



شبیه‌سازی عددی جریان گل آلود سه‌بعدی حاوی دو نوع ذره در یک کانال آزمایشگاهی در حضور مانع

صبا تیموری، احسان خواصی*

دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه زنجان، زنجان، ایران

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۳۹۷-۰۶-۰۲
بازنگری: ۱۳۹۷-۰۸-۲۵
پذیرش: ۱۳۹۷-۰۹-۱۱
ارائه آنلاین: ۱۳۹۷-۱۰-۰۶

کلمات کلیدی:

جریان چگال پیوسته
مانع
آشفستگی
ذرات
شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ

خلاصه: در این پژوهش انتشار جریان چگال پیوسته سه‌بعدی حاوی دو نوع ذره در برخورد با مانع به روش گردابه‌های بزرگ و با استفاده از کد اپن فوم، به‌صورت عددی مدل‌سازی شده‌است. به علت تعداد زیاد ذرات معلق، از روش اویلری-اویلری استفاده شده است و برای هر نوع ذره یک معادله غلظت، که دارای پارامتر سقوط ذرات است، حل می‌شود. نتایج نشان می‌دهند که قبل از مانع تغییر چندانی در پروفیل سرعت جریان در حالت با مانع و بدون مانع ایجاد نمی‌شود، ولی حضور مانع سرعت ماکزیمم جریان را ۱۰ درصد کاهش می‌دهد. هم‌چنین بار ذرات معلق نیز در عرض کانال بر روی مانع کاهش می‌یابد. در حالت شبه پایدار نهایی، غلظت ماکزیمم (بعد از مانع) $15/3$ درصد نسبت به حالت بدون مانع کاهش یافته است. با افزایش قطر ذرات تا ۲۰ و ۳۰ میکرون، ماکزیمم غلظت به ترتیب $12/5$ و $22/3$ درصد افزایش می‌یابد. بار ذرات معلق نیز برای ذرات با قطر ۲۰ و ۳۰ میکرون به ترتیب ۲۱ و ۶۸ درصد کاهش می‌یابد. در نتیجه ذرات با قطر بیش‌تر، زودتر و بیش‌تر رسوب می‌کنند. تغییر غلظت ورودی در حالت ذره با قطر کمتر، موجب افزایش بار ذرات معلق به میزان $11/2$ درصد شده و جریان قابلیت حمل بار معلق بیش‌تری را خواهد داشت.

۱- مقدمه

بیشتر جریان‌های چگالی که تأثیرگذار در طبیعت هستند، جریان‌های حاوی ذرات می‌باشند. بررسی این جریان‌ها نیازمند آشنایی با رفتار جریان و پیچیدگی‌های موجود در آن است. هم‌چنین، مطالعه کارهای انجام شده توسط محققین قبلی کمک می‌کند تا با دید بهتر و بدون تکرار مراحل ابتدایی به انجام تحقیقات نوین پرداخته شود.

محققان بسیاری به بررسی آزمایشگاهی جریان چگال^۱ و گل‌آلود^۲ روی بستر صاف و یا بستر با مانع پرداخته‌اند. هدف از این مطالعات پیش‌بینی تغییرات زمانی پارامترهای عمومی مانند سرعت پیشانی و ارتفاع پیشانی بوده‌است. اکثر این پژوهش‌ها در حالت اختلاف چگالی کم انجام گرفته یعنی حالتی که تقریب بوزینسک معتبر است. حجم بالای محاسبات و پرهزینه بودن روش‌های جدید، مانند شبیه‌سازی

گردابه‌های بزرگ^۳ و شبیه‌سازی مستقیم عددی^۴ موجب شده‌است تا تعداد مقالات ارائه شده با این روش‌ها، بسیار محدود باشد. تعداد محدودی مقالات چاپ شده برای جریان‌های با رینولدز بالا به روش شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ وجود دارد.

از مطالعات انجام شده می‌توان به کار زوردان^۵ و همکاران [۱] اشاره کرد که درون آمیختگی و رسوب ذرات را در سیال چگال بررسی کردند. آن‌ها نشان دادند که میانگین مولفه سرعت عمودی و تنش برشی سطح با اولین لحظه‌های درون آمیختگی رسوبی ارتباط زیادی دارد. این پژوهش نشان می‌دهد که جنس سطح بستر و حرکت جریان آشفته در نزدیکی بستر یکدیگر را تحت تأثیر قرار می‌دهند. هندسه جبهه جریان چگال با افزودن رسوب تغییر می‌کند، که نشان می‌دهد علاوه بر رسوب، تلفات انرژی اضافی در جبهه جریان اتفاق می‌افتد [۱].

