

## بررسی عددی فراسنجه‌های هیدرولیکی جریان غلیظ در اثر انحنای بدنه کانال

محمد حسینی<sup>۱\*</sup> و محمدهادی فتاحی<sup>۲</sup>

۱- گروه مهندسی عمران، مرکز قیروکارزین، دانشگاه آزاد اسلامی، قیروکارزین، ایران

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

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۲/۲؛ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۳/۱۲

### چکیده

جریان‌های غلیظ گونه‌ای از جریان‌های ثقلی هستند که اختلاف کمی در دانسیته سیال محیطی دارند و همواره با درون آمیختگی با سیال محیطی همراه اند. میزان درون آمیختگی در فصل مشترک و شدت توربولانس به پایداری فصل مشترک بستگی دارد. هرچه فصل مشترک پایدارتر باشد، درون آمیختگی و شدت آشفتگی جریان کمتر است. در این تحقیق، سعی شده است که با استفاده از نرم افزار دینامیک سیالات محاسباتی به خصوصیات جریان غلیظ در انحنای کانال پرداخته شود. سه مدل با انحنای ۱۸۰ درجه و انحنای سینوسی محدود و سینوسی سیلاب دشتی شبیه‌سازی شده است. با تغییر عدد فرود، شیب و غلظت ورودی، جریان غلیظ مدل سازی برای تمامی مدل‌ها صورت گرفت. هدف از این مطالعه تاثیر انحنای بر خصوصیات هیدرولیکی جریان چگال است. نتایج بررسی‌ها نشان داد مدل آشفتگی بهینه برای تمامی مدل‌ها، مدل k-ε از نوع RNG است. افزایش شیب کف کانال از ۲/۰ درصد به ۲ درصد موجب کاهش ضخامت جریان گل آلود در طول کانال می‌شود، که در نتیجه آن سرعت جریان افزایش نشان می‌دهد. با افزایش عدد فرود ورودی از ۱/۲۲ به ۸، در مدل با انحنای ۱۸۰ درجه به ترتیب الگوی پروفیل غلظت نسبت به مدل‌های سینوسی محدود و سیلاب دشتی به میزان ۱۹ درصد و ۲۱/۳ درصد کاهش می‌یابد، داده‌های ریچاردسون و شدت اختلاط در مدل با انحنای ۱۸۰ درجه نسبت به مدل آزمایشگاهی ۱۰ درصد افزایش یافتند. با بررسی کلی هر سه مدل عدد ریچاردسون نسبت به شدت اختلاط، ارتباط معناداری با ضریب ۷۱/۰ نشان داده است. همچنین با افزایش شدت اختلاط و غلظت جریان، اعداد رینولدز بیشتر و جریان آشفته‌تر می‌شود و عدد ریچاردسون کاهش یابد.

### واژه‌های کلیدی

جریان غلیظ، دینامیک سیالات محاسباتی، مدل k-ε از نوع RNG، شدت اختلاط، عدد ریچاردسون

### مقدمه

آب صاف باعث ایجاد لایه برشی در فصل مشترک آب صاف و سیال چگال می‌شود. از این رو در فصل مشترک، برش و گردابه‌های فراوانی به وجود می‌آید و همین امر باعث درون آمیختگی آب صاف و سیال چگال می‌شود. درون آمیختگی میزان اختلاف چگالی را کم می‌کند و از نیروی شناوری می‌کاهد.

اختلاف دانسیته باعث ایجاد جریان چگال می‌شود. جریان چگال حرکت پیشانی، بدنه و دنباله‌ای از سیال سنگین به درون سیال سبک‌تر است و نیروی شناوری یا نیروی ثقل باعث ایجاد نیروی جلوبرنده می‌شود. حرکت جریان چگال در زیر

پرداختند. مدل آنها حوضچه ای به درازای ۵ متر، پهنای ۵ متر، و بلندی ۱/۲ متر که سیلاب دشت آن است و کانال سینوسی به عرض ۲۰ و عمق ۱۱ سانتی متر است. مطالعات آزمایشگاهی جریان غلیظ نمکی در یک کانال با انحنای بسیار زیاد با اعداد متفاوت فرود توسعه دادند. افزایش عدد فرود جریان، سرعت و غلظت جریان چگال در ناحیه انحنا را افزایش می‌دهد. پکال و همکاران (Peakall & Keevil, 2007) به فرضیه انحنا، معماری رسوب، و نقش چسبندگی در کانال‌های سینوسی شکل با مطالعه آزمایشگاهی پرداخته اند. چوی و گارسیا (Choi & Garcia, 2001) با استفاده از شبیه‌سازی دوبعدی، جریان چگال تحت تاثیر شیب بستر را با انتخاب مدل آشفتگی  $k-\varepsilon$  بررسی کردند. پکال و همکاران (Peakall & Keevil, 2006) ساختار جریان را در کانال‌های پیچان رود سینوسی بررسی و طی آزمایش‌هایی پارامترهای سرعت و آشفتگی را در کانال‌های پیچان رود مطالعه کرده اند. هر چه شبکه بندی در مدل عددی ریزتر باشد، تحلیل واقع بینانه‌تری از مدل آزمایشگاهی به دست می‌آید. همچنین مدل آشفتگی  $k-\varepsilon$  از نوع RNG نسبت به بقیه مدل‌ها در مقایسه پارامترهای هیدرولیکی مطابقت بیشتری با مدل‌های آزمایشگاهی دارد (Diaz *et al.*, 2018; Firoozabadi & Mehdizadeh, 2009; Kubo, 2004).

حسینی و فتاحی (Hosseini & Fattahi, 2020) می‌گویند آبراهه باعث ایجاد سرعت بیشتر جریان چگال و کاهش ضخامت جریان می‌شود و افزایش میزان غلظت جریان گل آلود ورودی به افزایش سرعت بیشینه در رخ نماهای سرعت می‌انجامد. این میزان افزایش در سرعت بیشینه جریان گل آلود در جریان‌هایی با دبی ورودی بالاتر بارزتر است. الگوهای

گارسیا (Garcia, 1993) اولین دسته از آزمایش‌های وسیع را در خصوص پرش هیدرولیکی جریان غلیظ مطالعه کرد. وی به منظور بررسی پدیده پرش هیدرولیکی در جریان‌های غلیظ، از طریق ساخت یک مدل فیزیکی به آزمایش‌هایی دست زد. آلتیناکار و همکاران (Altinakar *et al.*, 1990) با بررسی‌های آزمایشگاهی، تاثیر شیب کم و رسوبگذاری ضعیف را روی رفتار رأس جریان‌های غلیظ تجزیه پذیر بررسی کردند. ایمران و قاسم (Imran & Kassem, 2004) به مطالعه جریان چگال در کانال‌های منحنی دار سینوسی محدود و نامحدود همراه با سیلاب دشت پرداختند و با انتخاب مدل عددی سه بعدی خصوصیات جریان از جمله سرعت و چگالی جریان چگال را بررسی کردند. این محققان با استفاده از یک مدل عددی سه بعدی، توسعه جانبی جریان دانسیته را در کانال‌های نامحدود و محدود شده مستقیم، بررسی و از مدل توربولانس  $k-\varepsilon$  برای شبیه‌سازی استفاده کردند. ایمران و همکاران (Imran *et al.*, 2001) با مطالعه و شبیه‌سازی عددی جریان‌های گل آلود رسوبی غوطه ور یک رودخانه و با در نظر گرفتن مدل آشفتگی  $k-\varepsilon$ ، معادلات ناویر استوکس را حل کردند. پیلر و توماسو (Pylar & Tomasso, 2012) با پردازش جریان و ارتباط رسوبگذاری در کانال‌های زیر دریایی سینوسی شکل و اثر فرسایش و رسوب بر این کانال‌ها نشان دادند که در قسمت‌هایی از کانال که دچار فرسایش می‌شود مواد فرسایش یافته در انحنای بعدی با توجه به مورفولوژی رودخانه رسوب گذاری شکل می‌گیرد. استراب و مورینگ (Straub & Mohring, 2011) با استفاده از فلوم آزمایشگاهی و با ورود جریان گل آلود به مطالعه و تاثیر سازوکار جریان گل آلود در کانال‌های سینوسی شکل

