



مقاله پژوهشی

Available Online: <http://jmst.kmsu.ac.ir>



مطالعه آزمایشگاهی جریان چگال در اثر تنگ شدگی ناگهانی دیواره فوم

محمد حسینی^۱، محمد هادی فتاحی^{۲*} و سعید اسلامیان^۳

۱. گروه مهندسی عمران، مرکز قیروکارزین، واحد فیروزآباد، دانشگاه آزاد اسلامی، فیروزآباد، ایران.

۲. گروه مهندسی عمران، واحد مرودشت، دانشگاه آزاد اسلامی، مرودشت، ایران.

۳. گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ایران.

فست الکترونیک: fattahi.mh@gmail.com نویسنده مسئول، پست الکترونیک

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۰۸/۰۷

تاریخ بازنگری: ۱۳۹۹/۰۷/۲۱

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۰۴/۲۱

شناسه دیجیتال (DOI): 10.22113/JMST.2020.236659.2381

چکیده

جریان‌های چگال به علت تفاوت دانسیته مابین دو سیال بوجود می‌آیند و جزء جریان‌های ثقلی است. جریان چگال از سه ناحیه دماغه، سر و بدنه در داخل سیال محیطی تشکیل می‌شود. جهت انجام آزمایش‌ها از فلومی با طول ۸m و عرض ۳۵cm و ارتفاع ۴۰cm استفاده شده است. در راستای فوم، تنگ شدگی ممتد و موضعی در مرکز کانال ایجاد شده و آزمایشات در ۲۸ حالت مختلف با تغییر دبی، چگالی و شیب بستر توسعه داده شده است. نتایج نشان داد غلظت جریان چگال با افزایش شیب بستر بعد از تنگ شدگی ممتد و موضعی به ترتیب ۱۲٪ و ۱۹٪ نسبت به حالت بدون تنگ شدگی کاهش یابد و هرچه دیواره فوم تنگ تر شود، میزان شدت اختلاط بیشتر می‌شود؛ به طوری که بعد از تنگ شدگی عدد ریچاردسون ۸۰٪ کاهش و شدت اختلاط ۵ برابر افزایش می‌یابد. با افزایش چگالی ورودی، الگوی تشکیل پروفیل سرعت و غلظت جریان افزایش می‌یابد همچنین به دلیل رفتار غیر دائمی جریان، الگو در ناحیه جت پراکندگی بیشتری نسبت به ناحیه دیواره از خود نشان می‌دهد.

واژگان کلیدی: جریان چگال، تنگ شدگی ممتد و موضعی، عدد ریچاردسون، شدت اختلاط، ناحیه جت.

Copyrights:

Copyright for this article is retained by the author(s), with publication rights granted Journal of Marine Science and Technology. This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0>), which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.



۱. مقدمه

جریان های چگال عامل بسیاری از پدیده ها در محیط های طبیعی و مصنوعی می باشند به عنوان مثال جریان های کدر یا شور وارد شده به دریاچه ها و مخازن سد ها می تواند بر الگوی ته نشینی و فرسایش رسوبات در این محیط های آبی موثر باشند. حرکت جریان چگال در زیر آب صاف باعث ایجاد لایه برشی در فصل مشترک آب صاف و سیال چگال می گردد. لذا در فصل مشترک، برش و گردابه های فراوانی بوجود آمده و همین امر باعث درون آمیختگی آب صاف و سیال چگال می گردد که درون آمیختگی میزان اختلاف چگالی را کم نموده و از نیروی شناوری می کاهد. اختلاف جرم مخصوص ممکن است ناشی از دما، مواد معلق، مواد محلول و یا ترکیبی از آن ها باشد.

با انجام مطالعه آزمایشگاهی جریان گل آلود در اثر وجود موانع در کف کانال، به نحوه رسوبگذاری در پشت سد ها پرداخته شد (Chamoun et al., 2016). در رویکردی دیگر استفاده از موانع متخلخل از موانع متخلخل پلکانی عملکردی بهتری داشته است همچنین مانع پلکانی متخلخل با پلکان پشت به مسیر جریان غلیظ، از مانع متخلخل و مانع پلکانی با پلکان رو به جریان، مقدار بیشتری از دبی رسوبی را کاهش داده است (Kordnaeij et al., 2018). بهترین راندمان درصد دبی تخلیه به میزان ۸۵٪ برای حفظ اکوسیستم پایین دست سد بدست آوردند. تخلیه جریان گل آلود از مخازن سدها تاثیرات چشمگیری در پایین دست رودخانه می گذارد (Ramos-Villanueva, 2016). در طول سری زمانی، میزان غلظت جریان چگال ارتباط معناداری با نسبت دبی تخلیه دارد

(Lee et al., 2014). الگوهای پروفیل سرعت در ناحیه دیواره و جت از بدنه جریان غلیظ تحت تاثیر رژیم جریان قرار دارد. در جریان های فوق بحرانی الگوی پروفیل خوابیده تری نسبت به جریان های زیر بحرانی از خود نشان می دهد (Bahrami et al., 2017). مطالعه آزمایشگاهی جریان گل آلود و نمکی در اثر وجود موانع استوانه ای در کف کانال مورد بررسی قرار گرفته (Varjavand et al., 2015) نتایج نشان داد هر چه ارتفاع موانع بیشتر باشد، ضریب اختلاط سیال تمیز با سیال چگال افزایش می یابد. همچنین با افزایش میزان سرعت جریان گل آلود، عدد ریچاردسون (Ri) افزایش می یابد. اثرات موانع مختلف بر کنترل جریان گل آلود مورد بررسی قرار دادند. شکل موانع در کف کانال بر پارامترهای هیدرولیکی جریان گل آلود از جمله مکانیزم انتقال رسوب، سرعت، غلظت و ضخامت آن تاثیر بسزایی بگذارد. همچنین نشان دادند با افزایش عدد ریچاردسون (Ri)، میزان شدت اختلاط (Ew) کاهش می یابد (Bolla Pittaluga and Imran, 2014; Shringarpure et al., 2015; Asghari et al., 2017). در جریان های چگال، میزان کشتش آب ساکن علاوه بر عدد ریچاردسون به شیب بستر کانال بستگی دارد (Bahrami et al., 2019). با استفاده از مطالعات آزمایشگاهی به بررسی بدنه جریان های ثقلی در گام های زمانی مختلف پرداخته شد (Cortes et al., 2014). جهت پایداری جریان از عدد ریچاردسون استفاده کردند که در آن پارمتر سرعت، چگالی، ضخامت جریان و شیب جریان تاثیر گذار است و برای پایداری جریان ریچاردسون ۰/۲۵ ملاک قرار دادند.

جدول ۱ خلاصه ای از نتایج آزمایشگاهی محققین در زمینه ارتباط شدت اختلاط و عدد ریچاردسون

Table 1- The laboratory results of researchers about the relationship between the entrainment ratio and Richardson number

نام محقق	سال ارائه	رابطه ارائه شده	شیب (درصد)
Ashida and Egashira	1975	$E_w = \frac{0.0015}{Ri}$	0.6
Fukushima	1985	$E_w = \frac{0.00153}{0.0204Ri}$	---
Parker	1987	$E_w = \frac{0.0075}{(1+718Ri^{2.4})^{0.5}}$	8
Kashefipour	2017	$E_w = (0.004 + 0.009(k/h))/Ri^{1.36}$	1.4
Ghomeshi and Hashemi	2018	$E_w = \frac{0.0024}{Ri^{1.06}}$	0.625
Haghiabi	2004	$E_w = 0.0023(Ri)^{-1.0243}$	0.0-0.003
Firoozabadi and Mahdinia	2013	$E_w = 0.0021(Ri)^{-1.1238}$	0.002-0.03
Fathi-Moghadam	2008	$E_w = 0.0017(Ri)^{-1.042}$	0.005-0.02