3 Large Eddy Simulayion (LES)
4 Direct Numerical Simulation (DNS)
5 Zordan

1 Density current
2 Turbidity current

* نویسنده‌دار مکاتبات: khavasi@znu.ac.ir



اتولنگی^۱ و همکاران [۲]، جریان چگال بالا رونده از بستر شیب‌دار را با استفاده از روش شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ شبیه‌سازی کردند تا درون‌آمیختگی و اختلاط بین محیط اطراف و لایه چگال را بررسی کنند. نتایج نشان داد که هم عدد فرود و هم عدد رینولدز بر روی اختلاط و درون‌آمیختگی مؤثرند.

در مقاله پلمارد و همکاران^۲ [۳]، تاثیر دقت شبکه‌بندی بر شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ در جریان چگال برای حالت رهاسازی توده بررسی شده‌است. شبیه‌سازی‌ها با فرض بویسک توسط یک مدل اسمگورینسکی در محدوده‌ای از اعداد رینولدز شناوری انجام شده‌است. در این پژوهش نشان داده شد که در اعداد رینولدز کم، مدل آشفتگی بسیار محدود شده و روش شبیه‌سازی عددی مستقیم برای آن مناسب‌تر است. پلمارد و همکاران^۲ [۳] با بررسی پروفیل عمودی نسبت ویسکوزیته مقیاس زیرشبکه^۴ به ویسکوزیته مولکولی و تنش برشی سابگرید به تنش برشی رینولدز به روش حل بهتری از شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ رسیده‌اند.

مهدی‌نیا و همکاران [۴]، جریان چگال از نوع رهاسازی توده^۵ با حجم کم را در کانال مستقیم و انحنادار به روش شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ مطالعه کرده‌اند. شبیه‌سازی آن‌ها نشان می‌دهد که جریان ثانویه از کناره داخلی مقطع به سمت کناره خارجی آن در نزدیکی کف کانال ایجاد می‌شود. الگوی جریان ثانویه در دنباله تغییر کرده و در قسمت پیشانی تقریباً وجود ندارد.

در تحقیق دیگری اوتولنگی و همکاران [۵]، به بررسی درون‌آمیختگی و اختلاط جریان چگال رهاسازی توده برای اختلاف چگالی‌ها و نسبت ابعادی مختلف با استفاده از شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ پرداختند. آن‌ها همچنین با انجام آزمایش‌هایی نتایج عددی به‌دست آمده را اعتبارسنجی کردند و نتایج ایشان نشان داد که با افزایش اختلاف چگالی ورودی و کاهش نسبت ابعادی نرخ اختلاط افزایش می‌یابد.

در زمینه شبیه‌سازی جریان چگال در برخورد با مانع به روش شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ و شبیه‌سازی مستقیم عددی، تحقیقات کم‌تری صورت گرفته‌است که در این میان می‌توان به تحقیقات

- 1 Ottolenghi
- 2 Pelmard
- 3 Pelmard
- 4 Subgrid Scale (SGS)
- 5 Lock Exchange

گنزالز^۶ و همکاران [۶] اشاره کرد. آن‌ها تغییرات نیروی برا و پسا به هنگام انتشار جریان چگال بویسک روی استوانه مربعی به صورت عددی بررسی کردند. در این تحقیق از روش شبیه‌سازی مستقیم عددی دوبعدی برای اعداد رینولدز نسبتاً کم و از روش شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ سه‌بعدی برای اعداد رینولدز نسبتاً بزرگ استفاده شده‌است. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد تا زمان برخورد جریان به استوانه، ضریب پسا به صورت نمایی افزایش می‌یابد، بعد از آن به شدت نوسانی شده و سرانجام به مقدار تقریباً یکنواخت خود در حالت شبه‌پایدار نزدیک می‌شود. علاوه بر این گنزالز و همکاران [۶] نشان داده‌اند که اگر ارتفاع مانع از مقدار خاصی بزرگ‌تر شود، اثر مانع در کاهش سرعت جریان و تغییرات بعدی، پایستار خواهد بود و تا رسیدن جریان به انتهای کانال باقی خواهد ماند. در شبیه‌سازی دوبعدی اعداد رینولدز نسبتاً بالا، در کل جریان ساختارهای جریان به صورت غیرفیزیکی به هم پیوسته هستند، بنابراین نوسانات در نیروی پسا و برا بیش از اندازه پیش‌بینی می‌شود.