## مواد و روش‌ها

### شرایط اولیه و تعیین مدل‌ها

در این تحقیق برای حل رابطه‌های متوسط-رینولدزی ناویر-استوکس در جریان چگال از یک بسته نرم افزاری (نرم افزار فلونت) استفاده شده است که مبنای آن دینامیک سیالات محاسباتی است. با این نرم افزار از روش اجسام محدود، برای حل معادلات دیفرانسیل جزئی حاکم استفاده شده است. با استفاده از این روش، میدان جریان به تعدادی حجم کنترل تقسیم شده است و معادلات دیفرانسیل حاکمی را که روی هر حجم کنترل است با استفاده از انتگرال گیری، روی هر حجم کنترل معادلات دیفرانسیلی حاکم بر آن به یک سری معادلات جبری گسسته تبدیل می‌کند و سپس معادلات به فرم ساده‌تری حل می‌شوند. برای مدلسازی و صحت‌سنجی نتایج از مدل آزمایشگاهی حسینی و فتحی (Hosseini & Fattahi, 2020) استفاده شده است. تحقیق آنها در دانشگاه شیراز بخش هیدرولیک و با استفاده از یک فلوم به طول ۸ متر و به عرض ۳۵ سانتی متر صورت گرفته است. در این تحقیق از ماده پودر سنگ به عنوان مواد معلق (ماده غلیظ) با وزن مخصوص  $2/65 \text{ t/m}^3$  با اندازه ذرات  $0/068$  میلی متر استفاده شده است. برای اندازه‌گیری سرعت جریان چگال در فلوم از یک عدد سرعت سنج الکترومغناطیسی مدل ۸۰۲ ساخت شرکت انگلیسی والپورت<sup>۱</sup> با دقت اندازه‌گیری  $\pm 5 \text{ mm/sec}$  استفاده شده است. این دستگاه دارای یک دیتالاگر و یک سنسور اندازه‌گیری جریان است، قابلیت اتصال به رایانه را دارد و می‌تواند سرعت جریان، دبی، سری زمانی سرعت و ... را اندازه

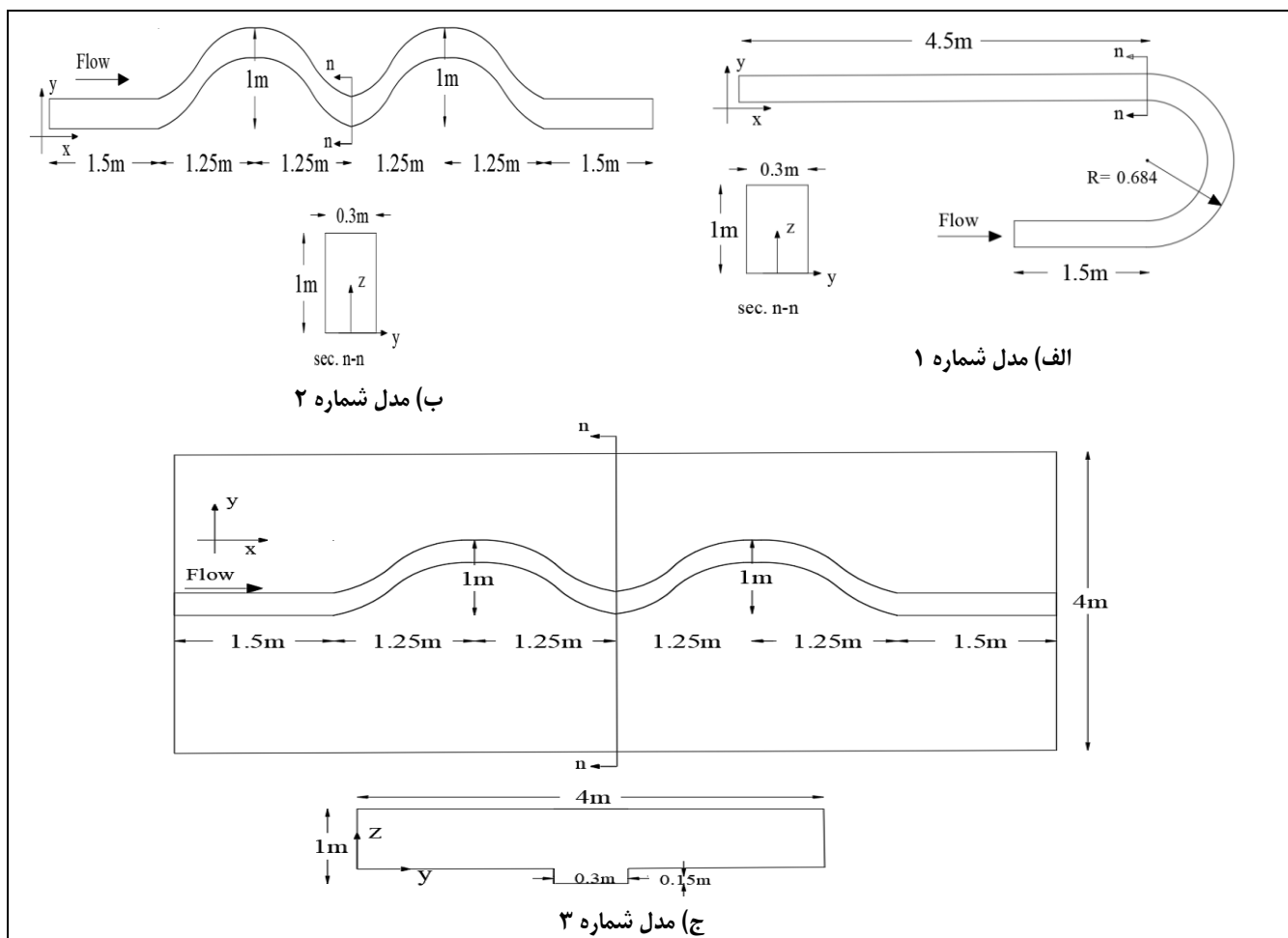
پروفیل سرعت در ناحیه دیواره و جت از بدنه جریان غلیظ تحت تاثیر رژیم جریان قرار دارد. جریان‌های فوق بحرانی، نسبت به جریان‌های زیر بحرانی، الگوی پروفیل خوابیده‌تری نشان می‌دهند (Bahrami et al., 2017). با افزایش میزان سرعت جریان گل آلود، عدد ریچاردسون (Ri) افزایش می‌یابد. این محققان اثر موانع مختلف را بر کنترل جریان گل آلود بررسی کردند و گزارش دادند شکل موانع در کف کانال بر پارامترهای هیدرولیکی جریان گل آلود از جمله سازوکار انتقال رسوب، سرعت، غلظت و ضخامت آن تأثیر بسزایی دارد. همچنین نشان داده شده است با افزایش عدد ریچاردسون (Ri)، شدت اختلاط (Ew) کاهش می‌یابد (Asghari et al., 2017, Hosseini & Fattahi., 2020, Pittaluga & Imran., 2014 and Shringarpure et al., 2016). در جریان‌های چگال، میزان کشش آب ساکن علاوه بر عدد ریچاردسون به شیب بستر کانال بستگی دارد (Bahrami et al., 2019). با استفاده از مطالعات آزمایشگاهی و عددی، خصوصیات جریان‌های دو فازی بررسی شده است (Carrillo et al., 2020). محققانی چند روی جریان‌های چگال در کانال‌های مختلف در شرایط اولیه مختلف و وجود موانع بررسی‌هایی کرده‌اند (Hosseini et al., 2021; Goodarzi et al., 2020; Mauti et al., 2020; Wu et al., 2019).

با بررسی سوابق پژوهش، هدف از این مطالعه یافتن ارتباط معنا دار بین تکامل عدد ریچاردسون و جبهه اختلاط جریان چگال در انحنای کانال‌ها از طریق برداشت داده‌های جریان چگال و همچنین بررسی جریان چگال در اثر تغییر خصوصیات هیدرولیکی جریان است.

1- Valeport

گیری کند. دانسیته آب  $1000 \text{ kg/m}^3$ ، از شیب ۱ و ۳ درصد و دبی ۵۰ و ۹۰ لیتر بر دقیقه و چگالی‌های ۱۰۰۵ و ۱۰۰۸ کیلوگرم بر مترمکعب استفاده کردند. در این تحقیق جریان در ۳ مدل مختلف مطابق شکل ۱ به تصویر کشیده شده است، میزان بازشدگی در پیچه جریان غلیظ ۱ cm در نظر گرفته شده است. در این پژوهش سعی بر آن شده است که اثر انحنای در خم ۱۸۰ درجه و شکل سینوسی کانال محدود و سیلاب دشت مقایسه شود. در این مدل‌ها از ۴ شیب، غلظت و عدد فرود مختلف

استفاده شده است (جدول ۱). مش‌بندی مطابق با جدول ۲ با تعداد تقسیمات  $138 \times 13 \times 88$ ،  $140 \times 20 \times 60$ ،  $105 \times 15 \times 45$  و  $175 \times 25 \times 75$  که به ترتیب از سمت چپ بیانگر برای x، y و z است. لازم است یادآوری شود که از ۶ نوع مدل آشفتگی مدل k-ε (استاندارد، RNG، تحقیق پذیر)، مدل k-w (استاندارد، SST) و مدل RSM (از نوع کرنش-فشار خطی) استفاده شده است. در شکل ۱ نمایی از مدل سازی مشاهده می‌شود.



