید چمران اهواز در قالب پژوهانه (GN: SCU.WH1403.86) در انجام این تحقیق تشکر و قدردانی می‌گردد.

۷. منابع

- Ahadiyan, J., & Musavi-Jahromi, S. H. (2008). Investigation of variation of efflux momentum in shallow receiving water using FLOW-3D. In: Proceeding of *International Symposium of Water Resource Management Tabriz, Iran*, 551-557. (In Persian).
- Ahadiyan, J., & Musavi-Jahromi, S. H. (2009). Effects of jet hydraulic properties on geometry of trajectory in circular buoyant jets in the Static Ambient Flow. *Journal of Applied Sciences*, 9, 3843-3849. <https://scialert.net/abstract/?doi=jas.2009.3843.3849>.
- Ahadiyan, J., Pipelzadeh, S., & Omidvarinia, M. (2016). Hydraulic simulation of sewage discharge in an irrigation and drainage system by changing the vertical angle of the bottom circular buoyant jet. *Irrigation and Drainage Structures Engineering Research*, 16(65), 1-18. (In Persian). doi: 10.22092/aridse.2016.105698.
- Akbarizadeh, M., Saffarian, M. R., & Ghomeshi, M. (2020). Experimental investigation of sediment accumulation reduction in reservoirs due to turbidity currents with channel insertion at the entrance. *International Journal of Civil Engineering*, 18, 37-47. <http://dx.doi.org/10.1007/s40999-019-00458-7>
- Altinakar, M. S., Graf, W. H., & Hopfinger, E. J. (1990). Weakly depositing turbidity current on a small slope. *Journal of Hydraulic Research*, 28, 55-80. <https://doi.org/10.1080/00221689009499147>
- Arjmandi, H., Ghomeshi, M., Ahadiyan, J., & Goleij, H. (2012). Prediction of plunge point in the density current using RNG turbulence modeling. *Water and Soil Science*, 22(1), 171-185. (In Persian). https://water-soil.tabrizu.ac.ir/article_1115.html?lang=en.
- Asghari pari, S. A., kashefipour, S. M., & Ghomeshi, M. (2017). An experimental study to determine the obstacle height required for the control of subcritical and supercritical gravity currents. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, 21(9), 1080-1092. <https://doi.org/10.1080/19648189.2016.1144537>
- Baghalian, S., & Ghodsian, M. (2020). Experimental study on the effects of artificial bed roughness on turbidity currents over abrupt bed slope change. *International Journal of Sediment Research*, 35(3), 256-268. <https://doi.org/10.1016/j.ijsrc.2019.12.004>
- Baghalian, S., & Ghodsian, M. (2022). Experimental study of obstacle and bed roughness effects on behavior of turbidity current. *Journal of Hydro-environment Research*, 40, 77-90. <https://doi.org/10.1016/j.jher.2021.11.002>
- Britter, R. E., & Linden, P. F. (1980). The Motion of the front of a gravity current down an incline. *Journal of Fluid Mechanics*, 99(3): 531-543. <https://doi.org/10.1017/S0022112080000754>
- Fathi-Moghadam, M., Torabi Poudeh, H., Ghomeshi, M., & Shafaei, M. (2008). The density current head velocity in expansion reaches. *Lakes & Reservoirs: Research and Management*, 13, 63-68. <https://doi.org/10.1111/j.1440-1770.2007.00351.x>