۸۰۲ ساخت شرکت Valeport انگلستان با دقت اندازه گیری $\pm 5\text{mm/sec}$ استفاده شده است. این دستگاه دارای یک دیتا لاگر و یک سنسور اندازه گیری جریان است که قابلیت اتصال به رایانه را دارد و می‌توان سرعت جریان، دبی، سری زمانی سرعت و ... را اندازه گیری نماید. پراب (Probe) اندازه گیری جریان در سرعت سنج به کوچکترین حرکت‌ها حساس است، از این رو طرز قرار گرفتن صحیح آن در کانال مورد توجه است. برای برداشت نمونه رسوبات از فلوم از چند سری سیفون‌ها استفاده شد که قطر لوله‌های مکش ۵ میلی‌متر بود. لوله‌های متصل به سیفون‌ها در جهت عمق جریان در ۱۰ نقطه قرار گرفتند تا بتوان غلظت متوسط جریان را اندازه‌گیری کرد. نمونه‌های گرفته شده درون ظرف‌های مخصوص ریخته شد و سپس جهت تعیین غلظت مواد رسوبی و چگالی آن، از یک هیدرومتر با دقت اندازه گیری 0.001 g استفاده شد. مواد معلق رسوبی استفاده شده در این آزمایش از نوع پودر سنگ الک شده عبور کرده از الک شماره ۲۰۰ بود که دارای وزن مخصوص $2/65\text{ t/m}^3$ و سرعت ته نشینی متوسط 0.106 mm/s و قطر متوسط ذرات 0.074 mm می‌باشد. اندازه گیری سرعت و برداشت غلظت در وسط فلوم بود. چگالی آب تمیز $998/7\text{ kg/m}^3$ است. همچنین از سه شیب ۱، ۲، ۳ درصد و دو دبی 50 L/min و 90 L/min و دو چگالی 1005 kg/m^3 و 1008 kg/m^3 استفاده شده است. ارتفاع دریچه که جریان چگال از آن عبور می‌کند و وارد آب تمیز می‌شود، یک سانتی‌متر در نظر گرفته شد. همچنین جهت برداشت ضخامت جریان چگال از یکسری خط کش‌های اندازه‌گیری که در فواصل ۵۰ سانتی‌متری از یک دیگر قرار دارند، استفاده شد. لازم به ذکر است از یک عدد دوربین جهت تصویر برداری ورود جریان چگال به فلوم استفاده شد. برداشت نمونه‌ها در ۸ نقطه از فلوم صورت گرفت که فواصل اندازه گیری آن ۵۰ سانتی‌متر است که از فاصله $2/5\text{ m}$ از دریچه تا ۸ است. در شکل ۲ شرایط مرزی وارد شده به فلوم مشاهده می‌شود. در این آزمایشات، اثر وجود تنگ شدگی ممتد و موضعی در فلوم مورد بررسی قرار گرفت.

جریان چگال به دلیل وجود غلظت، سرعت، ضخامت و همچنین تاثیر شیب جریان بر مدل حائز اهمیت است. از این رو به دلیل وجود فصل مشترک ناچیز بین سیال آب و سیال غلیظ برای بیان بهتر روابط می‌توان از عدد ریچاردسون استفاده کرد. در جریان‌های طبیعی همواره اختلاط وجود داشته و اختلاط در ناحیه‌ای که چگالی و سرعت تابعی از ارتفاع است، بهتر است بجای عدد فرود چگالی توسط عدد گرادیان ریچاردسون بیان گردد. رابطه g شتاب ثقل کاهش یافته به واسطه شناوری است و حرکت جریان چگالی به طور عمده به این پارامتر بستگی دارد و به صورت رابطه (۱) تعریف می‌شود. در این رابطه ρ وزن مخصوص حجمی شاره چگال و ρ_0 چگالی سیال محیط است.

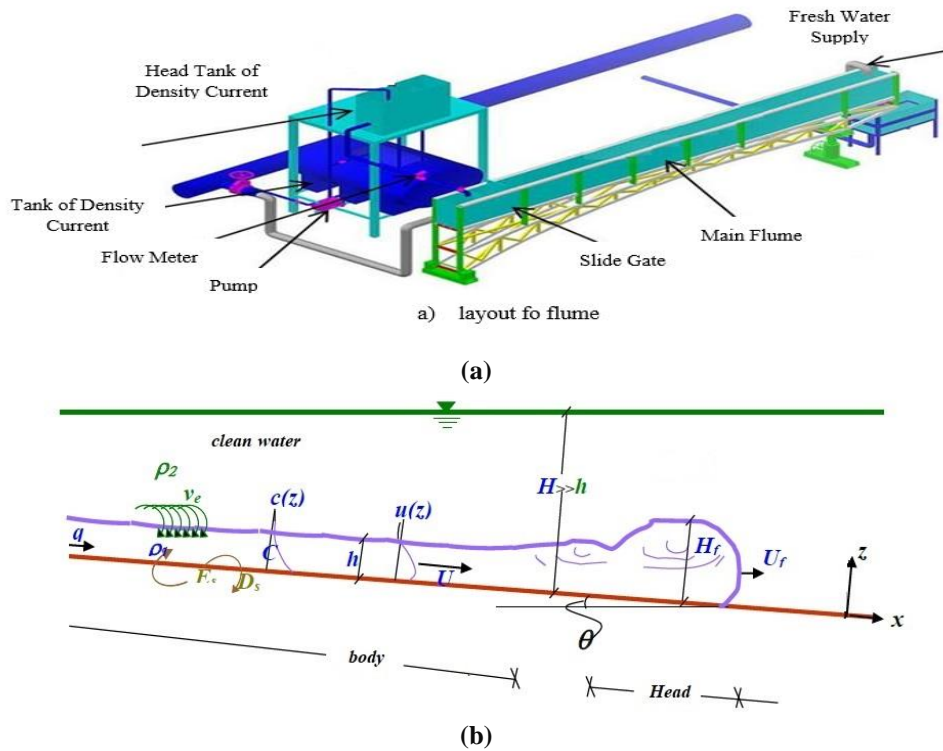
مطالعات گسترده‌ای در ارتباط با هیدرولیک جریان مخازن با جریان گل آلود و شبیه سازی از پروفیل قائم سرعت و غلظت رسوبات معلق در مسیرهای مستقیم و انحنا دار صورت گرفته است (Straub et al., 2011; Yeh et al., 2013; Ezz et al., 2015; Peakall et al., 2013). در جدول ۱ ارتباط بین نسبت شدت اختلاط (Ew) با عدد ریچاردسون (Ri) توسط سایر محققین نشان داده شده است.

به طور کلی هنگامی که فلوم شیب ملایم و بدون مانع داشته باشد، با افزایش سرعت جریان چگال، غلظت در ناحیه بستر کاهش می‌یابد و در شیب‌های کم کانال، با افزایش عدد ریچاردسون از میزان شدت اختلاط جریان کاسته شده است و بیشترین محدوده تمرکز اعداد ریچاردسون در بازه ۰/۱ تا ۱۰ است. در اکثر سوابق پژوهش، وجود موانع و تنگ شدگی‌ها در کف کانال بوده و تاکنون اثر تنگ شدگی‌ها در بدنه فلوم با تغییرات هیدرولیکی اولیه جریان مورد مطالعه قرار نگرفته است. با بررسی سوابق پژوهش، هدف از این مطالعه یافتن ارتباط معنا دار بین تکامل عدد ریچاردسون و جبهه اختلاط جریان چگال از طریق برداشت داده‌های آزمایشگاهی جریان چگال و مطالعه اثر تنگ شدگی ناگهانی کانال بر الگوی رفتار جریان چگال و همچنین بررسی جریان چگال با تغییر خصوصیات هیدرولیکی جریان است.