شکل ۱- پلان و مقطع عرضی مدل‌ها  
Fig. 1- Plan and cross section of models

عدد رینولدز بیش از ۲۰۰۰ باشد جریان آشفته است و اختلاط در راستای مرز مشترک شاره چگال و سیال محیطی روی خواهد داد. عدد رینولدز در جریان چگال به صورت رابطه ۳ بیان می‌شود.

$$Re = (ud) / \nu \quad (3)$$

که در آن،

$u$  = سرعت متوسط در راستای جریان؛  
 $d$  = ضخامت جریان؛ و  $\nu$  = ویسکوزیته سینماتیکی.  
 شدت اختلاط جریان غلیظ و سیال ساکن پیرامون آن، که با  $Ew$  نشان داده می‌شود، ناشی از ناپایداری‌های حد فاصل جریان غلیظ و سیال ساکن است و به صورت نسبت سرعت اختلاط به سرعت متوسط بدنه جریان غلیظ تعریف می‌شود. محققان با آزمایش‌های گوناگون روی جریان‌های غلیظ با جرم مخصوص‌های متفاوت دریافتند ضریب شدت اختلاط تابعی از عدد ریچاردسون است. در اینجا ارتباط بین  $Ew$  و  $Ri$  نشان داده می‌شود که  $Ew$  عموماً به صورت تابعی از عدد ریچاردسون بیان شده است که به صورت رابطه ۴ بیان می‌شود.

$$Ew = f(Ri) \quad (4)$$

گفتنی است که در مقطع (n-n) خصوصیات جریان بررسی می‌شود. برای صحت سنجی نتایج مدل عددی از نتایج آزمایشگاهی حسینی و فتاحی (Hosseini & Fattahi, 2020) با شیب‌ها، عدد فرود و غلظت‌های مختلف استفاده شده است که شرایط اولیه برای شبیه‌سازی عددی طبق جدول شماره ۱ است. برای صحت سنجی نتایج از عدد ریچاردسون استفاده خواهد شد که به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$g'_0 = \frac{\rho - \rho_0}{\rho_0} g \quad (1)$$

$$Ri_0 = \frac{g'_0 h_0 \cos \theta}{U_0^2} = \frac{1}{Fr_0'^2} \quad (2)$$

که در آن،

$\rho$  = چگالی سیال چگال؛  $\rho_0$  = چگالی آب محیطی؛  $h_0$  = ضخامت جریان چگال ورودی؛  
 $Fr_0$  = عدد فرود جریان اولیه جریان چگال؛  
 $U_0$  = سرعت ورودی جریان؛  $g'_0$  = شتاب ثقل کاهش یافته؛  $Ri_0$  = عدد ریچاردسون اولیه جریان؛ و  
 $C_0$  = غلظت اولیه.

یکی از مشخصه‌های جریان گل‌آلود، معلق ماندن رسوبات به واسطه آشفتگی است و آشفتگی در ذرات جریان‌های گل‌آلود است. در صورتی که

جدول ۱- شرایط اولیه برای شبیه‌سازی عددی

Table 1- Initial conditions for numerical simulation

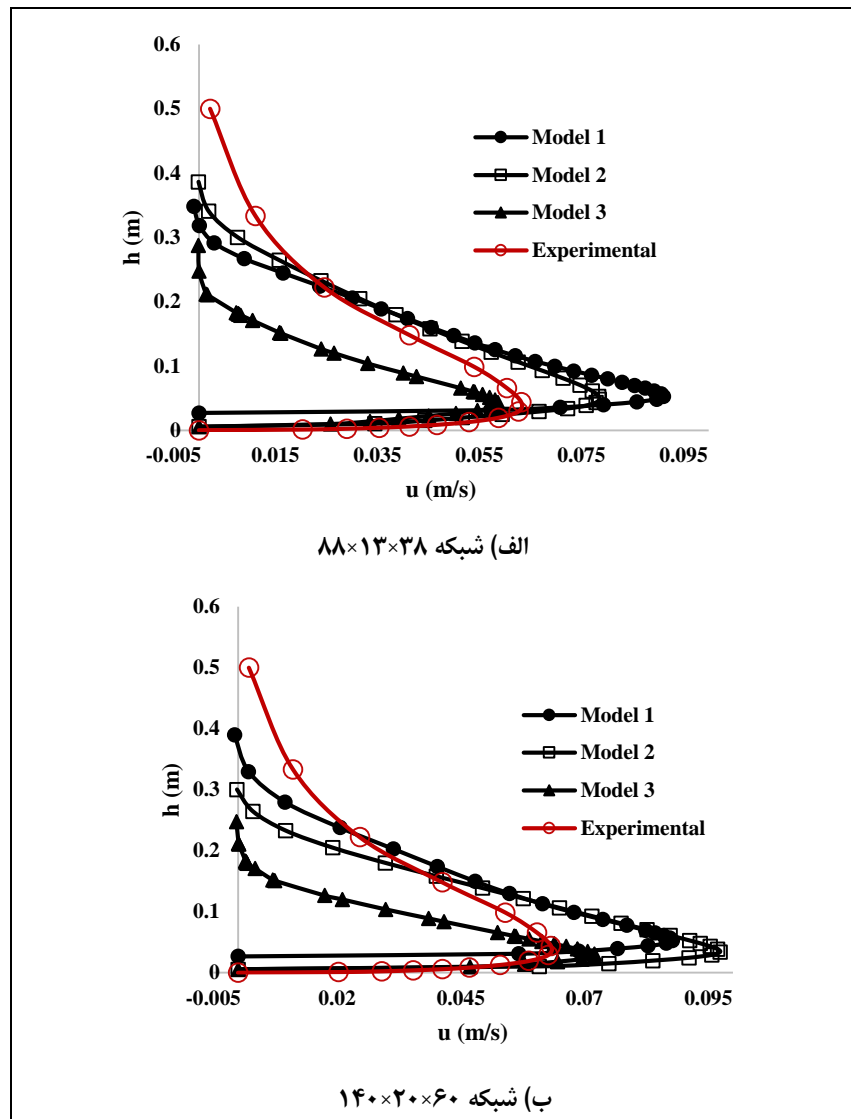
RUN.NO	slop	C <sub>0</sub> (gr/cm <sup>3</sup> )	Fr <sub>0</sub>	h (cm)	U <sub>0</sub> (cm/s)	g' <sub>0</sub> (cm/s <sup>2</sup> )	R <sub>io</sub>
NO.1	0.002	0.00667	1.22	5.4	9.315	4.074	0.254
NO.2	0.005	0.00667	3	5.4	22.906	4.074	0.042
NO.3	0.008	0.00667	5	5.4	38.177	4.074	0.015
NO.4	0.02	0.00667	8	5.4	61.084	4.074	0.006
NO.5	0.002	0.00727	1.22	5.4	9.725	4.441	0.254
NO.6	0.005	0.00727	3	5.4	23.915	4.441	0.042
NO.7	0.008	0.00727	5	5.4	39.858	4.441	0.015
NO.8	0.02	0.00727	8	5.4	63.772	4.441	0.006
NO.9	0.002	0.00859	1.22	5.4	10.571	5.247	0.254
NO.10	0.005	0.00859	3	5.4	25.995	5.247	0.042
NO.11	0.008	0.00859	5	5.4	43.325	5.247	0.015
NO.12	0.02	0.00859	8	5.4	69.32	5.247	0.006
NO.13	0.002	0.01	1.22	5.4	11.406	6.108	0.254
NO.14	0.005	0.01	3	5.4	28.048	6.108	0.042
NO.15	0.008	0.01	5	5.4	46.746	6.108	0.015
NO.16	0.02	0.01	8	5.4	74.793	6.108	0.006
NO.17	0.002	0.00727	3	5.4	23.915	4.441	0.042
NO.18	0.005	0.01	8	5.4	74.793	6.108	0.006
NO.19	0.008	0.00667	5	5.4	38.177	4.074	0.015
NO.20	0.02	0.00859	1.22	5.4	10.571	5.247	0.254
NO.21	0.002	0.00859	8	5.4	69.32	5.247	0.006
NO.22	0.005	0.00667	3	5.4	22.906	4.074	0.042
NO.23	0.008	0.01	1.22	5.4	11.406	6.108	0.254
NO.24	0.02	0.00727	5	5.4	39.858	4.441	0.015

## نتایج و بحث

### انتخاب نوع مش بندی و مدل آشفتگی

معمول مش بندی بر پاسخ‌های به دست آمده، در این تحقیق مبحث استقلال از شبکه در دستور کار قرار گرفت و ۴ نوع شبکه برای کانال محدود با انحنای سینوسی با ابعاد ۸۸×۱۳×۳۸، ۱۰۵×۱۵×۴۵، ۱۴۰×۲۰×۶۰ و ۱۷۵×۲۵×۷۵ انتخاب شد. شکل ۳ به مقایسه بین مش‌بندی‌های مختلف با مش مورد آزمایش می‌پردازد و مشاهده می‌شود که در محدوده نزدیک به بستر، در سرعت‌های بالا مش‌بندی با ابعاد ۱۴۰×۲۰×۶۰ بسیار نزدیک به مش محاسباتی حسینی و فتاحی (Hosseini & Fattahi, 2020) است که در جدول ۲ مشاهده می‌شود.