نصرآزادانی^۷ و همکاران در چهار تحقیق خود [۷-۱۰]، به بررسی رفتار جریان چگال رهاسازی توده با استفاده از روش شبیه‌سازی مستقیم عددی پرداختند. در تحقیق اول نصرآزادانی و میبرگ [۸]، جریان گل‌آلود حاوی چند نوع ذره در برخورد با مانع گاوسی سه‌بعدی (برای مشابهت‌سازی با هندسه کف بستر دریا) را بررسی کردند. نتایج برخورد جریان با دو مانع با ارتفاع متفاوت با نتایج جریان منتشرشده بر روی یک بستر صاف مقایسه شده‌است. علاوه بر این اثرات سرعت سقوط ذرات بر روی جریان در مقایسه با جریان بدون ذره مطالعه شده‌است. نتایج نشان داده که اثر هندسه کف بر روی سرعت پیشانی جریان گل‌آلود بسیار ضعیف‌تر از اثر سرعت سقوط ذرات است.

نصرآزادانی و همکاران [۹]، با استفاده از شبیه‌سازی عددی مستقیم جریان گل‌آلود رهاسازی توده را با توزیع یک، دو و چند ذره در برخورد با مانع گاوسی مورد بررسی قرار دادند. تعدادی از مشخصات جریان، همچون پروفیل رسوب، محل پیشانی، جرم ذرات معلق و طول پیش روی جریان بحث شده‌است. آن‌ها همچنین تأثیر مانع سه‌بعدی گاوسی بر روی الگوی رسوب جریان را مطالعه کردند.

نصرآزادانی و میبرگ [۷]، جریان گل‌آلود دو ذره را در برخورد با بستر صاف و مانع گاوسی با تمرکز بر روی پروفیل رسوب ذرات ریز و

6 Gonzalez
7 Nasr-Azadani

مستقیم عددی شبیه‌سازی کرده‌اند. در این پژوهش به بررسی اثر حضور بیش از یک ذره روی رفتار جریان پرداخته شده و نتایج نشان‌دهنده تأثیر شدید تغییر کسرذرات ورودی بر روی جمله انرژی می‌باشد.

کارهای عددی انجام شده در زمینه برخورد جریان‌های چگال با مانع با استفاده از روش گردابه‌های بزرگ، عمدتاً در جریان چگال از نوع رهاسازی توده است و جریان چگالی از نوع پیوسته و حاوی ذره با دیدگاه اوپلری-اوپلری با این روش بررسی نشده است. این مسئله انگیزه‌ای جهت انجام کار حاضر شده است. این روش هم‌چنین قادر است پدیده‌هایی مانند پرش هیدرولیکی داخلی، ناپایداری در مرز مشترک دو سیال، ساختارهای آشفته کنار دیوار، توزیع کمیت‌های آشفته و ناپایداری‌ها را در جریان به خوبی نشان دهد، در حالی که روش متوسط‌گیری رینولدزی به علت استفاده از میانگین‌گیری در معادلات قادر به انجام آن نیست. دیدگاه اوپلری-اوپلری برای سیال‌های چگال حاوی ذرات کوچک، بهترین انتخاب است چرا که با کمترین هزینه محاسباتی ممکن، نتایج قابل قبولی بدست می‌آید. در این حالت معادله غلظت با معادله مومنوم به‌صورت کوپل، حل می‌شوند.

به کمک نوشتار حاضر می‌توان حرکت جریان چگال پیوسته را در مواجهه با تغییرات هندسه سطح به‌صورت سه‌بعدی و به روش شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ بررسی کرد. در این پژوهش سعی شده با قرار دادن مانع، رفتار جریان چگالی و نحوه رسوب‌گذاری ذرات در برخورد با تغییرات توپوگرافی مورد بررسی قرار گیرد. در پژوهش حاضر جریان چگال حاوی دو دسته ذره شبیه‌سازی شده است و تأکید تحلیل‌ها بر اثر مانع بر دینامیک و آشفتگی جریان چگال و نحوه رسوب‌گذاری ذرات است. هدف اصلی در این مقاله مطالعه رفتار رسوب‌گذاری جریان چگال است. جریان حاوی ذره و اثر قطر ذرات بر روی موقعیت پیشانی جریان و بار ذرات معلق مورد مطالعه قرار گرفته است.