۲. مواد و روش‌ها

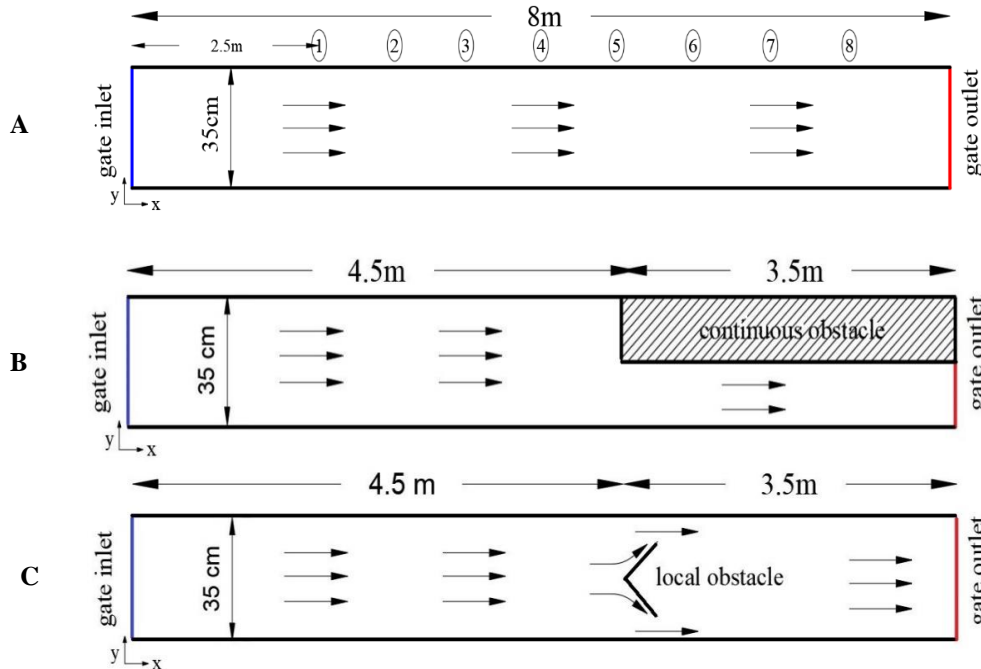
آزمایشات در بخش هیدرولیک دانشگاه شیراز صورت گرفت و از یک فلوم به طول ۸ متر، عرض ۳۵ سانتی‌متر و ارتفاع ۴۰ سانتی‌متر استفاده شد. فلوم دارای قابلیت شیب پذیری مثبت و منفی بود. از یک مخزن ۵۰۰ لیتری برای ورود جریان چگال استفاده شد و همچنین از دو عدد مخزن آب تمیز ۲۵۰ لیتری برای تعادل سطح آب در فلوم استفاده گردید. به گونه‌ای که یکی در ابتدا و دیگری در انتهای فلوم قرار دارد. همچنین از یک عدد میکسر برای سیرکولاسیون جریان گل آلود رسوبی استفاده شد که مانع از ته نشینی مواد در کف مخزن می‌گردد. از یک عدد پمپ کف کش با مشخصات ماکزیمم هد ۱۲۰ متر برای انتقال جریان چگال استفاده شد. در مسیر انتقال پمپ کف کش، یک عدد فلومتر برای تعیین میزان دبی ورودی قرار گرفت. در انتهای فلوم هنگام ورود آب تمیز به فلوم جهت تعادل قرار گرفتن سطح آب از یک صفحه آرام کننده جریان استفاده گردید که در شکل ۱ نمای شماتیکی از فلوم و الگوی تشکیل جریان چگال مشاهده می‌شود.

همچنین برای تهیه غلظت مواد رسوبی با چگالی در نظر گرفته شده از یک عدد هیدرومتر استفاده شد. جهت اندازه گیری سرعت جریان چگال در فلوم از یک عدد سرعت سنج الکترومغناطیسی مدل



شکل ۱- نمای شماتیکی از فلوم

Fig. 1- The schematic view of the flume and the pattern of the density current formation



شکل ۲- پلان فلوم جریان چگال - الف: مدل شماره ۱ (فلوم بدون تنگ شدگی). ب: مدل شماره ۲ (تنگ شدگی ممتد در وسط فلوم). ج: مدل شماره ۳- تنگ شدگی موضعی (عبور جریان از طرفین به عرض ۱۰ سانتی متر)

Fig. 2- The flume plan of the density current. (A): Model No. 1- Flume without narrowing. (B): Model No. 2 - continuous narrowing (in the middle of the flume). (C): Model No. 3 - local narrowing (current passing from the sides to a width of 10 cm)

شدت اختلاط جریان غلیظ و سیال ساکن پیرامون آن را که با E_w نشان داده می شود که ناشی از ناپایداری های حد فاصل جریان غلیظ و سیال ساکن بوده و به صورت نسبت سرعت اختلاط به سرعت متوسط بدنه جریان غلیظ تعریف می شود. محققان با انجام آزمایش های گوناگون بر روی جریان های غلیظ با جرم های مخصوص متفاوت دریافتند که ضریب شدت اختلاط تابعی از عدد ریچاردسون است. در اینجا ارتباط بین E_w و Ri نشان داده شده است که E_w عموماً به صورت تابعی از عدد ریچاردسون به صورت رابطه (۴) بیان می گردد.

جدول شماره ۲ مقادیر و شرایط آزمایشگاهی را نشان می دهد. مقدار بازشدگی درپچه ورودی 1 cm و دمای آب 23°C می باشد. در جدول زیر S درصد شیب کف، ρ_0 چگالی آب، ρ چگالی ورودی جریان غلیظ، g' شتاب کاهش ثقل، Q دبی ورودی جریان چگال، u سرعت ورودی جریان چگال و Ri_0 میزان عدد ریچاردسون ورودی است.

$$g' = \frac{(\rho - \rho_0)}{\rho_0} g$$

$$Ri = \frac{g'd \cos\theta}{u^2}$$

$$Re = (ud)/\nu$$

$$E_w = f(Ri)$$

در مواردی که اختلاط ناچیز بوده و یک سطح مشترک واضح و روشن وجود دارد عدد ریچاردسون می تواند بصورت رابطه (۲) بیان کرد. در این رابطه θ شیب، d ضخامت جریان چگال، u سرعت متوسط جریان و عدد ریچاردسون Ri توازن بین نیروی ثقل موثر، عمود بر وجه مشترک و برش بین صفحه مشترک دو جریان را بیان می دارد. کاهش عدد ریچاردسون باعث افزایش میزان اختلاط در سطح مشترک جریان چگال با سیال محیط می گردد (Ghomeshi and Hashemi, 2018).

یکی از مشخصه های جریان گل آلود، معلق ماندن رسوبات به واسطه آشفتگی می باشد و آشفتگی در ذرات جریان های گل آلود می باشد. در صورتی که عدد رینولدز بیش از ۲۰۰۰ باشد جریان آشفته بوده و اختلاط در راستای مرز مشترک شاره چگال و سیال محیطی روی خواهد داد. عدد رینولدز در جریان چگال مصورت رابطه (۳) بیان می گردد که در این فرمول u سرعت متوسط در راستای جریان، d ضخامت جریان و ν ویسکوزیته سینماتیکی است.

رابطه (۱)

رابطه (۲)

رابطه (۳)

رابطه (۴)

جدول ۲- مقادیر ورودی جریان چگال به فلوم

Table 2-The inlet value of the density current to the flume

Model. No	Run Number	S (%)	ρ_0 (kg/m ³)	ρ (kg/m ³)	g' (m/s ²)	Q (L/min)	u (m/s)	Ri ₀
1	1	1	998.7	1005	0.062	50	0.2381	0.01091
1	2	2	998.7	1005	0.062	50	0.2381	0.01091
1	3	3	998.7	1005	0.062	50	0.2381	0.0109
1	4	1	998.7	1008	0.091	50	0.2381	0.01611
1	5	2	998.7	1008	0.091	50	0.2381	0.0161
1	6	3	998.7	1008	0.091	50	0.2381	0.01609
1	7	1	998.7	1005	0.062	90	0.4286	0.00337
1	8	2	998.7	1005	0.062	90	0.4286	0.00337
1	9	3	998.7	1005	0.062	90	0.4286	0.00336
1	10	1	998.7	1008	0.091	90	0.4286	0.00497
1	11	2	998.7	1008	0.091	90	0.4286	0.00497
1	12	3	998.7	1008	0.091	90	0.4286	0.00496