در کانال‌های با انحنای ۱۸۰ درجه و سینوسی محدود و سیلاب دشتی، انواع مش‌بندی، مدل‌های آشفتگی، شیب، غلظت و اعداد فرود مختلف انتخاب و به نرم افزار فلونت معرفتی می‌شود؛ برای صحت سنجی، نتایج به دست آمده با داده‌های حسینی و فتاحی (Hosseini & Fattahi, 2020) مقایسه می‌شود تا مدل بهینه انتخاب شود. نهایتاً اثر پارامترهای مختلف بر خصوصیات جریان چگال به صورت جدول، نمودار و شکل‌های مختلف تهیه و ارزیابی شد. برای جلوگیری از تاثیرات بیشتر از حد



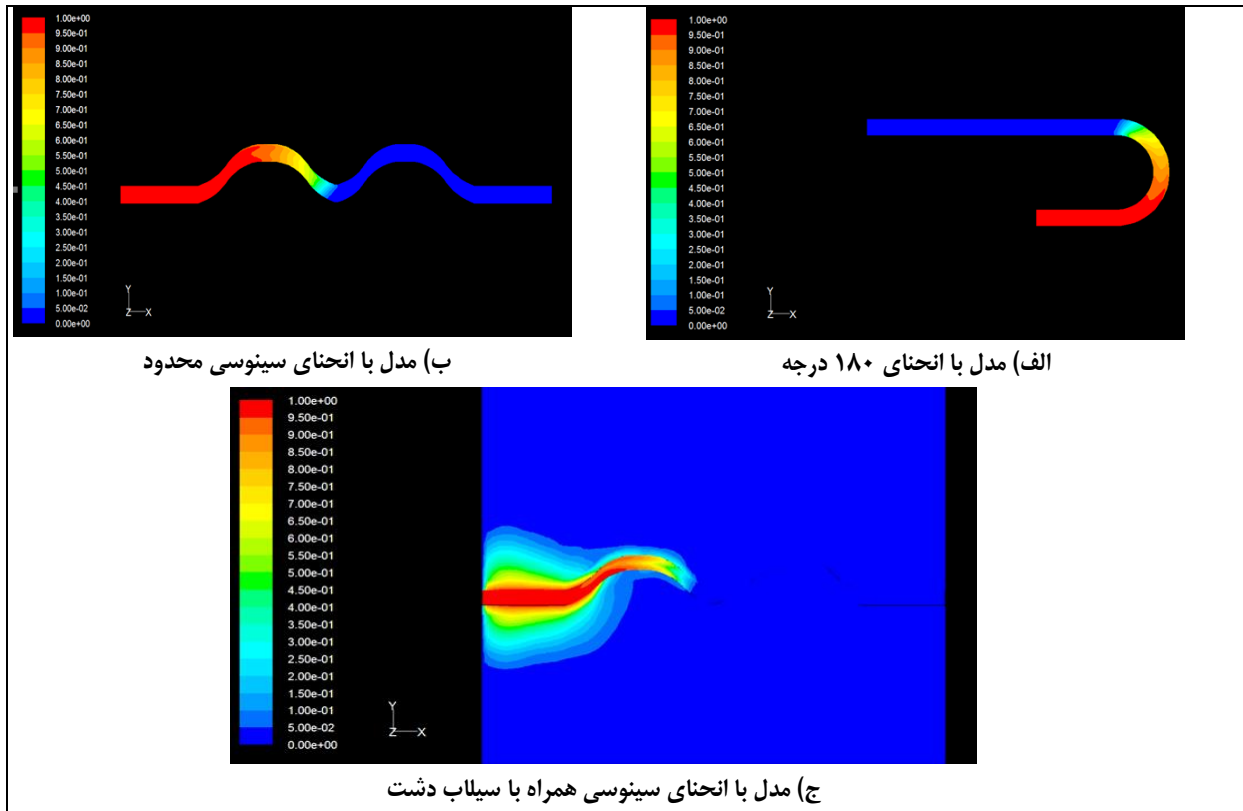
شکل ۲- مقایسه نتایج عددی مدل با نتایج آزمایشگاهی در انتخاب نوع مش بندی

Fig. 2 - Comparison of numerical results of the model with the laboratory data in selecting the mesh type

محاسبات بیشتر اما زمان بر است و با صرفه نیست. در جدول ۲، اختلاف درصد خطای مش  $۱۷۵ \times ۲۵ \times ۷۵$  با مش  $۱۴۰ \times ۲۰ \times ۶۰$  حدود ۱/۸ درصد و ناچیز است.

بنابراین، مش با ابعاد  $۱۴۰ \times ۲۰ \times ۶۰$  با میزان خطای ۷/۳۹ درصد به عنوان مش بهینه برای کل مجموعه مدل‌ها در نظر گرفته شده است. شکل ۳ نمای شماتیکی از نحوه ورود جریان چگال به مدل‌ها را نشان می‌دهد.

باید متذکر شد اگرچه شبکه با ابعاد  $۱۷۵ \times ۲۵ \times ۷۵$  نسبت به شبکه با ابعاد  $۱۴۰ \times ۲۰ \times ۶۰$  سلول‌های بیشتری دارد اما نتایج شبکه محدود با ابعاد  $۱۴۰ \times ۲۰ \times ۶۰$  با نتایج به دست آمده از تحقیقات حسینی و فتاحی (Hosseini & Fattahi, 2020) تقریباً منطبق است. با بررسی مقادیر سرعت متوسط جریان غلیظ می‌توان مقادیر خطای کار عددی با آزمایشگاهی را در انتخاب نوع مش بندی مشخص کرد. هر چه شبکه ریزتر باشد، دقت



شکل ۳- نمای شماتیکی از نحوه ورود جریان غلیظ به کانال‌ها

Fig. 3- Schematic view of density current enters the channels

جدول ۲- مقایسه سرعت متوسط جریان غلیظ در انتخاب نوع مش بندی

Table 2- Comparison of average velocity of density current in selecting the type of mesh

Model. No	u (m/s)			
	88*13*38	105*15*45	140*20*60	175*25*75
Model. 1	0.056	0.055	0.054	0.0543
Model. 2	0.0614	0.0584	0.0477	0.0431
Model. 3	0.0347	0.0317	0.0304	0.0324
Experimental	0.041	0.041	0.041	0.041
% error	23.65	17.96	7.39	5.51

آشفته‌گی، بحث کارآمد بودن با نتایج آزمایشگاهی و همچنین بحث زمان بر بودن مطرح است. به دلیل استفاده از سوپر کامپیوتر، محاسبات مدل k-ε از نوع تحقیق پذیر نسبت به مدل RNG زمان بیشتری نیاز دارد و این امر مستلزم هزینه بیشتر خواهد بود به طوری که هر آزمایش از نوع تحقیق پذیر تقریباً یک روز زمان بیشتری می‌برد تا مدل RNG. از این رو، با خطای ۲/۹ درصد مدل k-ε از نوع RNG در

برای انتخاب مدل بهینه آشفته‌گی، انواع مختلف مدل‌های مختلف آشفته‌گی در مدل به کار رفتند از جمله مدل k-ε (استاندارد، RNG، تحقیق پذیر)، مدل k-w (استاندارد، SST) و مدل RSM (از نوع کرنش- فشار خطی)؛ نتایج به دست آمده (با بررسی پروفیل‌های قائم سرعت و غلظت موضعی) تحلیل شد. جدول ۳ مقایسه مدل‌های آشفته‌گی را با مدل آزمایشگاهی نشان می‌دهد. در انتخاب نوع مدل



دستور کار قرار گرفت. در کلیه مدل‌های آشفتگی، وجود سرعت‌های منفی کوچک (جریان برگشتی) در سیال محیطی نیز دیده می‌شود که علت آن نیز وجود گردابه‌های موجود در سطح مشترک جریان چگال و سیال محیطی است.