۲- مسئله مورد بررسی

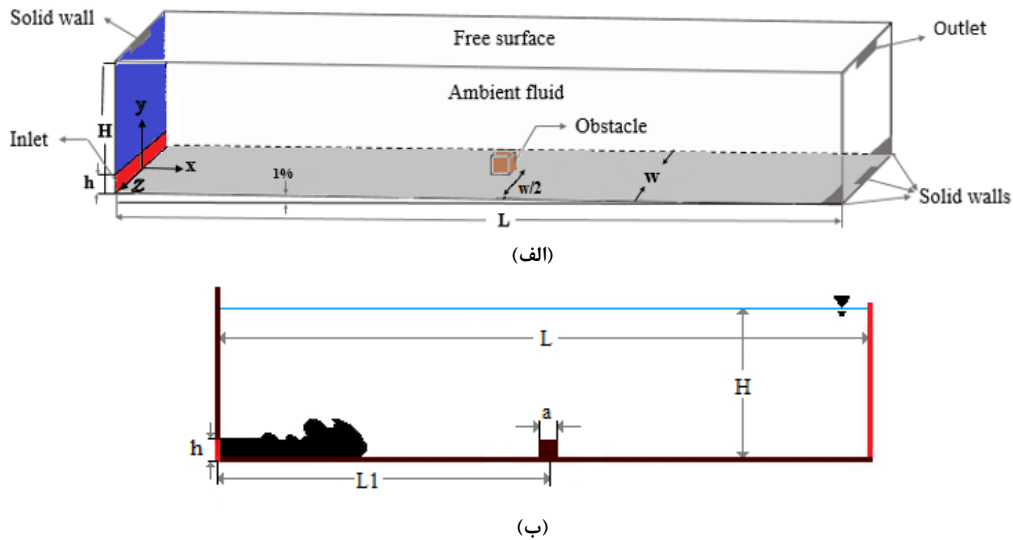
در پژوهش حاضر انتشار جریان چگال حاوی دو ذره در یک کانال سه‌بعدی مدل‌سازی شده است. مشخصات میدان فیزیکی در این مطالعه متناسب با شرایط به‌کار گرفته شده در آزمایشات تجربی

درشت مطالعه کردند. آن‌ها مناطقی را با رسوب ضعیف و قوی به‌خاطر حضور مانع مشاهده کردند. ایشان علاوه بر این با استفاده از نشانگرهای لاگرانژی برای دنبال کردن ذرات ریز و درشت در جریان و هم‌چنین محل رسوب آن‌ها با توجه به موقعیت اولیه‌شان بررسی کردند. با استفاده از نقشه نهایی رسوب، مشخص شد که مانع قوی‌ترین تأثیر را بر روی ذراتی که در موقعیت میانی در زمان رهاسازی هستند، دارد. نصرآزادانی و همکاران [۱۰]، دینامیک اختلاط جریان گل‌آلود در برخورد با پستی و بلندی‌های کف دریا با ارتفاعات مختلف را بررسی کردند. نشان داده شده که سقوط ذرات نقش مهم و اثر قابل توجهی بر روی لایه‌بندی چگالی محلی و در نتیجه پایداری جریان دارد. سقوط ذرات باعث می‌شود تا جریان گل‌آلود اختلاط شدیدتری با محیط اطرافش نسبت به جریان چگال بدون ذره داشته باشد.

نجف‌پور [۱۱]، جریان چگال پیوسته را به روش شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ مورد بررسی و مطالعه عددی قرار داده است. هدف از این تحقیق بررسی اثر ارتفاع مانع مستطیلی روی رفتار جریان چگال است. بر اساس نتایج این تحقیق می‌توان گفت ارتفاع مانع پارامتر تأثیرگذار در توزیع سرعت و غلظت جریان است. در مقاطع قبل از مانع، سرعت متوسط جریان کاهش و ارتفاع آن افزایش می‌یابد. از طرف دیگر با افزایش ارتفاع مانع، جریان بازگشتی ناشی از حضور موانع قوی‌تر بوده و با سرعت بیشتری انتشار می‌یابد.

عباس‌زاده [۱۲]، به بررسی اثرات افزایش تعداد موانع و تغییر هندسه آن‌ها بر پارامترهای اساسی جریان چگال پیوسته به روش شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ پرداخته است. نتایج این پژوهش نشان می‌دهد به طور کلی در حالتی که بیش از یک مانع یکسان بر سر راه جریان چگالی قرار بگیرد، مانع اول تعیین‌کننده وضعیت بالادست خواهد بود و موجب آرام شدن جریان در این ناحیه می‌شود درحالی‌که وضعیت آشفتگی پایین‌دست موانع به شدت به مانع آخر و پدیده‌های حول آن بستگی دارد. هم‌چنین در حالتی که از موانع با هندسه متفاوت و ارتفاع یکسان استفاده شده باشد، می‌توان گفت تغییرات شکل هندسی تنها در پایین‌دست و روی موانع تأثیرگذار بوده و در بالادست مانع، پارامتر تأثیرگذار تنها ارتفاع جریان و مانع است.