ادامه جدول ۲- مقادیر ورودی جریان چگال به فلوم

Table 2-The inlet value of the density current to the flume

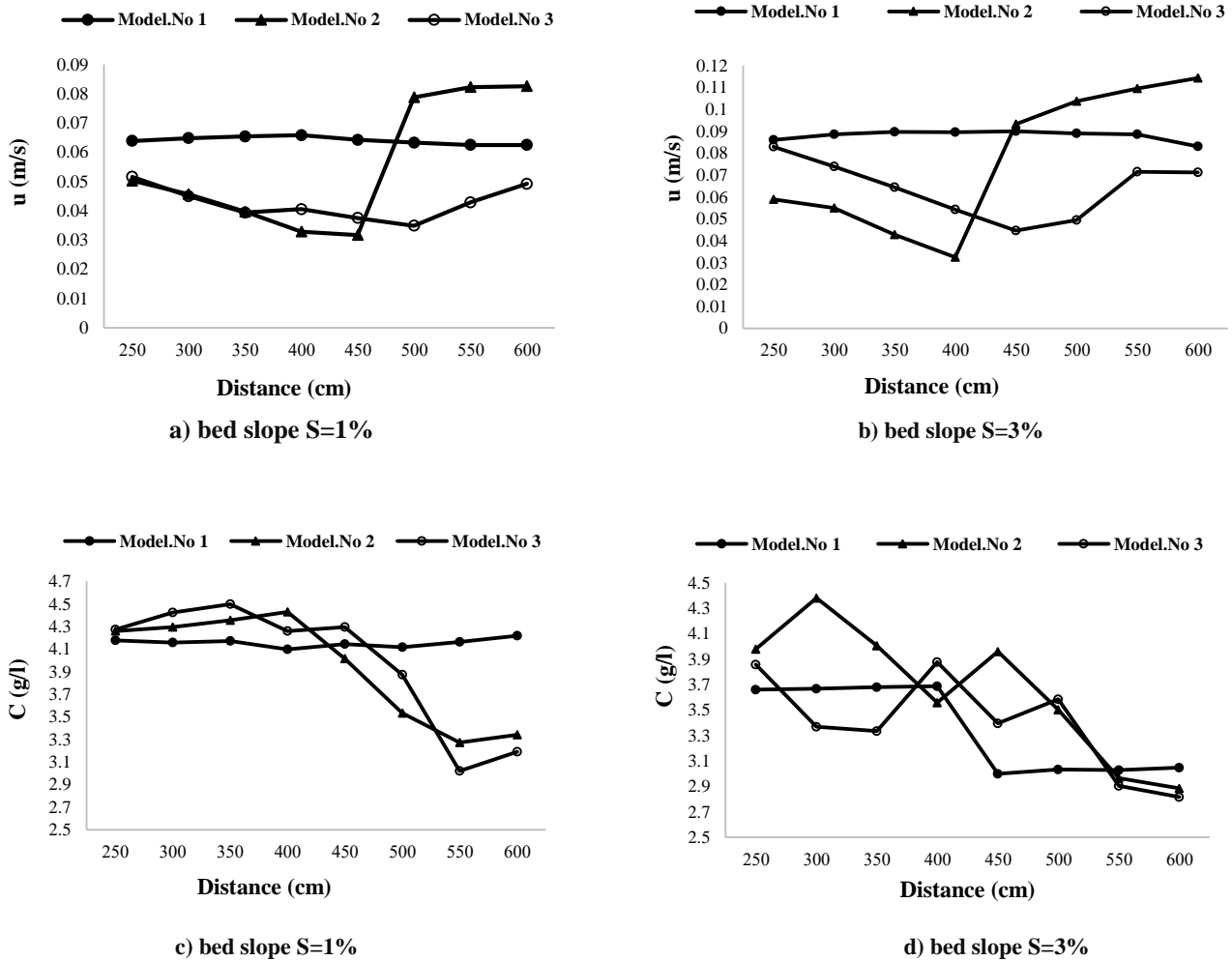
Model. No	Run Number	S (%)	ρ_0 (kg/m ³)	ρ (kg/m ³)	g' (m/s ²)	Q (L/min)	u (m/s)	Ri ₀
2	13	1	998.7	1005	0.062	50	0.2381	0.01091
2	14	3	998.7	1005	0.062	50	0.2381	0.0109
2	15	1	998.7	1008	0.091	50	0.2381	0.01611
2	16	3	998.7	1008	0.091	50	0.2381	0.01609
2	17	1	998.7	1005	0.062	90	0.4286	0.00337
2	18	3	998.7	1005	0.062	90	0.4286	0.00336
2	19	1	998.7	1008	0.091	90	0.4286	0.00497
2	20	3	998.7	1008	0.091	90	0.4286	0.00496
3	21	1	998.7	1005	0.062	50	0.2381	0.01091
3	22	3	998.7	1005	0.062	50	0.2381	0.0109
3	23	1	998.7	1008	0.091	50	0.2381	0.01611
3	24	3	998.7	1008	0.091	50	0.2381	0.01609
3	25	1	998.7	1005	0.062	90	0.4286	0.00337
3	26	3	998.7	1005	0.062	90	0.4286	0.00336
3	27	1	998.7	1008	0.091	90	0.4286	0.00497
3	28	3	998.7	1008	0.091	90	0.4286	0.00496

۳. نتایج

از ۱٪ به ۳٪ تاثیر این مقادیر بیشتر می‌گردد. با دبی ورودی ۹۰ L/min و چگالی ورودی ۱۰۰۵ kg/m³ در مدل شماره ۱ با افزایش شیب از ۱٪ به ۳٪، سرعت و غلظت به ترتیب ۳۰٪ افزایش و ۲۴٪ کاهش می‌یابد و در مدل شماره ۲ با افزایش شیب از ۱٪ به ۳٪، سرعت و غلظت به ترتیب ۲۳٪ افزایش و ۱۰٪ کاهش می‌یابد و همچنین در مدل شماره ۳ با افزایش شیب از ۱٪ به ۳٪، سرعت و غلظت به ترتیب ۵۵٪ افزایش و ۱۸٪ کاهش می‌یابد. علت کاهش غلظت در مدل ۲ و ۳ به دلیل وجود موانع در بدنه جریان چگال می‌باشد. در جدول شماره ۳ بطور کلی برای همه مدلها، مقادیر جریان در فاصله بعد از ۴/۵ m از دریچه ورودی اندازه گیری شده است. در مدل شماره ۲، سرعت جریان چگال ۴۲٪ نسبت به مدل شماره ۱ افزایش و غلظت آن ۳۰٪ کاهش یافته است همچنین در مدل شماره ۳، سرعت جریان چگال ۳۱٪ نسبت به مدل شماره ۱ افزایش و غلظت آن ۵۴٪ کاهش یافته است. بیشترین رنج تغییرات سرعت و غلظت مربوط به مدل شماره ۲ و کمترین آن مربوط به مدل شماره ۳ می‌باشد.

سرعت و غلظت جریان چگال در فواصل مختلف از کانال برداشته شد. از آنجایی که عبور جریان گل آلود از زیر دریچه ورودی باعث ایجاد یک پرش هیدرولیکی متناسب با دبی ورودی جریان ایجاد می‌شود و به دلیل ناپایداری‌هایی که در ابتدای فلوم قرار دارند، موقعیت شروع اندازه گیری جریان در فاصله ۲/۵ m از دریچه ورودی در نظر قرار گرفت تا شرایط نیمه پایداری ایجاد شود. در مدل‌های ۲ و ۳ در فاصله ۴/۵ m از دریچه ورودی موانعی به صورت موضعی و ممتد در نظر گرفته شده است. نمودارهای مکانی غلظت و سرعت جریان چگال برای همه مدل‌ها با میزان دبی ورودی ۹۰ L/min و چگالی ورودی ۱۰۰۵ kg/m³ در شکل ۳ نشان داده شده است. مقدار u سرعت جریان غلیظ بر حسب m/s و مقدار C غلظت جریان چگال بر حسب g/l می‌باشد.

مقادیر اندازه گیری از بدنه جریان چگال برداشته شده است. در شکل (a) تا (d) ۳ بعد از تنگ شدگی بدنه فلوم، سرعت جریان چگال ناگهانی افزایش و غلظت آن کاهش می‌یابد، با افزایش شیب



شکل ۳- نمودارهای سرعت و غلظت جریان چگال نسبت به مکان در همه مدل ها ($Q=90 \text{ L/min}$, $\rho=1005 \text{ kg/m}^3$)

Fig. 3- The velocity and concentration of the density current in relation to the location in all models ($Q = 90 \text{ L/min}$, $\rho = 1,005 \text{ kg/m}^3$)

جدول ۳- رنج تغییرات غلظت و سرعت در همه مدل ها

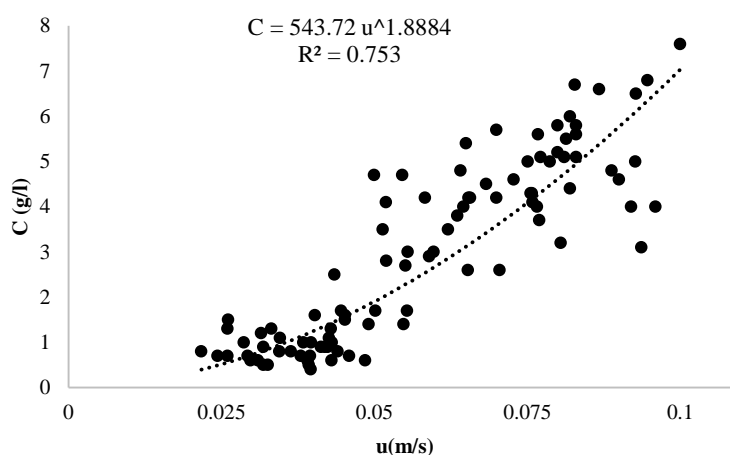
Table 3- The range of the concentration and velocity variations in all models