جدول ۳- انتخاب و مقایسه مدل‌های آشفتگی در مدل‌های انتخابی  
Table 3 - Selection and comparison of turbulence models in selected models

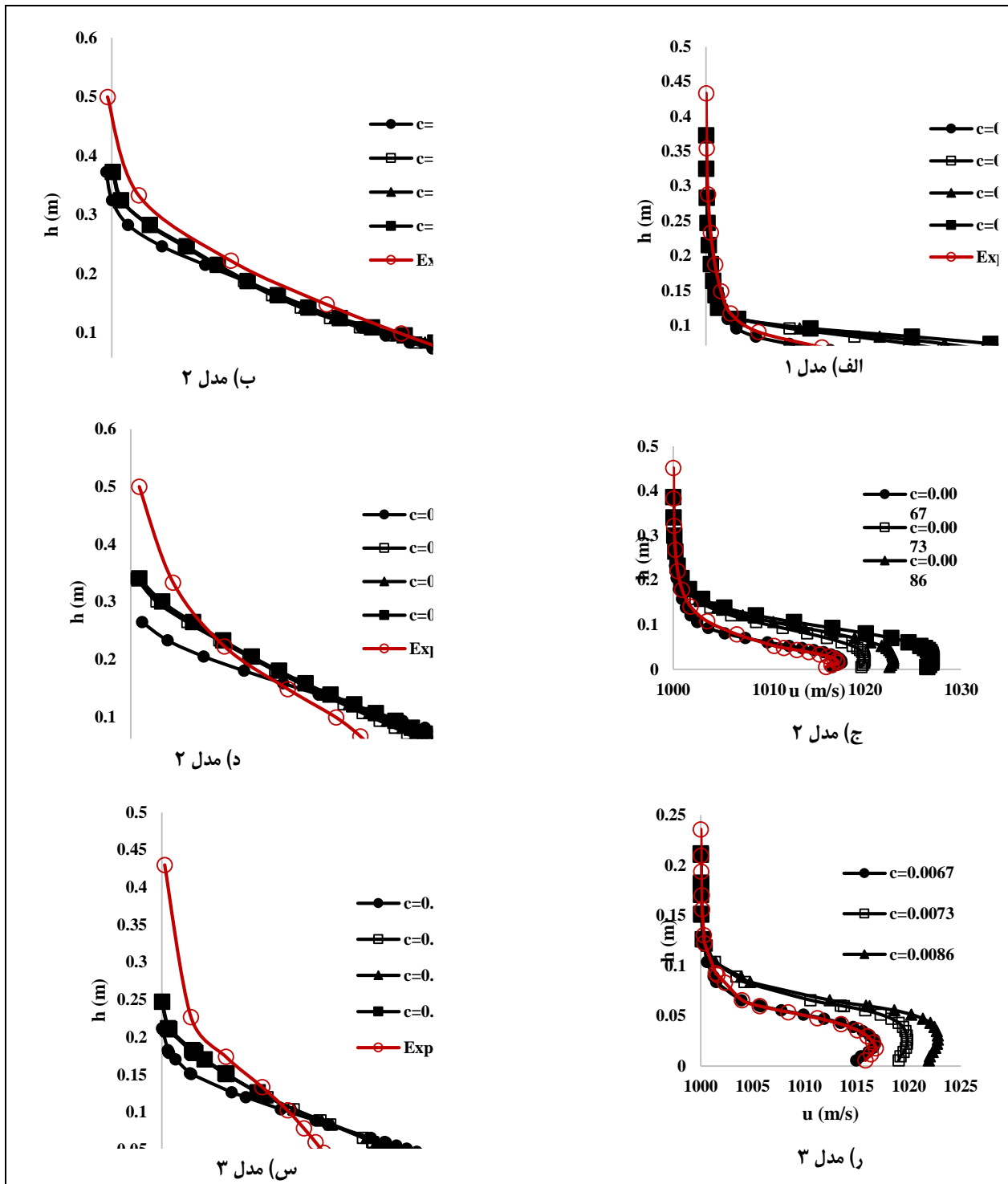
Model. No	u (m/s)					
	RSM	k- $\omega$ (استاندارد)	k- $\omega$ (SST)	k- $\epsilon$ (استاندارد)	k- $\epsilon$ (تحقیق پذیر)	k- $\epsilon$ (RNG)
Model. 1	0.0589	0.0563	0.059	0.061	0.047	0.0488
Model. 2	0.0569	0.0563	0.0548	0.0485	0.0371	0.0389
Model. 3	0.052	0.0445	0.0354	0.0315	0.0398	0.0389
Experimental	0.041	0.041	0.041	0.041	0.041	0.041
%error	36.45	27.71	21.34	14.63	0.77	2.9

باشد. پروفیل‌های غلظت و سرعت بسیار تحت تاثیر شیب و عدد فرود ورودی جریان هستند، به گونه‌ای که با افزایش عدد فرود ورودی و کاهش مقدار شیب کف کانال، پروفیل‌ها حالت ایستاده‌تری دارند. زمانی که عدد فرود جریان گل آلود ورودی خیلی کوچک باشد، پروفیل‌ها شکل خوابیده‌تری خواهند داشت. ارتفاعی که سرعت جریان گل آلود در آن صفر باشد ضخامت کل جریان می‌نامند و در ارتفاع‌های بالاتر از آن، برای حفظ پیوستگی جریان، سرعت دارای مقادیر منفی خواهد بود، به این معنی که سیال بالای جریان ساکن نیست و به سمت بالادست حرکت آرامی خواهد داشت. در پروفیل‌های خوابیده سرعت در ارتفاع پایین‌تری به این سرعت صفر خواهد رسید، یا در واقع ضخامت کل این گونه جریان‌ها (جریان در شیب کم و غلظت ورودی زیاد) کمتر است تا در دیگر جریان‌ها. این موضوع در بررسی ضخامت‌های جریان گل‌آلود نیز به خوبی

### بررسی پروفیل سرعت و غلظت جریان غلیظ

در این قسمت از تحقیق با در نظر گرفتن مدلی که حسینی و فتاحی (Hosseini & Fattahi, 2020) رایج داده اند به بررسی پروفیل سرعت و غلظت جریان چگال تحت شیب، غلظت و اعداد فرود مختلف پرداخته می‌شود. از شبکه بهینه محدود با ابعاد  $140 \times 20 \times 60$  و مدل آشفتگی بهینه k- $\epsilon$  از نوع RNG برای شبیه‌سازی عددی در نرم افزار فلوئنت استفاده شده است. شکل ۴ پروفیل قائم سرعت موضعی تحت اثر شیب‌های مختلف را نشان می‌دهد. هنگامی که جریان چگال از زیر دریچه با توجه به اعداد فرود مختلف وارد فلوم می‌شود، به دلیل میزان ارتفاع بازشدگی دریچه، همواره پرش هیدرولیکی بعد از دریچه مشاهده می‌شود و برای اینکه الگوی شکل جریان به پایداری نسبی برسد و تکامل جریان چگال اتفاق بیفتد، بهتر است موقعیت اندازه گیری پروفیل‌ها در نیمه کامل و بعد از اولین خم یا انحنا

دیده شده است. همانطور که پیدا است در مدل ۲، کاهش می‌یابد. لازم است گفته شود جریان چگال در شیب‌های پایین، ضخامت جریان چگال افزایش یافته و به مراتب سرعت ماکزیمم



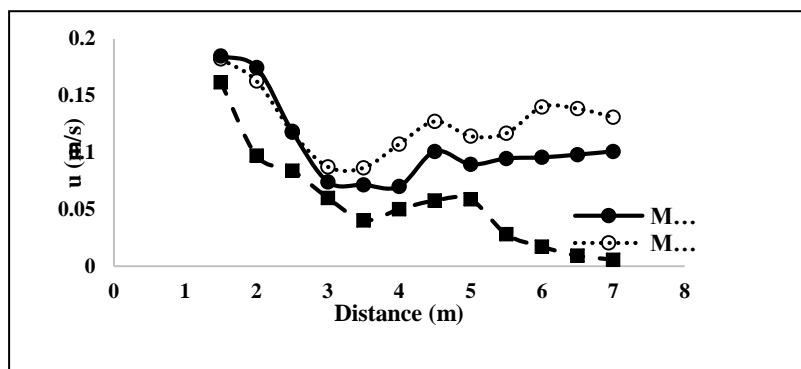
شکل ۴- مقایسه پروفیل سرعت و غلظت جریان غلیظ در همه مدل‌ها

Fig. 4 - Comparison of velocity profile and concentration of density current in all models

درصد موجب کاهش ضخامت جریان گل آلود در طول کانال می‌شود، که در نتیجه آن سرعت جریان از خود افزایش نشان می‌دهد. افزایش غلظت جریان گل آلود ورودی باعث افزایش نیروی جلوبرنده می‌شود و افزایش سرعت جریان گل آلود را در پی خواهد داشت. نمودار شکل ۵ که مربوط به آزمایش شماره ۱۶ است، مقادیر سرعت متوسط را در موقعیت‌های مختلف کانال با فاصله ۵۰ سانتی متر از یکدیگر مقادیر نشان می‌دهد. تاثیر انحنا در مدل شماره ۱ باعث افزایش ۴۳ درصد در سرعت جریان چگال شده است که به دلیل وجود نیروی گریز از مرکز باعث شتاب سرعت شده است. در مدل شماره ۲ و ۳ اثر انحنا باعث افزایش به ترتیب ۴۷ و ۴۵ درصد سرعت جریان چگال شده است.

با در نظر گرفتن شرایط اولیه ورودی یکسان برای همه مدل‌ها (آزمایش ۱۶)، سرعت جریان چگال در مدل ۲ با انحنای سینوسی ۱۸/۶۴ درصد نسبت به مدل ۱ افزایش داشته است، اما در مدل ۳ که همراه با سیلاب دشت است، سرعت جریان چگال ۴۷/۳۴ درصد نسبت به مدل ۱ با انحنای ۱۸۰ درجه کاهش داشته است. دلیل این تغییر، فرم و بستر جریان و کاهش انرژی جلو برنده است.