اخیراً نیز فرانسسیسکو^۱ و همکاران [۱۳]، جریان چگال حاوی دو ذره را برای کانال دوبعدی و سه‌بعدی با استفاده از روش شبیه‌سازی



شکل ۱: شماتیک فضای هندسی مسئله الف) سه بعدی ب) دو بعدی

Fig.1: Geometric space schematic of problem a) three-dimensional b) two-dimensional

بین یک تا صفر می باشد که در آن چگالی متوسط مخلوط آب و ذرات در ورودی، ρ_w چگالی آب تمیز و حداکثر چگالی جریان است. معمولاً جاذبه کاهش یافته به شکل $g' = \beta g$ تعریف شده است. با توجه به مشخصات جریان چگال جاذبه کاهش یافته برابر 0.117 m/s^2 است (برای ایجاد شرایط ورودی مشابه با آزمایش های تحقیقات قبلی (فرود $1/85$ و رینولدز 3300) این مقدار انتخاب شده است). عدد رینولدز جریان بر مبنای ارتفاع دریچه ورودی 3300 می باشد، که کاملاً در محدوده رژیم جریان آشفته قرار گرفته است. سمت راست کانال با اعمال شرط مرزی همرفتی ارائه شده توسط پیرس [۱۵] به عنوان خروجی کانال در نظر گرفته شده است. همچنین در مرز بالایی هندسه حل، مطابق مطالعات قبلی [۱۲ و ۱۶] شرط تقارن اعمال شده و به عنوان سطح آزاد در نظر گرفته می شود. در تمامی موارد گام زمانی برابر 0.008 ثانیه قرار داده شده است. انتخاب گام زمانی به گونه ای است که در کل زمان محاسبات، عدد کورانت محلی همواره کمتر از 0.6 باشد تا به این وسیله اطمینان از پایداری و دقت حل جریان حاصل شود. نتایج بدست آمده از حل این مسئله در حالت شبه پایا در نظر گرفته شده و همچنین γ^+ در این پژوهش حدود یک است.

۳- معادلات حاکم

در این پژوهش از روش شبیه سازی گردابه های بزرگ برای

گارسیا [۱۴] انتخاب شده است. ابعاد و پارامترهای مختلف این مدل سازی جهت کاربردی کردن نتایج آن به صورت بی بعد شده نمایش داده شده اند. شکل ۱ شماتیکی از فضای هندسی شبیه سازی را نشان می دهد. بستر این کانال به صورت سطحی صاف با شیب ملایم 1% در نظر گرفته شده است. با این حال هندسه به کار رفته در شبیه سازی به صورت یک کانال افقی است و اثر شیب در مؤلفه های گرانش اعمال شده است. بنابراین برای در نظر گرفتن اثر شیب 1% درصد مؤلفه های شتاب گرانش به صورت $(0, -9/8055, 0)$ و $(0/098055, -9/8055, 0)$ تعیین گردیده است. مانع به کار رفته در این بخش همانطور که در شکل ۱ دیده می شود، به صورت یک مکعب در نظر گرفته شده است. محل قرارگیری مانع در وسط کانال انتخاب شده تا پیشانی جریان پیش از رسیدن به مانع به حالت شبه پایدار خود برسد و تأثیرات ورودی کانال بر آن قابل چشم پوشی باشد. همچنین مقادیر هریک از پارامترهای هندسی در جدول ۱ آمده است.

برای بی بعد کردن ابعاد هندسی از ارتفاع ورودی کانال (h) استفاده شده است. شرط مرزی ورودی کانال به صورت سرعت ثابت در نظر گرفته شده است. به بیان دیگر جریان چگال در طول شبیه سازی همواره با سرعت ثابت 0.11 متر بر ثانیه از دریچه ورودی وارد کانال می شود. این سرعت متناسب با فرود $1/85$ در ورودی کانال انتخاب شده است. همچنین در این پژوهش $\beta = (\rho_{\max} - \rho_w) / (\rho_w)$ ، یک ثابت و $C = (\rho_m - \rho_w) / (\rho_{\max} - \rho_w)$ ، غلظت بدون بعد با مقدار

جدول ۱: پارامترهای هندسی شبیه‌سازی
Table 1: Geometric parameters of simulation

W	H	h	L	LI	a	پارامترها
۶/۷	۱۰	۱	۱۴۳	۷۱/۵	۰/۸۶	h مقادیر

استفاده گردید. با توجه به معادله پیوستگی می‌توان نوشت [۱۲]:

$$\frac{\partial}{\partial x_k} \left(v_{SGS} \frac{\partial u_l}{\partial x_k} \right) = \frac{\partial}{\partial x_k} (2v_{SGS} S_{lk}) \quad (1)$$