Series	Initial condition			variation range			
	Q (L/min)	ρ (kg/m ³)	S %	u (m/s)		C (g/l)	
				min	max	min	max
Model.No (1)	50~90	1005~1008	1~2~3	0.0155	0.1035	3.001	6.517
Model.No (2)	50~90	1005~1008	1~3	0.0193	0.1343	2.884	6.585
Model.No (3)	50~90	1005~1008	1~3	0.0145	0.0938	2.789	6.483

دریچه ورودی می باشد و نمودارها بطور کلی نشان می دهد که هر چه عدد ریچارسون افزایش یابد، شدت اختلاط آن کاهش می یابد. در شکل (b) ۵ رنج تغییرات شدت اختلاط، ۷/۷ برابر مدل شماره ۱ و در شکل (c) ۵ محدوده تغییرات شدت اختلاط، ۵/۸ برابر مدل شماره ۱ است که نشان می دهد تنگ شدگی در بدنه کانال باعث افزایش شدت اختلاط می گردد. همچنین محدوده تغییرات شدت اختلاط در مدل شماره ۲ با تنگ شدگی ممتد، ۱/۳۲ برابر مدل شماره ۳ با تنگ شدگی موضعی می باشد. با بررسی کلی هر ۳ مدل در شکل (d) ۵، عدد ریچاردسون ارتباط معناداری با شدت اختلاط برقرار نموده که همبستگی ۰/۸۵۸ را به خود اختصاص داده است. روابط دقیق تر در جدول شماره ۴ نشان داده شده است.

شکل ۴، سرعت و غلظت جریان چگال را در تمامی مقاطع کانال مورد مقایسه قرار داده است. این نمودار نشان می دهد که عامل سرعت و غلظت در طول کانال با تغییر پارامترهای هیدرولیکی جریان چگال، همبستگی نسبتاً خوبی (با ضریب تعیین ۰/۷۵۳) برقرار نموده است.

فصل مشترک جریان مهم ترین ناحیه از نظر هیدرودینامیک جریان می باشد. گردابه ها ناشی از حرکت دو سیال مختلف با دو سرعت متفاوت در این ناحیه ایجاد شده و سیال سبکتر بالائی را به درون جریان گل آلود می کشاند. به این ترتیب جریان گل آلود رقیق شده و از سرعت و غلظت متوسط آن بتدریج کاسته می شود. این امر به نوبه خود باعث کاهش اغتشاشات شده و از درون آمیختگی می کاهد. در شکل ۵ موقعیت برداشت در فاصله ۵ m از



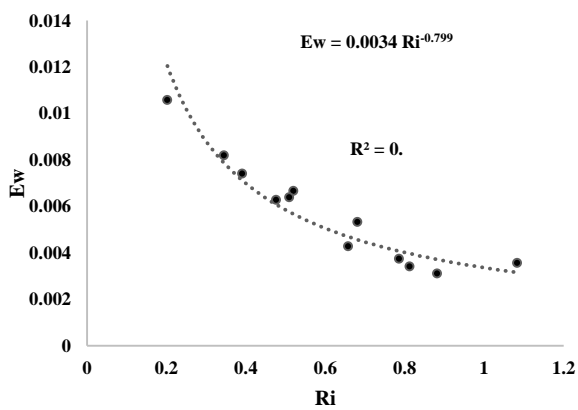
شکل ۴- ارتباط سرعت و غلظت جریان چگال در طول کل فلوم برای همه مدل ها

Fig. 4- The relationship between the velocity and the concentration of the density current along the entire flume for all models

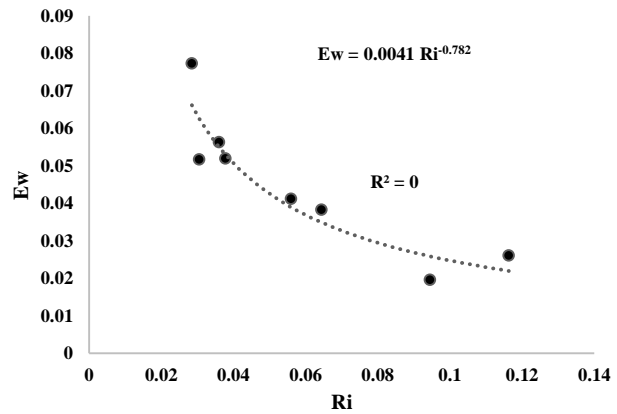
جدول ۴- روابط معنادار بین عدد ریچارسون و شدت اختلاط در فاصله ۵ متری از دریچه ورودی

Table 4- The significant relationship between Richardson number and the entrainment ratio at a distance of 5m from the inlet gate

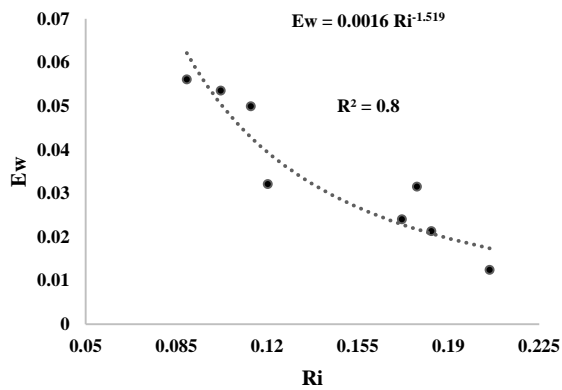
Series	Relationships	Correlation
Model.No 1	$E_w=0.0034 Ri^{-0.799}$	$R^2=0.901$
Model.No 2	$E_w=0.0041 Ri^{-0.782}$	$R^2=0.868$
Model.No 3	$E_w=0.0016 Ri^{-1.519}$	$R^2=0.826$
Total Models	$E_w=0.0042 Ri^{-0.844}$	$R^2=0.858$



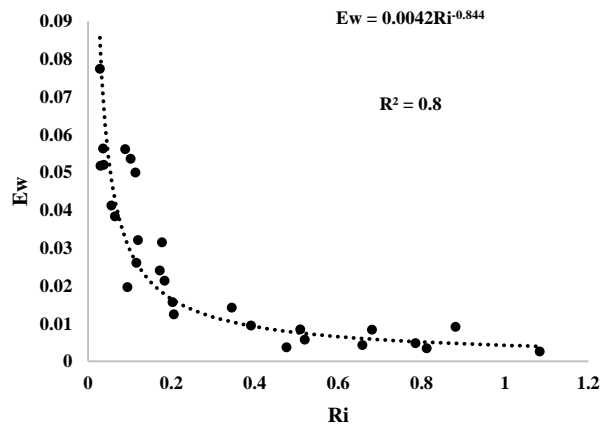
a) Model No. 1



b) Model No. 2



c) Model No. 3



d) همه مدل‌ها

شکل ۵- نمودار عدد ریچاردسون به شدت اختلاط در موقعیت ۵m از دریچه ورودی

Fig. 5- The Richardson number to the entrainment ratio at a distance of 5m from the inlet gate

شدت اختلاط کاسته شده است؛ به طوری که با افزایش ۲۰ درصدی عدد ریچاردسون، میزان شدت اختلاط ۴۵ درصد کاهش می یابد که در شکل (c) ۶ مشاهده می شود. همچنین برای اکثر داده‌ها ریچاردسون در محدوده ۰/۱ تا ۱۰ مشاهده می شود و خطای کار مطالعاتی با کار سایر پژوهشگران به میزان ۹٪ می باشد. همچنین پراکنده نبودن داده‌ها در نمودار ریچاردسون - شدت اختلاط، انتخاب صحیح و هوشمندانه آنها را نشان می دهد و نشان دهنده این است که تاثیرات افزایش دبی یا چگالی ورودی بر رفتار جریان اثر گذار است.