در کلیه پروفیل‌های غلظت، لایه‌بندی در غلظت جریان مشاهده می‌شود. به عبارت دیگر لایه زیرین چگال با گرادیان غلظت بالا در بخش پایینی جریان، بین بستر تا تراز ماکزیمم سرعت ( $0 < z < h_m$ ) و یک لایه تقریباً هوموژن با غلظت و چگالی کمتر، که با سیال ساکن بالایی مخلوط می‌شود، در بخش بالایی جریان در فاصله ( $h_m < z < h_t$ ) به خوبی قابل مشاهده است. پروفیل‌های غلظت در جریان‌های گل آلود پیچیدگی خاصی دارند. این موضوع به واسطه اندرکنش رسوبات معلق با جریان است. در این جریان‌ها، تیپ پروفیل غلظت به صورت توزیع پلکانی است که در جریان‌های فوق بحرانی مشاهده می‌شود. معمولاً در جریان‌های فرسایشی و یا جریان‌هایی که سرعت درون آمیختگی در مرز بالایی جریان زیاد باشد قابل مشاهده است. در این گونه جریان‌ها، گرادیان غلظت در نزدیکی کف و ترازهای پایینی جریان حداکثر هستند و سپس تا ارتفاع متوسط جریان ( $h$ ) این گرادیان رو به کاهش می‌رود و در محدوده ارتفاع کل جریان و در ناحیه اختلاط و برش به سمت صفر میل می‌کند. اگر عدد فرود و غلظت ورودی یکسان باشد، افزایش شیب بستر فلوم در ناحیه دیواره نسبت به ناحیه جت ملموس‌تر است. از طرفی، افزایش شیب کف کانال از ۰/۲ درصد به ۲



شکل ۵- تغییرات مکانی سرعت متوسط جریان چگال آزمایش ۱۶ در مدل‌ها

Fig.5 - Spatial variation diagram of average density current in models experiment 16

می‌کاهد. مقایسه عدد ریچاردسون و شدت اختلاط در نمودارهای شکل ۶ نشان داده شده است. هر چه عدد ریچاردسون افزایش یابد، شدت اختلاط آن کاهش می‌یابد. در مدل شماره ۲، محدوده تغییرات شدت اختلاط ۸ درصد بیشتر است تا در مدل شماره ۱ و ۳/۸ درصد بیشتر است تا در مدل شماره ۳ که نشان می‌دهد انحنای پیچان رودی در بدنه کانال باعث افزایش شدت اختلاط می‌شود. روابط دقیق‌تر در جدول ۴ نشان داده شده است. داده‌های ریچاردسون و شدت اختلاط در مدل شماره ۱ نسبت به مدل آزمایشگاهی ۱۰ درصد افزایش دارد و این داده‌ها در مدل شماره ۲ نسبت به مدل آزمایشگاهی ۱۹ درصد و در مدل شماره ۳ نسبت به مدل آزمایشگاهی ۱۴ درصد بیشتر است. با بررسی کلی هر ۳ مدل، عدد ریچاردسون ارتباط معناداری با شدت اختلاط برقرار کرده که همبستگی ۰/۷۱ را به خود اختصاص داده است.

کل داده‌های ریچاردسون و شدت اختلاط عددی (تمامی سه مدل) نسبت به مدل آزمایشگاهی ۴/۴ درصد بیشتر است. تجمع اعداد ریچاردسون در محدوده  $0.45 < Ri < 3/5$  است.

به طور کلی برای همه مدل‌ها با افزایش عدد فرود ورودی از ۱/۲۲ به ۸، در مدل شماره ۱ با انحنای ۱۸۰ درجه به ترتیب الگوی پروفیل غلظت نسبت به مدل شماره ۲ و ۳ به میزان ۱۹ و ۲۱/۳ درصد کاهش می‌یابد. در تمامی داده‌های آزمایشگاهی، پروفیل غلظت جریان چگال در ناحیه جت پراکندگی بیشتری با میزان ۴۷ درصد نسبت به ناحیه دیواره از خود نشان می‌دهد. با افزایش شیب کانال از ۰/۲ درصد به ۲ درصد، میزان پراکندگی ۶۵ درصد افزایش می‌یابد، اما با افزایش غلظت ورودی جریان چگال از  $0.0667 \text{ g/cm}^3$  به  $0.1 \text{ g/cm}^3$  این میزان پراکندگی ۲۱ درصد کاهش می‌یابد.

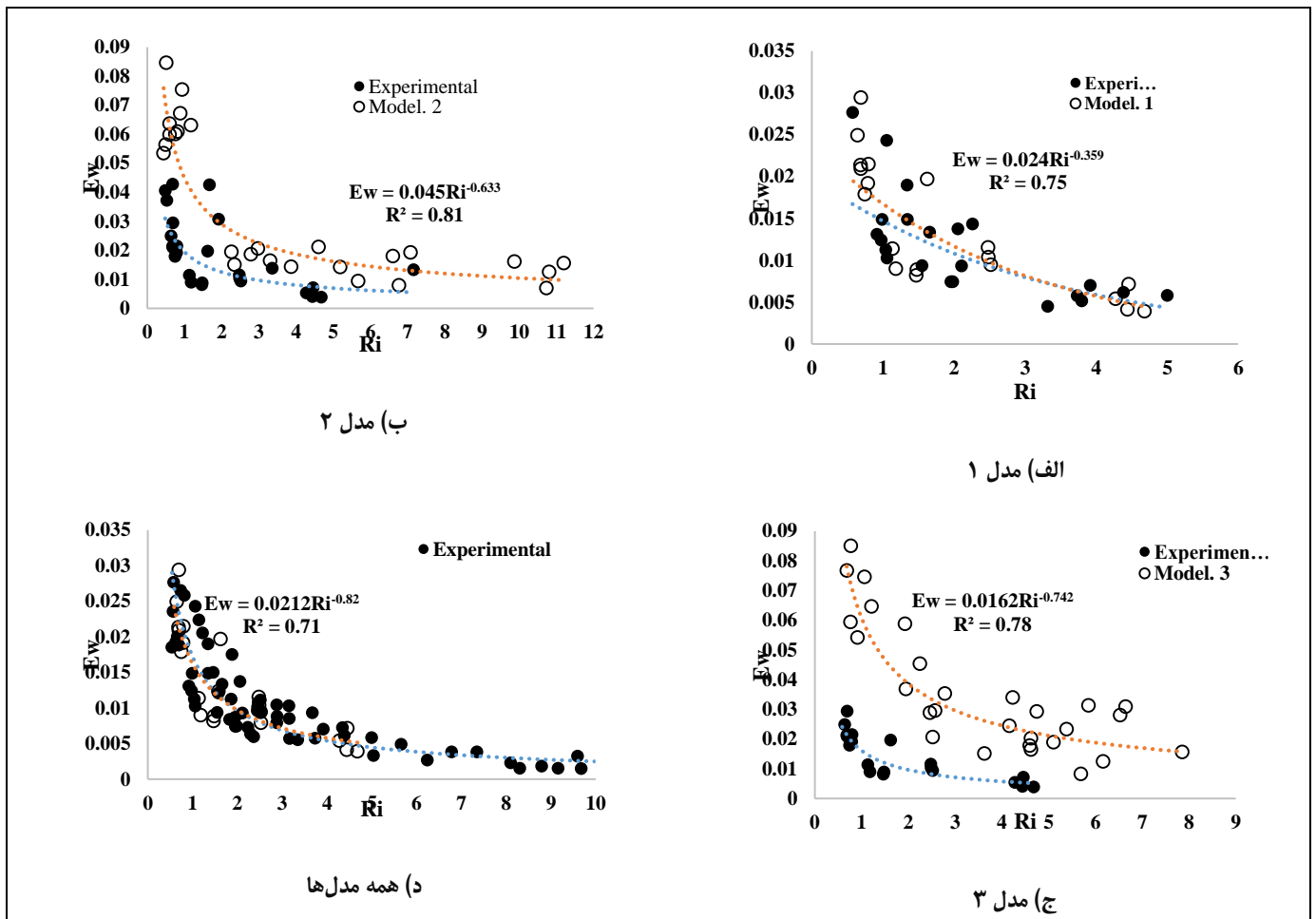
#### بررسی شدت اختلاط و عدد ریچاردسون

مهمترین ناحیه از نظر هیدرودینامیک جریان، فصل مشترک جریان است. گردابه‌ها ناشی از حرکت دو سیال مختلف با دو سرعت متفاوت در این ناحیه ایجاد می‌شود و سیال سبک‌تر بالایی را به درون جریان گل آلود می‌کشد. به این ترتیب جریان گل آلود رقیق می‌شود و از سرعت و غلظت متوسط آن به تدریج کاسته خواهد شد. این امر به نوبه خود باعث کاهش اغتشاش‌ها می‌شود و از درون آمیختگی