که در آن نرخ کرنش فیلترشده می‌باشد. با استفاده از رابطه (۱) در معادله مومنتوم، معادلات پیوستگی، مومنتوم و غلظت به ترتیب به شکل نهایی زیر درمی‌آیند [۱۲]:

$$\frac{\partial u_k}{\partial x_k} = 0 \quad (2)$$

$$\frac{\partial u_l}{\partial t} + u_k \frac{\partial u_l}{\partial x_k} = v_w \frac{\partial^2 u_l}{\partial x_k \partial x_k} + \frac{\partial}{\partial x_k} (2v_{SGS} S_{lk}) - \frac{1}{\rho_w} \frac{\partial p}{\partial x_l} - g'c \delta_{21} \quad (3)$$

$$\frac{\partial c_n}{\partial t} + u_k \frac{\partial c_n}{\partial x_k} = \alpha \frac{\partial^2 c_n}{\partial x_k \partial x_k} + \frac{\partial}{\partial x_k} \left(\alpha_{SGS} \frac{\partial c_n}{\partial x_k} \right) \quad (4)$$

باید توجه کرد که برای سادگی معادلات، علامت خط روی کمیت‌های فیلترشده حذف شده است و تمامی کمیت‌های موجود از نوع فیلترشده می‌باشند. ρ_w و چگالی و ویسکوزیته سیال محیطی (آب) می‌باشند. هم‌چنین جهت جاذبه در خلاف جهت y یا z می‌باشد. در معادلات بالا از تقریب بوزینسک برای غلظت استفاده شده، چرا که در تمامی شبیه‌سازی‌های این تحقیق، اختلاف چگالی دو سیال کم (۲/۱ درصد) می‌باشد. با توجه به این فرض اثرات تغییرات چگالی، در معادله مومنتوم، فقط روی ترم گرانش اعمال می‌شود.

نیروی محرکه حرکت، اختلاف چگالی می‌باشد، این نوع از جریان‌ها با از دست‌دادن ذرات به‌واسطه رسوب و در نتیجه نزدیک به صفر شدن اختلاف چگالی خود، بعد از گذشت زمان متوقف و

شبیه‌سازی جریان استفاده شده است. این روش قادر به محاسبه کمیت‌های سه بعدی و ناپایا به‌طور لحظه‌ای می‌باشد که روش‌های معادلات نویراستوکس به روش میانگین‌گیری رینولدز^۱ قادر به چنین محاسباتی نیستند. از نظر هزینه روش شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ بین روش‌های میانگین‌گیری رینولدز و شبیه‌سازی عددی مستقیم قرار دارد و در صورت ریزکردن شبکه در کنار دیوار و استفاده از شبکه‌های سه‌بعدی در رینولدزهای بالا، هزینه آن می‌تواند خیلی بالا باشد. با این وجود، پیشرفت رایانه‌های امروزی امکان استفاده از مدل‌هایی را که در گذشته امکان تست آن‌ها در رینولدزهای بالا وجود نداشته است را می‌دهند. محدوده کاربرد روش شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ بسیار وسیع می‌باشد و تقریباً تاکنون در مورد اکثر جریان‌های معروف و پیچیده به‌کار گرفته شده است، مانند احتراق، جریان‌های تراکم‌پذیر و جریان‌های چگال [۱۲].

در روش شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ، با استفاده از یک فیلتر پایین-گذر^۲، اعداد موج (عدد موج $k = 2\pi/l$ با عکس مقیاس طولی متناسب است) بزرگ‌تر حذف می‌شوند، به نحوی که میدان سرعت فیلترشده حاصل $\bar{u}(x,t)$ ، روی یک شبکه نسبتاً درشت به اندازه کافی قابل تفکیک باشد (معمولاً مقیاس طولی سلول‌ها در شبکه h متناسب با عرض فیلتر Δ است). در ایده‌آل‌ترین حالت برای روش شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ، عرض فیلتر کمی کوچک‌تر از مقیاس طولی کوچک‌ترین گردابه‌های دارای انرژی یا است [۱۲].