پروفیل سرعت برای کلیه آزمایشات در تمامی مدل‌ها در موقعیت ۵ m از دریچه ورودی اندازه گیری شده است. در شکل (a) 7 و (b) 7 پروفیل سرعت و غلظت جریان با دبی ورودی ۹۰ L/min، چگالی ورودی ۱۰۰۵ kg/m³ و شیب ۳٪ در تمامی

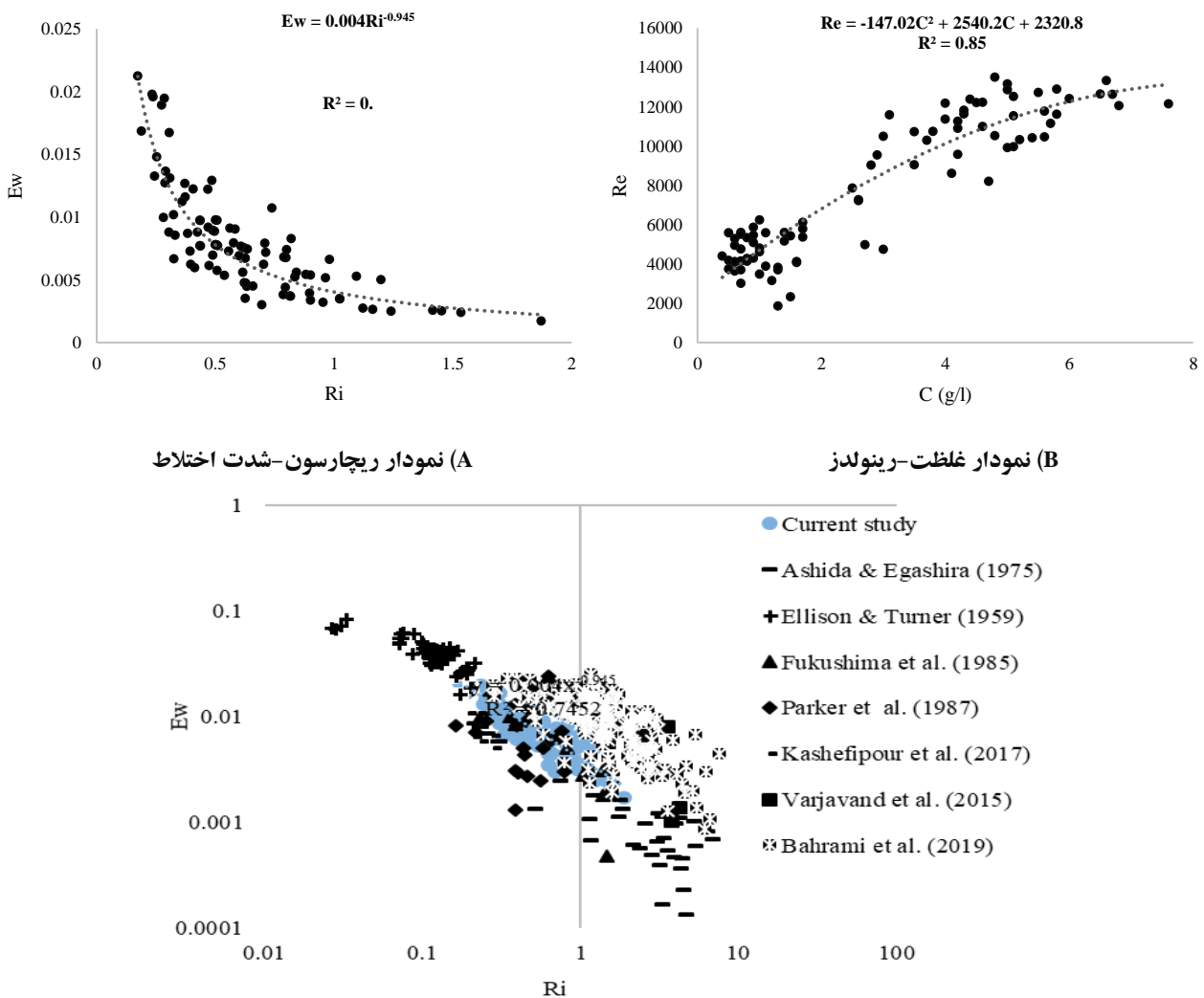
رفتار یک جریان گل آلود بستگی کامل به اعداد ریچاردسون و رینولدز دارد. در اعداد رینولدز بالا به دلیل ناپایداری شدیدی که در ابتدای کانال بوجود می آید درون آمیختگی زیاد بوده و باعث افزایش ناگهانی ارتفاع می شود. با افزایش ارتفاع جریان چگال ، سرعت کاهش یافته و عدد ریچاردسون را نیز افزایش می دهد.

شکل ۶ برای تمامی مدل‌ها در ۸ مقطع بررسی شده است. در شکل (b) ۶ با افزایش غلظت جریان چگال، اعداد رینولدز بیشتر شده و جریان آشفته تر می شود و به مراتب باعث می شود تا شدت اختلاط افزایش و عدد ریچاردسون کاهش یابد. شکل (a) ۶ نشان می دهد بیشترین تجمع اعداد ریچاردسون در محدوده $0.45 < Ri < 1$ است و بهترین همبستگی برای کل داده‌ها (۰/۷۴) را به خود اختصاص می دهد. بررسی عدد ریچاردسون با نتایج تحقیق دیگر پژوهشگران نشان می دهد که با افزایش عدد ریچاردسون از میزان

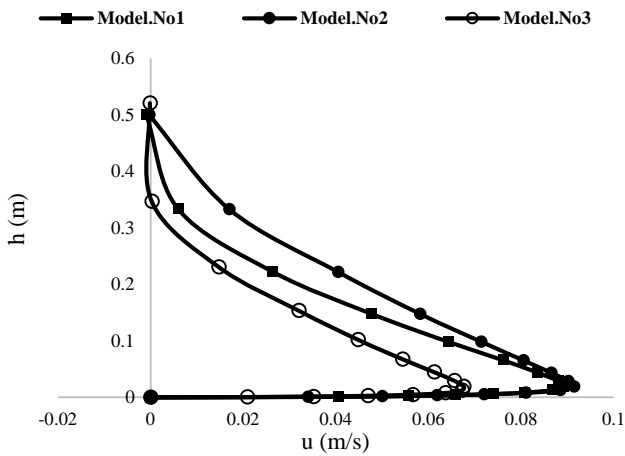
پروفیل سرعت را برای همه مدل‌ها، می‌توان به شکل مناسبی به وسیله یک پروفیل بی‌بعد، نمایش داد. بدنه جریان غلیظ را می‌توان به دو ناحیه دیوار و جت تقسیم نمود (Altinakar, 1990). در در شکل ۸ یک لایه زیرین (ناحیه دیوار) که از بستر تا محل وقوع سرعت ماکزیمم امتداد دارد و لایه بیرونی (ناحیه جت) که از ارتفاع سرعت ماکزیمم آغاز شده و تا مرز جریان غلیظ و سیال پیرامون امتداد می‌یابد، نشان داده شده است. پروفیل‌های سرعت بی‌بعد شده در ناحیه جت جریان پراکندگی بیشتری را نشان می‌دهند که این موضوع به واسطه رفتار غیر دائمی جریان در این ناحیه می‌باشد و سرعت جریان در ناحیه جت نسبت به ناحیه دیوار ۲۶٪ کاهش یافته است. محدوده تغییرات ارتفاعی در ناحیه دیوار بین صفر تا یک و ناحیه جت بین صفر تا ۵/۵ می‌باشد. روابط ۵ و ۶ مربوط به این دو ناحیه در ادامه آورده شده است (Altinakar, 1990).

مدل‌ها نشان داده شده است. الگوی تشکیل پروفیل جریان، ملایم و نرم بوده که در جریان‌های زیر بحرانی یا جریان‌هایی با غلظت کم که دارای نرخ رسوبگذاری پایینی هستند و درون آمیختگی جریان کم است، مشاهده می‌گردد.

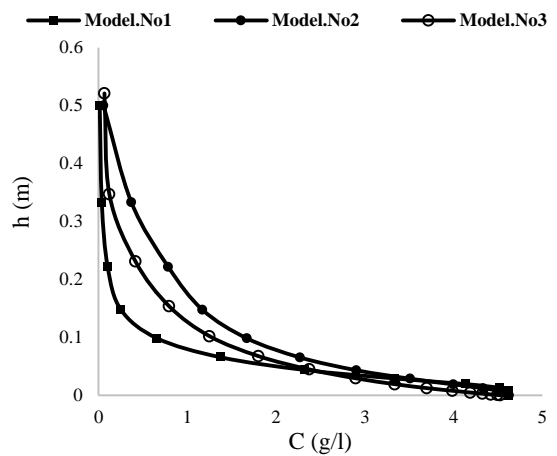
در اشکال (c) و (d) الگوی پروفیل سرعت و غلظت در اثر تغییر چگالی نشان داده شده است و نمایانگر آن است که با افزایش چگالی، الگوی پروفیل سرعت جریان افزایش می‌یابد و نمودار سرعت و غلظت، الگوی ملایم‌تر و خوابیده‌تری نسبت به چگالی 1005 kg/m^3 به خود می‌گیرد. به طور کلی با تغییر چگالی از 1005 kg/m^3 به 1008 kg/m^3 ، الگوی پروفیل سرعت ۲۱٪ افزایش و پروفیل غلظت ۳۹٪ افزایش می‌یابد.