جدول ۴- ارتباط بین عدد ریچاردسون و شدت اختلاط در محل انحنای مدل‌ها

Table 4. Relationships between the Richardson number and entertainment ratio in the curvature of the models

Series	relationships	correlation
Model.No 1	$Ew=0.024 Ri^{-0.359}$	<b>R<sup>2</sup>=0.75</b>
Model.No 2	$Ew=0.045 Ri^{-0.633}$	<b>R<sup>2</sup>=0.81</b>
Model.No 3	$Ew=0.016 Ri^{-0.742}$	<b>R<sup>2</sup>=0.78</b>
Total Models	$Ew=0.0212 Ri^{-0.82}$	<b>R<sup>2</sup>=0.71</b>

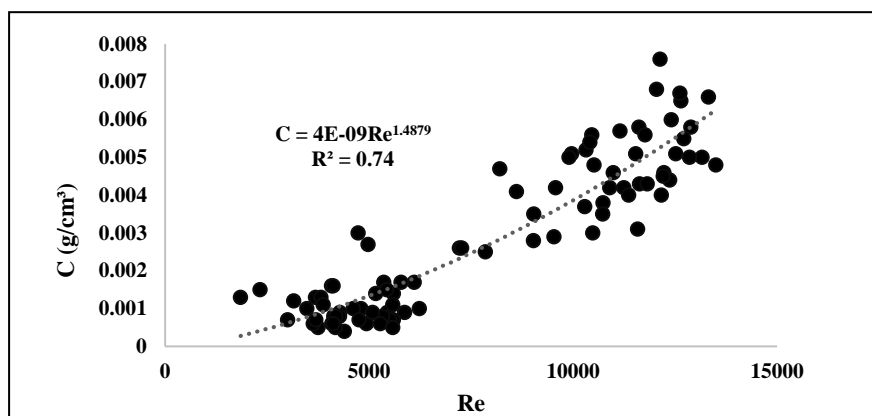


شکل ۶- عدد ریچاردسون بر حسب شدت اختلاط در انحنا در مدل‌های مختلف

Fig. 6 - Richardson number against entrainment ratio in curvature of different models

نیز افزایش می‌دهد. در شکل ۷، با افزایش شدت اختلاط و غلظت جریان، اعداد رینولدز بیشتر و جریان آشفته‌تر می‌شود و عدد ریچاردسون کاهش یابد. تجمع اعداد رینولدز در محدوده  $6000 < Ri < 2500$  است که بهترین همبستگی برای کل داده‌ها 0.74 به خود اختصاص می‌دهد.

رفتار هر جریان گل‌آلود بستگی کامل به اعداد ریچاردسون و رینولدز دارد. در اعداد رینولدز بالا به دلیل ناپایداری شدیدی که در ابتدای کانال به وجود می‌آید، درون آمیختگی زیاد است و باعث افزایش ناگهانی ارتفاع می‌شود. با افزایش ارتفاع جریان چگال، سرعت کاهش می‌یابد و عدد ریچاردسون را



شکل ۷- رابطه اعداد رینولدز با غلظت جریان در همه مدل‌ها

Fig. 7 - Relationship between Reynolds numbers and current concentration in all models

### نتیجه‌گیری

طور کلی سرعت جریان چگال کمتر می‌شود. همچنین با افزایش عدد فرود جریان چگال، سرعت جریان چگال و ضخامت جریان در محل‌های انحنای دار افزایش می‌یابد. وجود انحنای بر مقادیر سرعت، غلظت و ضخامت جریان چگال اثر گذار است، تاثیر انحنای در مدل شماره ۱ با خم ۱۸۰ درجه، باعث افزایش ۴۳ درصد در سرعت جریان چگال شده است، و میزان غلظت جریان در ناحیه داخلی دیواره نسبت به ناحیه بیرونی دیواره کاهش یافته است. با در نظر گرفتن شرایط اولیه ورودی یکسان برای همه مدل‌ها، سرعت جریان چگال در مدل ۲ با انحنای سینوسی ۱۸/۶۴ درصد نسبت به مدل ۱ با خم ۱۸۰ درجه افزایش داشته است، که به دلیل ورود جریان با زاویه کمتر از ۹۰ درجه به کانال است و هر چه زاویه کانال به سمت ۴۵ درجه میل کند سرعت جریان بعد از انحنای بیشتری دارد. در مدل ۳ که همراه با سیلاب دشت است، سرعت جریان چگال ۴۷/۳۴ درصد نسبت به مدل ۱ با انحنای ۱۸۰ درجه کاهش داشته است. علت کاهش سرعت جریان، وجود فرم و بستر کانال و همچنین کاهش انرژی جلو برنده به دلیل پخش جریان در محیط نامحدود سیلاب دشت است. با افزایش عدد فرود ورودی از

در این تحقیق با شبیه‌سازی سه بعدی جریان چگال در مدل‌های با خم ۱۸۰ درجه و انحنای سینوسی محدود و همچنین سینوسی همراه با سیلاب دشت و با انتخاب بهترین مش محاسباتی، نوع آشفتگی، شیب، غلظت و عدد فرود، به بررسی خصوصیات جریان از جمله پروفیل‌های عمقی سرعت، غلظت و آشفتگی در انحنای کانال پرداخته شده است. در این تحقیق، برای مدلسازی سه بعدی از نرم افزار فلوئنت استفاده شده است که به دلیل آسان بودن در تعیین شرایط مرزی، نوع مش بندی و حل معادلات به عنوان ابزاری مفید و قدرتمند به کاررفته است. شبکه بهینه برای شبیه‌سازی عددی با تعداد مش ۱۴۰×۲۰×۶۰ و مدل آشفتگی بهینه، مدل k-ε از نوع RNG انتخاب شد که در مقایسه با مدل آزمایشگاهی خطای کمی از خود نشان داده است. پروفیل قائم سرعت موضعی تحت اثر شیب‌های مختلف در مدل محدود انحنای سینوسی، در شیب‌های پایین، ضخامت جریان چگال افزایش و به مراتب سرعت ماکزیمم کاهش می‌یابد. با توجه به پروفیل قائم سرعت تحت اثر غلظت‌های مختلف در ارتفاع نزدیک بستر هرچه غلظت‌ها بیشتر شود، به

۱/۲۲ به ۸، در مدل شماره ۱ با انحنای ۱۸۰ درجه به ترتیب الگوی پروفیل غلظت نسبت به مدل شماره ۲ و ۳ به میزان ۱۹ و ۲۱/۳ درصد کاهش می‌دهد. در تمامی داده‌های آزمایشگاهی، پروفیل غلظت جریان چگال در ناحیه جت پراکندگی بیشتری با میزان ۴۷ درصد نسبت به ناحیه دیواره از خود نشان می‌دهد. با افزایش شیب کانال از ۰/۲ درصد به ۲ درصد، میزان پراکندگی ۶۵ درصد افزایش می‌یابد اما با افزایش غلظت ورودی جریان چگال از  $g/cm^3$  ۰/۰۶۶۷ به  $g/cm^3$  ۰/۰۲ این میزان پراکندگی ۲۱ درصد کاهش می‌یابد. سوابق تحقیق در مورد عدد ریچاردسون و شدت اختلاط نشان داده است که همواره با افزایش عدد ریچاردسون از شدت اختلاط جریان کاسته می‌شود. نتایج بررسی‌ها نشان می‌دهد در همه مدل‌ها اثر انحنای باعث افزایش داده‌های ریچاردسون شده است، در مدل‌های شماره ۱، ۲ و ۳ به ترتیب اعداد ریچاردسون نسبت به حالت بدون انحنای ۱۰، ۱۹ و ۱۴ درصد افزایش داشته است. با بررسی کلی اعداد ریچاردسون و شدت اختلاط هر سه مدل، همبستگی خوبی با میزان ۰/۷۱ دیده می‌شود که نسبت به مدل آزمایشگاهی ۴/۴ درصد افزایش دارد. کاهش عدد ریچاردسون در اثر افزایش غلظت و اعداد رینولدز بالاست.

## قدردانی

از آقای دکتر بنان رئیس محترم دانشکده عمران شیراز، آقای دکتر طالب بیدختی، آقای نیاکام مسئول محترم آزمایشگاه آب و هیدرولیک و هیئت داوران که ما را در اجرا و ارتقای کیفی این پژوهش یاری کرده‌اند، سپاسگزاری می‌شود.