معادلات نهایی حاکم بر این جریان به شکل فیلترشده در این قسمت آورده شده است. در این تحقیق از فیلتر جعبه‌ای سه‌بعدی یا فیلتر ریشه سوم حجم سلول (که معادل است با میانگین‌گیری روی حجم) استفاده شده است و برای تضمین جواب‌های بهتر کنار دیواره از تابع میرایی وندریست پیشنهاد شده توسط معین و کیم [۱۷]

1 Reynolds Averaged Navier-Stokes(RANS)
2 Low- Pass Filter

شود، تأثیر چندانی بر نتایج شبیه‌سازی ندارد، بنابراین در این معادله عدد اشمیت برابر ۱ در نظر گرفته می‌شود. تنها کمیت باقی‌مانده در این معادله برای بسته شدن می‌باشد. از آنجا که قبلاً کمیت زیرشبکه α_{SGS} از طریق مدل اسماگورینسکی محاسبه شده، برای محاسبه α_{SGS} می‌توان از تعریف عدد اشمیت زیرشبکه، به شکل زیر استفاده نمود [۱۲]:

$$\alpha_{SGS} = \nu_{SGS} / S c_{SGS} \quad (7)$$

در بسیاری از تحقیق‌ها مقدار عدد اشمیت آشفته ثابت یک در نظر گرفته می‌شود [۲۰ و ۲۱]. اما در اینجا برای دقت بیشتر در نتایج حل، از یک الگوریتم دینامیک برای یافتن عدد اشمیت استفاده می‌شود. ونایاماگامورفی و همکاران [۲۲]، با استفاده از انجام شبیه‌سازی‌های مختلف مقدار زیر را برای عدد اشمیت آشفته پیشنهاد نمودند:

$$Sc_{SGS} = 0.4 \exp(-2.5F_k) + 1 \quad (8)$$

که در آن‌ها مقادیر عدد فرود آشفته و شناوری از روابط زیر بدست می‌آیند:

$$F_k = \varepsilon / Nk \quad (9)$$

$$N = \sqrt{-g/\rho} (\partial\rho/\partial z)^{1/2} \quad (10)$$

که در آن ε و N به ترتیب انرژی و اتلاف آشفته می‌باشند. در مسائل مختلفی که در آن‌ها نیاز به مرز خروجی است. از شرط خروج همرفتی^۲ استفاده شده است. در این شرط مرزی که توسط پیرس [۱۵] ارائه گردیده، در مرز شرط زیر اعمال می‌شود:

$$\partial F / \partial t + V \partial F / \partial x = 0 \quad (11)$$

که در آن می‌تواند فشار، سرعت و یا غلظت باشد و سرعت

مستهلك می‌شود، درحالی‌که معادله غلظت عادی قادر به شبیه‌سازی این رخداد نمی‌باشد. برای اصلاح این معادله، ترم سقوط به معادله غلظت افزوده می‌شود، این ترم با توجه به قطر ذرات و سرعت سقوط استوکس، فرایند ته‌نشینی و استهلاک را به‌خوبی نمایش می‌دهد، روابط زیادی برای به‌دست آوردن سرعت سقوط وجود دارند که مهم‌ترین آن‌ها رابطه استوکس است. این رابطه به صورت زیر می‌باشد:

$$v_f = g D_p^2 \frac{\rho_p - \rho_w}{18\mu} \quad (5)$$

در این رابطه μ لزجت سیال است که تقریباً برابر لزجت آب در نظر گرفته شده و از اثر ذرات روی آن صرف‌نظر می‌شود و قطر متوسط ذرات می‌باشد. برای بدست آوردن رابطه استوکس فرض می‌شود که تک ذره‌ای کروی بدون شتاب و با عدد رینولدز زیر یک درحال سقوط است و مقدار سرعت سقوط از برابری نیروهای وزن و پسا به‌دست می‌آید. در این رابطه برهم‌کنش بین ذرات در نظر گرفته نمی‌شود. با اضافه کردن ترم سقوط به رابطه (۴)، معادله غلظت برای جریان چگال حاوی دو ذره به‌صورت زیر در می‌آید:

$$\begin{aligned} \frac{\partial c_n}{\partial t} + u_k \frac{\partial c_n}{\partial x_k} &= \alpha \frac{\partial^2 c_n}{\partial x_k \partial x_k} + \frac{\partial}{\partial x_k} \\ n=1,2, c &= c_1 + c_2 \quad (6) \\ \left(\alpha_{SGS} \frac{\partial c_n}{\partial x_k} \right) &+ \nu_{fn} \frac{\partial c_n}{\partial x_k} \delta_{2k} \end{aligned}$$

همانگونه که در رابطه (۵) دیده می‌شود، قطر ذرات در سرعت سقوط ذرات (سرعت سقوط استوکس) تأثیر دارد و سرعت سقوط بر روی معادله غلظت. قطر ذرات براساس قطرهای متوسط مرسوم برای ذرات کائولن که معمولاً برای آزمایش‌های جریان گل‌آلود استفاده می‌شود، در نظر گرفته شده است [۱۸].