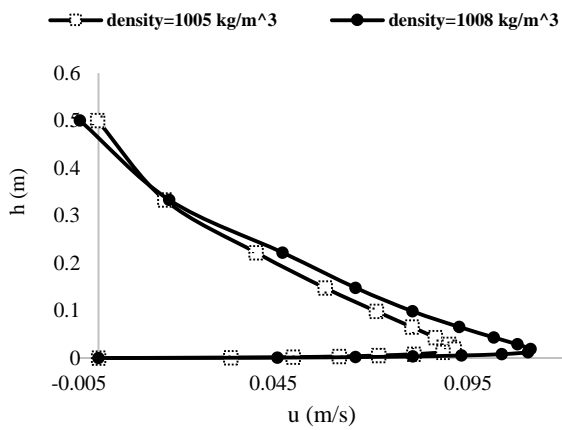
شکل ۶ - نمودار آزمایشات جریان چگال مدل‌ها در همه مقطع‌ها
 Fig. 6- The experiments of the density current of the models at all positions



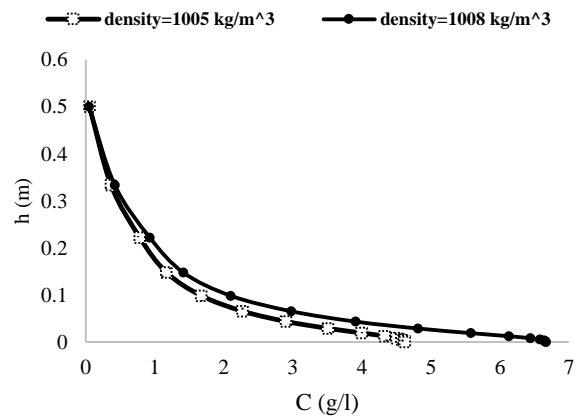
a) $Q=90 \text{ L/min}, \rho=1005 \text{ kg/m}^3, S=3\%$



b) $Q=90 \text{ L/min}, \rho=1005 \text{ kg/m}^3, S=3\%$



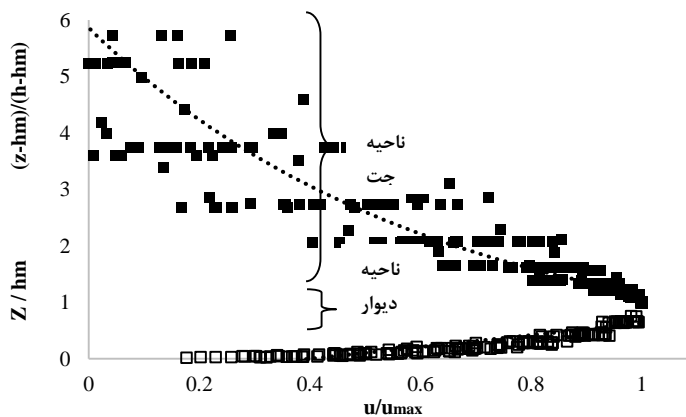
c) Model. No2 ($Q=90 \text{ L/min}, S=3\%$)



d) Model. No 2 ($Q=90 \text{ L/min}, S=3\%$)

شکل ۷- الگوی پروفیل غلظت و سرعت جریان چگال در موقعیت 5m در پیچه ورودی

Fig. 7- The profile pattern of the concentration and density current velocity in a distance of 5m from inlet gate



شکل ۸- پروفیل سرعت بی بعد کلیه مدل ها در همه مقطع ها

Fig. 8- The dimensionless velocity profile for all models at all positions

$$\frac{u}{u_{max}} = \left(\frac{z}{h_m}\right)^{1/n} \quad \text{رابطه (۵)}$$

$$\frac{u}{u_{max}} = \exp\left[-\alpha\left(\frac{z-h_m}{h-h_m}\right)^\beta\right] \quad \text{رابطه (۶)}$$

در روابط ۵ و ۶ u_{max} سرعت ماکزیمم جریان غلیظ، h_m ارتفاع نظیر متناظر سرعت ماکزیمم، u سرعت های جریان چگال در ارتفاعی کانال، z ارتفاع متناظر با سرعت ها در کانال و h ارتفاع متوسط جریان چگال می باشد. در شکل ۸ نمودار سرعت بی بعد برای همه مدل ها ترسیم شده است. ضریب همبستگی داده های بی بعد سرعت در ناحیه جت ۰/۸۸ و در ناحیه دیوار ۰/۹۶ می باشد. در ناحیه دیوار، ضریب n برابر ۳/۸۶ و ناحیه جت ضریب α برابر ۰/۴۱ و ضریب β برابر ۱/۳۴ می باشند.

۵. سپاسگزاری

بدین وسیله از آقای دکتر بنان رئیس محترم دانشکده عمران شیراز، جناب آقای نیاکام مسئول محترم آزمایشگاه آب و هیدرولیک و هیئت داوران که ما را در انجام و ارتقاء کیفی این پژوهش یاری نموده اند، تشکر و قدردانی را می نمایم.

۶. علائم و نشانه ها:

$$\rho = \text{دانسیتة جریان غلیظ (kg/m}^3\text{)}$$

$$\rho_0 = \text{دانسیتة آب (kg/m}^3\text{)}$$

$$g = \text{شتاب ثقل}$$

$$C = \text{غلظت جریان چگال (g/l)}$$

$$g' = \text{شتاب کاهش ثقل}$$

$$d = \text{ضخامت جریان چگال}$$

$$\theta = \text{شیب کف فلوم}$$

$$R_i = \text{عدد ریچاردسون}$$

$$Re = \text{عدد رینولدز}$$

$$E_w = \text{شدت اختلاط جریان غلیظ}$$

$$S = \text{درصد شیب کف کانال}$$

$$u = \text{سرعت متوسط در جهت x}$$

$$U = \text{ویسکوزیته سینماتیک}$$

$$h = \text{ضخامت متوسط جریان چگال}$$

$$B = \text{عرض مقطع جریان چگال}$$

$$Q = \text{دبی (L/min)}$$

$$\Delta Q = \text{تفاضل دبی جریان غلیظ}$$

$$u_{max} = \text{سرعت ماکزیمم جریان چگال}$$

$$h_m = \text{ارتفاع نظیر سرعت ماکزیمم}$$

$$z = \text{کانتورهای ارتفاعی در کانال}$$

$$h = \text{ارتفاع متوسط جریان چگال}$$

۴. بحث و نتیجه گیری

در این مطالعه، سعی بر آن شد که خصوصیات هیدرولیکی جریان چگال در اثر تنگ شدگی ممتد و موضعی در دیوار فلوم مورد بررسی قرار گیرد. به طور کلی نتایج برای همه آزمایشات نشان داد که با تنگ شدگی ممتد دیواره فلوم، سرعت و غلظت جریان چگال به ترتیب ۴۲٪ افزایش و ۳۰٪ کاهش نسبت به فلوم ساده داشته است. همچنین در اثر تنگ شدگی موضعی، سرعت و غلظت جریان چگال به ترتیب ۳۱٪ افزایش و ۵۴٪ کاهش یافته است. با افزایش شیب کف کانال از ۱٪ به ۳٪، غلظت جریان چگال بعد از تنگ شدگی ممتد و موضعی به ترتیب ۱۲٪ و ۱۹٪ کاهش یافته است. در فاصله ۵ m از دریچه ورودی، وجود تنگ شدگی ممتد و موضعی باعث شده است که عدد ریچاردسون ۸۰٪ کاهش و شدت اختلاط ۵ برابر افزایش یابد. هر چه دیوار فلوم تنگ تر شود، میزان شدت اختلاط بیشتر می شود. با افزایش غلظت جریان چگال در طول فلوم، عدد رینولدز جریان افزایش می یابد. در طول کل فلوم برای همه مدل ها، عدد ریچاردسون توانست با شدت اختلاط جریان، همبستگی خوبی به میزان ۷۵۴/۰ برقرار کند. همچنین با افزایش ۲۰ درصدی عدد ریچاردسون میزان شدت اختلاط جریان ۴۵ درصد کاهش می یابد. در اثر تنگ شدگی ممتد فلوم، با تغییر چگالی از 1005 kg/m^3 به 1008 kg/m^3 ، الگوی پروفیل سرعت ۲۱٪ افزایش و پروفیل غلظت ۳۹٪ افزایش می یابد. همچنین پروفیل سرعت بی بعد شده در ناحیه جت جریان، پراکندگی بیشتری دارد که به دلیل رفتار غیر دائمی جریان در این ناحیه است و سرعت جریان در ناحیه جت نسبت به ناحیه دیوار ۲۶٪ کاهش یافته است. کل داده ها در ناحیه جت و دیوار همبستگی خوبی به ترتیب به میزان ۰/۸۸ و ۰/۹۶ یکدیگر برقرار نمودند.