- Ghomeshi, M. (1995). *Reservoir sedimentation modeling*. Department of Civil and Mining Engineering. Doctoral dissertation, University of Wollongong, Australia.
- Ghomeshi, M., Baher, S., & Ehdadei, P. (2019). An Experimental study of plunge depth in the case of clear water movement. *International Journal of River Basin Management*, 17(3), 323-332. <https://doi.org/10.1080/15715124.2018.1531420>
- Goleaje, H., Ghomeshi, M., Ahadian, J., & Arjmandi, H. (2014). Effect of hydraulic and geometric parameters on plunge point in density current. *Irrigation Sciences and Engineering*, 37(1), 1-9. (In Persian). https://jise.scu.ac.ir/article_10841.html?lang=en.
- Goleij H, Ahadiyan J., Ghomeshi M., & Arjmandi H. (2014). The functional comparison of the turbulent model to the RNG model at predicting the plunge point depth. *Journal of Water and Soil Science* ,18 (69), 89-100. (In Persian). <http://jstnar.iut.ac.ir/article-1-2865-en.html>.
- Gray, T. E., Alexander, J., & Leeder, M. R. (2006). Longitudinal flow evolution and turbulence structure of dynamically similar, sustained, saline density and turbidity currents. *Journal of Geophysical Research*, 111(8), 1-14. <https://doi.org/10.1029/2005JC003089>
- Groenenberg, R. (2007). *Process-based modelling of turbidity current hydrodynamics and sedimentation*. Doctoral dissertation, Delft University of Technology, Netherlands.
- Heidari, T., Shahni Karamzadeh, N. & Ahadiyan, J. (2018). An experimental investigation of convergent rectangular surface jets: spreading characteristics of horizontal flow over the bed of deep and stagnant ambient water. *International Journal of Civil Engineering*, 17, 443–456. <https://doi.org/10.1007/s40999-018-0350-8>
- Kazemi Arpanahi, R., Ghomeshi, M., Ahadiyan, J., & Kahe, M. (2017). Laboratory and numerical study of dynamics salty density current in the reservoirs. *Irrigation Sciences and Engineering*, 40(2), 173-182. (In Persian). [doi: 10.22055/jise.2017.13177](https://doi.org/10.22055/jise.2017.13177)
- Keulegan, G. H. (1958). *12th Progress Rep. on Model Laws for Density Currents: The motion of saline fronts in still water*. U.S. Nat. Bur. Std., Rept. 5831, website: <http://onlinebooks.library.upenn.edu/webbin/book/lookupid?key=ha009221020>
- Khalili Naftchali, A., Khozayemnezhad, H., Akbarpour, A., & Varjavand, P. (2016). Experimental study on the effects of artificial vegetation density on forehead of saline current flow. *Ain Shams Engineering Journal*, 7 (2), 799-809. <https://doi.org/10.1016/j.asej.2015.12.006>
- Kim, Y. D., Seo, I. W., Kang, S. W., & Oh, B. C. (2002). Jet integral-particle tracking hybrid model for single buoyant jet. *Journal of Hydraulic Engineering*, 128(8), 753-760. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9429\(2002\)128:8\(753\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(2002)128:8(753))
- Kooti, F. (2010). *Interaction of reservoir bed slope and density current discharge on water entrainment*. Master dissertation, Shahid Chamran University of Ahvaz, Iran. (In Persian).
- Kooti, F., & Kashefipour, S. M. (2018). Sensitivity of the head velocity in density currents to the various initial conditions. *ISH Journal of Hydraulic Engineering*, 24(1), 74-80. <https://doi.org/10.1080/09715010.2017.1350118>
- Kullenberg, G. (1977). Entrainment velocity in natural stratified vertical shear flow. *Estuarine and coastal marine science*, 5(3), 329-338. [https://doi.org/10.1016/0302-3524\(77\)90060-3](https://doi.org/10.1016/0302-3524(77)90060-3)
- Mansoujjan, M. R., Ghomeshi, M., Hasounizadeh, H., & Hosseini, S. A. (2021). Effects of cylindrical and cubic piles on motion of density currents. *GRADEVINAR*, 73(5), 499-507. <https://doi.org/10.14256/JCE.2867.2019>
- Mansouri Hafshejani, M., Ghomeshi, M., Shafaei bajestan, M., & Ahadiyan, J. (2016). Estimation of relative head velocity of density current when ambient water flowing in same direction of density current. *Irrigation Sciences and Engineering*, 39(4), 193-200. (In Persian). [doi: 10.22055/jise.2016.12507](https://doi.org/10.22055/jise.2016.12507).
- Nadian, H. A., Shahni Karamzadeh, N., Ahadiyan, J., & Bakhtiari, M. (2024). Trajectory and spreading of falling circular dense jets in shallow stagnant ambient water. *Results in Engineering*, 24, 102897. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2024.102897>.
- Ohey, C. D. (2003). *Effects of obstacles and jets on reservoir sedimentation due to turbidity current*. Doctoral dissertation, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, Switzerland.
- Sajadifar, R., & Ahadiyan, J. (2016). Spreading coefficient of buoyant jet flow in the shallow and deep Ambient Current. *Water and Soil*, 30(5), 1403-1414. (In Persian). [doi: 10.22067/jsw.v0i0.42869](https://doi.org/10.22067/jsw.v0i0.42869).
- Simpson, J. E., & Britter, R. E. (1979). The dynamics of the head of a gravity current advancing over a horizontal surface. *Journal of Fluid Mechanics*, 94(3), 477–495. <https://doi.org/10.1017/S0022112079001142>
- Varjavand, P., Ghomeshi, M., Hosseinzadeh Dalir, A., Farsadizadeh, D., & Docheshmeh Gorgij, A. (2015). Experimental observation of saline underflows and turbidity currents, flowing over rough beds. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 42, 834–844. <https://doi.org/10.1139/cjce-2014-0537>
- Wells, M., Cenedese, C., & Caulfield, C. P. (2010). The relationship between flux coefficient and entrainment ratio in density currents. *Journal of Physical Oceanography*. 40(12), 2713-2727. [DOI: 10.1175/2010JPO4225.1](https://doi.org/10.1175/2010JPO4225.1)