## مراجع

- Altinakar, M. S., Graf, W. H., & Hopfinger, E. J. (1990). Weakly Depositing Turbidity Current on Small Slopes. *Journal of Hydraulic research*, 28(1),55-80
- 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.
- Bahrami, H. Ghomeshi, M. Kashefipour, S.M. & Salehi, S.A. (2017). Investigating the characteristics of the density current due to changes in the flow regime. *Journal of Marine Science and Thechnology*. 16(1): 112-121.
- Bahrami, H. Ghomeshi, M. Kashefipour, S.M. & Salehi, S.A. (2019). Investigation of the effect of various factors on density currents entrainment. *Journal of Marine Science and Thechnology*. 18(1): 1-9.
- Carrillo, J., Castillo, L., Marco, F., & Garcia, J. (2020). Experimental and Numerical Analysis of Two-Phase Flows in Plunge Pools” *Journal of Hydraulic Engineering*, 146(6),4-11.
- Choi, S. U, & Garcia, M. H. (2002). K-ε turbulence modeling of density currents developing two dimensionally on a slope. *J. Hydraul. Eng*, 128(1), 55-63
- Diaz. B, Castanedo. S, Palomar. P, Henno. F. (2018). Modeling Nonconfined Density Currents Using 3D Hydrodynamic Models. *Journal of Hydraulc Engineering*, 145(3), 55-72
- Firoozabadi,B & Mehdizadeh,A.(2009). Simulation of a Density Current Turbulent Flow Employing Different RANS Models: A Comparison Study. *Sharif University of Technology* , 16(1),53-63.

- Garcia, M. (1993). "Hydraulic Jumps in Sediment-Driven Bottom Currents". *J. Hydraul. Engrg.* 119(10), 1094–1173.
- Goodarzi, D., Sookhak, K., Khavasi, E., & Abolfathi, S. (2020). Large eddy simulation of turbidity currents in a narrow channel with different obstacle configurations. *Scientific Reports*, 10(1), 45-58.
- Hosseini, M. Fattahi, M. H. & Eslamian, S. (2020). Experimental Analytical Study on Fractal Behaviors of the Density Current. *Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Civil Engineering*, 45(2), 40-57.
- Hosseini, M. Fattahi, M. H. & Eslamian, S. (2020). Experimental Investigation and Dynamic Fractal and Multi-fractal Analysis of the Density Current Patterns. *Water Resource Engineering*, 13(2), 81-98.
- Hosseini, M. Fattahi, M. H. & Eslamian, S. (2020). Experimental Study of Hydraulic Parameters in Density Current Due to Channel Constriction. *Journal of Hydraulics*, 15(3), 47-59.
- Hosseini, M. Fattahi, M. H. & Eslamian, S. (2021). Experimental investigation of density current patterns using dynamic fractal analysis. *International Journal of Sediment Research*, 36(1), 165-176.
- Imran, J & Kassem, A. (2004). Three-dimensional modeling of density current. II. Flow in sinuous confined and unconfined channels. *Journal of Hydraulic Research*, 42(6), 591–602
- Imran, J., Parker, G. & Pirmez, C. (2001). A Nonlinear Model of Flow in Meandering Submarine and Subaerial Channels". *J. Fluid Mech.* 400, 295–331
- Kubo, y. (2004). Experimental and numerical study of topographic effects on deposition from two-dimensional, particle-driven density currents. *Sedimentary Geology.*, 164(1), 311-326.
- Mauti, G., Stolle, J., Takabatake, T., Nistor, L., Goseberg, N., & Mohammadian, A., (2020). Experimental Investigation of Loading due to Debris Dams on Structures" *Journal of Hydraulic Engineering*, 146(5). 92-113.
- Peakall, J & Keevil, G. (2006). Flow structure in sinuous submarine channels: Velocity and turbulence structure of an experimental submarine channel, *Journal of Marine Geology*, 229(1), 241–257
- Peakall, J & Ashworth, P. (2007). Meander-Bend evolution, Alluvial architecture, and the role of cohesion in sinuous river channels: a flume study. *Journal of Sedimentary Research*, 77(1), 197–212
- Pittaluga, M. & 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(2): 483-503.
- Pylar, D & Tomasso, M. (2012). Flow processes and sedimentation associated with erosion and filling of sinuous submarine channels. *Journal of GSA*, 40(2), 143-146
- Shringarpure, M. Cantero, M.I. & Balachandar, S. (2016). Analysis of turbulence suppression in sediment-laden saline currents. *Procedia Engineering*. 126(10): 16-23.
- Straub, K.M & Mohring, D. (2011). Quantifying the influence of channel sinuosity on the depositional mechanics of channelized turbidity currents: A laboratory study. *Journal of Marine and Petroleum Geology*, 28(1), 744-760.
- Wu, C. S. & Dai, A. (2019). Experiments on two-layer stratified gravity currents in the slumping phase, *Journal of Hydraulic Research*, 57(4). 115-131.



## Numerical Investigation of Density Current Hydraulic Parameters due to the Curvature of the Channel Body

Mohammad Hosseini\* and Mohammad Hadi Fattahi<sup>2</sup>

\* Corresponding Author: Department of Civil Engineering, Ghirokarzin Center, Islamic Azad University, Ghirokarzin, Iran. Email: m.h.8894@gmail.com

Received: 22 April 2021, Accepted: 2 June 2021

### Introduction

Density difference causes density flow. Density flow is the the movement of the forehead, body, and tail of the heavy fluid into the ambient flow, and the buoyancy or gravity force causes the drive force. The movement of dense current under clear water creates a shear layer at the interface between clear water and density fluid. Therefore, at the interface, many cuts and vortices are created and this causes the entrainment of smooth water and density flow, which reduces the amount of density difference and the buoyancy force. Hosseini & Fattahi (2020) showed that the variations in the waterway shape causes higher velocity of density flow and decreases the flow thickness. Also, increasing the density of density flow, increases the maximum velocity in velocity profiles. This increase in the maximum velocity of the density flow is more pronounced in streams with higher inlet flow. The velocity profile patterns in the wall and jet area of the density flow body are influenced by the flow regime.

### Materials and Methods

In this research, the density flow is illustrated in 3 different models according to Figure 1. The opening rate of the density flow valve is considered to be 1 cm. In this research, we have tried to show the effect of curvature at 180° bend and sinusoidal shape restricted channel and the flood plain. In this simulation the channel with 4 different longitudinal slopes, 0.002, 0.005, 0.008 and 0.02, are modeled and also 4 different densities, 0.00667, 0.00727, 0.00859 and 0.01 g / cm<sup>3</sup>, and 4 f Froude numbers, 1.2, 3, 5 and 8, have been used. Moreover six different mesh gridding for the flood plain and six different mish gridding for the channel are considered. it should be mentioned that 6 types of turbulence models (The k-ε model (standard, RNG, investigable), the kw model (standard, SST) and the RSM model (linear strain-pressure) are used.

### Results and Discussion

Four types of networks were selected for finite channel with sinusoidal curvature. Figure (3) compares the different mesh gridding with the tested mesh and it was observed that in the range close to the bed, at high speeds, meshes with dimensions of 60 × 20 × 140 are very close to the experimental model developed by Hosseini & Fattahi (2020). Also, considering all 3 optimal models for turbulence models, k-ε models can be considered more optimal than k-ω and RSM models. The effects of the increasing slope of the flume bed in the wall area is more tangible than in the jet area while Froude number and input density are the same. On the other hand, increasing the slope of the channel bed from 0.2% to 2%, reduces the density flow thickness along the channel. As a result, the flow velocity shows an increase in the density flow which causes the growth of the drive force and will increase the turbulent flow velocity by increasing the inlet Froude number from 1.22 to 8. In all laboratory data, the density current concentration profile in the jet area shows a higher dispersion of 47% than the wall area. By increasing the slope of the channel from 0.2% to 2%, the dispersion rate increases by 65%, but by increasing the density rate of the density current from 0.00667 g / cm<sup>3</sup> to 0.02 g / cm<sup>3</sup>, this dispersion rate

decreases by 21%. Richardson data and entrainment ratio in model No.1 increased by 10% compared to the experimental model and also these data increased by 19% in model No.2 compared to the experimental model.

### **Conclusion**

In this research, we tried to simulate the three-dimensional density flow in models with 180 degree bend and limited sinusoidal curvature as well as sinusoidal patterns with plain flood. Also, the most optimal computational mesh, turbulence model, slope, density and Froude number are investigated as long as the studies include the depth profiles of velocity, density, turbulence, etc. in a situation where the channels are curved. Moreover, by increasing the number of Froude numbers from 1.22 to 8, due to model number 1 with 180 degree curvature, the pattern of density profile decreases by 19% and 21.3% compared to models number 2 and 3, respectively. Also, in all laboratory data, the density current concentration profile in the jet area shows a higher dispersion of 47% than the wall area. With increasing the slope of the channel from 0.2% to 2%, the dispersion rate increases by 65%. Richardson number has established a significant relationship with the entrainment ratio, which has a correlation of 0.71. Also the numerical entrainment ratio (for all three models) increased by 4.4% compared to the experimental model.

### **Acknowledgments**

We would like to thank Water and Hydraulic Laboratory of Shiraz University for their effective cooperation.

### **Keywords**

Density current, Computational fluid dynamics, K- $\epsilon$  model of RNG type, Entrainment ratio, Richardson number