References:

- Altinakar, S., Graf, W.H. and Hopfinger, E.J., 1990. Weakly depositing turbidity current on a small slope. *Journal of Hydraulic research*, 28(1), pp.55-80. DOI: 10.1080/00221689009499147.
- Asghari Pari, S.A., Kashefipour, S.M. and 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), pp.1080-1092. DOI: 10.1080/19648189.2016.1144537.
- ASHIDA, K. and EGASHIRA, S., 1975, May. Basic study on turbidity currents. In *Proceedings of the Japan Society of Civil Engineers* (Vol. 1975, No. 237, pp. 37-50). Japan Society of Civil Engineers. DOI: 10.2208/jscej1969.1975.237_37.
- Bahrami, H., Ghomeshi, M., Kashefi Por, S.M. and Salehi Neyshabouri, S.A.A., 2017. Investigation of characteristics of density current because of regime changes. *Journal of Marine Science and Technology*, 16(1), pp. 112-121. DOI: 10.22113/jmst.2017.7773.1390. (In Persian).
- Bahrami, H., Ghomeshi, M., Kashefi Por, S.M. and Salehi Neyshabouri, S.A.A., 2019. Investigation of the effect of various factors on density currents entrainment. *Journal of Marine Science and Technology*, 18(1), pp.1-9. DOI: 10.22113/jmst.2018.7776.1391. (In Persian).
- Chamoun, S., De Cesare, G. and Schleiss, A., 2016. Experimental investigation on turbidity current venting under restrained outflow discharges. *Proceedings of River Flow 2016*, (CONF), pp.1435-1441. DOI: 10.1201/9781315644479-227.
- Cortés, A., Rueda, F.J. and Wells, M.G., 2014. Experimental observations of the splitting of a gravity current at a density step in a stratified water body. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 119(2), pp.1038-1053. DOI: 10.1002/2013JC009304.
- Ezz, H., Cantelli, A. and Imran, J., 2013. Experimental modeling of depositional turbidity currents in a sinuous submarine channel. *Sedimentary Geology*, 290, pp.175-187. DOI: 10.1016/j.sedgeo.2013.03.017.
- Fathi-Moghadam, M., Poudeh, H.T., Ghomeshi, M. and Shafaei, M., 2008. The density current head velocity in expansion reaches. *Lakes & Reservoirs: Research & Management*, 13(1), pp.63-68. DOI: 10.1111/j.1440-1770.2007.00351.x.
- Fukushima, Y., Parker, G. and Pantin, H.M., 1985. Prediction of ignitive turbidity currents in Scripps Submarine Canyon. *Marine Geology*, 67(1-2), pp.55-81. DOI: 10.1016/0025-3227(85)90148-3.
- Firoozabadi, B. and Mahdinia, M., 2013. 2D numerical simulation of density currents using the SPH projection method. *European Journal of Mechanics-B/Fluids*, 38, pp.38-46. DOI: 10.1016/j.euromechflu.2012.10.004.
- Ghomeshi, M. and Hashemi, L., 2018. Experimental Investigation of Separation Angle of Interflow Dense Current from Bed. *International Journal of Engineering and Technology (IJET)*, 10(4), pp.1005-1010. DOI: 10.22034/JMEUT.2020.9996. (In Persian).
- Haghiabi, A.H., 2004. The study of bed slope effect on velocity and concentration profiles of density currents. *Water Engineering. Ahvaz: Shahid Chamran University*, 270. (In Persian).
- Kashefipour, S.M., Daryae, M. and Ghomeshi, M., 2018. Effect of bed roughness on velocity profile and water entrainment in a sedimentary density current. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 45(1), pp.9-17. DOI: 10.1139/cjce-2016-0490.
- Kordnaeij, M., Asghari Pari, S., Sajjadi, S. and Shafai Bajestan, M., 2018. Laboratory Investigation the effect of porosity obstacle and stepped porosity obstacle on control of gravity current', *Journal of Marine Science and Technology*, 16(4), pp.86-96. DOI: 10.22113/jmst.2018.29533.1682. (In Persian).
- Lee, F.Z., Lai, J.S., Tan, Y.C. and Sung, C.C., 2014. Turbid density current venting through reservoir outlets. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 18, pp.694-705. DOI: 10.1007/s12205-014-0275-y.
- Parker, G., Garcia, M., Fukushima, Y. and Yu, W., 1987. Experiments on turbidity currents over an erodible bed. *Journal of Hydraulic Research*, 25(1), pp.123-147. DOI: 10.1080/00221688709499292.
- Peakall, J. and Sumner, E.J., 2015. Submarine channel flow processes and deposits: A

- process-product perspective. *Geomorphology*, 244, pp.95-120. DOI: 10.1016/j.geomorph.2015.03.005.
- Bolla Pittaluga, M. and Imran, J., 2014. A simple model for vertical profiles of velocity and suspended sediment concentration in straight and curved submarine channels. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 119(3), pp.483-503. DOI: 10.1002/2013JF002812.
- Ramos-Villanueva, M., 2016. *Experimental study of reservoir turbidity currents venting* (Doctoral dissertation, University of Illinois at Urbana-Champaign).
- Shringarpure, M., Cantero, M.I. and Balachandar, S., 2015. Analysis of turbulence suppression in sediment-laden saline currents. *Procedia Engineering*, 126, pp.16-23. DOI: 10.1016/j.proeng.2015.11.170.
- Straub, K.M., Mohrig, D., Buttles, J., McElroy, B. and Pirmez, C., 2011. Quantifying the influence of channel sinuosity on the depositional mechanics of channelized turbidity currents: A laboratory study. *Marine and Petroleum Geology*, 28(3), pp.744-760. DOI: 10.1016/j.marpetgeo.2010.05.014.
- Varjavand, P., Ghomeshi, M., Dalir, A.H., Farsadizadeh, D. and Gorgij, A.D., 2015. Experimental observation of saline underflows and turbidity currents, flowing over rough beds. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 42(11), pp.834-844. DOI: 10.1139/cjce-2014-0537.
- Yeh, T.H., Cantero, M., Cantelli, A., Pirmez, C. and Parker, G., 2013. Turbidity current with a roof: Success and failure of RANS modeling for turbidity currents under strongly stratified conditions. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 118(3), pp.1975-1998. DOI: 10.1002/jgrf.20126.



Available Online: <http://jmst.kmsu.ac.ir>

Original Article



Experimental Study of Density Current Due to suddenly Narrowing of Flume Wall

Mohammad Hosseini ¹, Mohammad Hadi Fattahi ^{*2}, Saeid Eslamian ³

1. Department of Civil Engineering, Ghirokarzin Center, Firoozabad Branch, Islamic Azad University, Firoozabad, Iran.

2. Department of Civil Engineering, Marvdasht Branch, Islamic Azad University, Marvdasht, Iran.

3. Department of Water Engineering, College of Agriculture, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran.

Corresponding author: fattahi.mh@gmail.com

Received: 11 July 2020

Revise Date: 12 October 2020

Accepted: 28 October 2020

DOI: 10.22113/JMST.2020.236659.2381

Abstract

The density current, as a part of the gravity currents, is the flow of one fluid within another caused by the density difference between two fluids. The density current consists of the nose, head, and body regions within the ambient fluid. In the present study, a flume with 8m length, 35cm width, and 40cm height was used. The experiments were performed in 28 different states by changing the bed slope, density, and discharge. The results indicated that by increasing the bed slope, the concentration of the density current decreased by 12% and 19% after continuous and local narrowing, respectively, compared to the non-narrowing state. Further, the entrainment ratio increased by narrowing the flume wall, as the Richardson number decreased by 80% and the entrainment ratio increased by 5 times after narrowing. In addition, the profile formation pattern of the current velocity and concentration enhanced by increasing the inlet density and the pattern indicated more scattering in the jet region compared to the wall region.

Keyword: Density Current, Continuous and local narrowing, Richardson Number, Entrainment ratio, Jet region

Copyrights:

Copyright for this article is retained by the author(s), with publication rights granted Journal of Marine Science and Technology. This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0>), which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