Experimental Investigation of the Effects of Sudden Width Changes on the Hydrodynamics of Density Current Front and the Interaction of the Effective Forces

Pouya Ehdaei¹ | Mehdi Ghomeshi^{2*} | Mehdi Daryaei³ | Mohammad Reza Zayeri⁴ |

1. Ph.D. student, Department of Hydraulic Structures, Faculty of Water and Environmental Engineering, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran. E-mail: pouya_ehdaei@yahoo.com
2. Professor, Department of Hydraulic Structures, Faculty of Water and Environmental Engineering, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran. (* Corresponding Author) E-mail: ghomeshi@scu.ac.ir
3. Associate Professor, Department of Hydraulic Structures, Faculty of Water and Environmental Engineering, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran. E-mail: M.Daryaei@scu.ac.ir
4. Assistant Professor, Department of Hydraulic Structures, Faculty of Water and Environmental Engineering, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran. E-mail: M.Zayeri@scu.ac.ir

ABSTRACT

In this research, 18 experiments were conducted to investigate the effects of sudden constriction and expansion on frontal hydrodynamics. The flow rate was set at 1.1 l/s, with variables including concentrations of 5 and 10 gr/l, slopes of zero, 1.5, and 3 percent, and width ratios of 0.39, 0.64, and 0.92. The flow regime encompassed all three states: subcritical, critical, and supercritical. In constrictions with ratios of 0.39 and 0.64, the front velocity initially increases up to a point due to buoyancy flux but then decreases under the influence of mixing. Increasing the constriction intensity and slope raises the maximum velocity and delays its occurrence. Specifically, at a 3 percent slope, the maximum velocity for the 0.39 ratio compared to 0.64 increased by 20.29 percent and 24.49 percent for concentrations of 5 and 10 gr/l, respectively. In expansions with these two ratios, the velocity decreases with distance due to intensified turbulent instabilities, with a more pronounced effect at the 0.39 ratio. At the 0.92 ratio, constriction and expansion had no significant impact, and the velocity trend resembled that of a constant-width channel: decreasing at zero slope and increasing in sloped channels. The front height increased with distance in both constriction and expansion regions for all width ratios, with greater intensity at smaller ratios. The effect of constriction is in support of flow driving force, strengthened by slope but weakened by concentration. In expansion, mixing-induced resistance prevailed, strengthened by concentration but weakened by slope.

Keywords: Sudden Expansion, Sudden Constriction, Mixing-Induced Resistance, Kelvin-Helmholtz Instabilities, Driving Force