از روابط (۲)، (۳) و (۴)، رابطه (۲) بسته می‌باشد. برای رابطه (۳) نیز را از روش اسماگورینسکی دینامیک ارائه شده توسط لیلی [۱۹] محاسبه نموده و معادله بسته می‌شود. تنها معادله باقی‌مانده معادله غلظت (۶) می‌باشد. مقدار عدد اشمیت مولکولی^۱ برای جریان گل‌آلود حدود ۷۰۰ می‌باشد، ولی بر اساس نتایج اویی و همکارانش [۱۶] مقدار این پارامتر در صورتی که از مرتبه یک یا بالاتر انتخاب

می‌توان گفت جریان چگالی خودمتشابه^۶ است. اهمیت این مسئله در این است که اولاً در جریان‌های خودمتشابه می‌توان از حل تشابهی^۷ که یک حل تحلیلی است استفاده کرد و ثانیاً می‌توان از صحت داده‌های آزمایشگاهی مطمئن شد زیرا باید پروفیل‌های بی‌بعد شده سرعت روی هم قرار گیرند. محققین زیادی نیز کار مشابهی را برای روی هم انداختن پروفیل‌های سرعت صورت داده‌اند که برای نمونه می‌توان به کارهای انجام شده توسط گارسیا و پارکر [۲۵]، گارسیا [۲۶] و خواصی و همکاران [۲۷] اشاره کرد. به‌منظور بی‌بعدسازی پروفیل‌ها باید مقادیر سرعت، غلظت و ارتفاع جریان را با استفاده از سرعت، غلظت و ارتفاع متوسط عمقی که با استفاده از قوانین فیزیکی حاکم و با توجه به هیدرولیک جریان تعریف می‌شوند، بی‌بعد کرد. برای استخراج روابط مربوط به سرعت، غلظت و ارتفاع متوسط، ابتدا باید روابط بقای جرم و مومنتوم برای جریان نوشته شود. البته چون در هر مقطع چگالی ثابت نیست، باید ضرایب تصحیحی برای این معادلات در نظر گرفت، اما در متون علمی موجود برای جریان چگالی از تعریف زیر و بدون ضرایب تصحیح استفاده شده‌است (برای نمونه می‌توان به گارسیا [۱۴] مراجعه کرد):

$$UH = \int_0^{\infty} u(y) dy \quad (12)$$

$$U^2H = \int_0^{\infty} (u(y))^2 dy \quad (13)$$

$$UCH = \int_0^{\infty} u(y)c(y) dy \quad (14)$$

با حذف H در دو رابطه اول، سرعت متوسط عمقی جریان، U ، و با حذف U از آن دو رابطه، ارتفاع متوسط عمقی، H ، به‌دست می‌آید. غلظت متوسط عمقی نیز با جایگذاری معادله اول در رابطه (۱۴) حاصل می‌شود:

$$U = \frac{\int_0^{\infty} (u(y))^2 dy}{\int_0^{\infty} u(y) dy} \quad (15)$$

$$H = \frac{\left(\int_0^{\infty} u(y) dy \right)^2}{\int_0^{\infty} (u(y))^2 dy} \quad (16)$$

- 6 Self-Similar
7 Similarity Solution

همرفتی در مرز است که در مرز ثابت و برابر مقداری در نظر گرفته می‌شود که شرط پیوستگی جرم در مرز را ارضاء نماید. رابطه (۱۱) بیان می‌کند که جریان در مرز خروجی با سرعت ثابت V به شکل همرفتی به بیرون از مرز هدایت می‌شود. استفاده از این شرط مرزی، طبق تحقیقات انجام شده باعث کاهش انعکاس فشاری در مرز خروجی می‌شود [۱۵] و در تحقیق حاضر اجازه می‌دهد که پیشانی جریان تا جای ممکن به مرز نزدیک شده و حتی از آن خارج شود. از آنجا که در روش شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ لازم است که جملات معادلات با دقت هرچه بیشتر گسسته شوند، تا از قابلیت‌های مدل عددی بیش‌ترین استفاده انجام شود، سعی شده است که دقت گسسته‌سازی تا جای ممکن بالا باشد. برای گسسته‌سازی ترم‌های دیورژانس و لاپلاسین در معادلات از روش کوئیک [۲۳] استفاده شده است که یک روش درجه چهار می‌باشد. برای ترم گرادیان نیز از روش درجه چهار که توسط پیر و همکاران [۲۴] ارائه شده، بهره گرفته شده است. برای گسسته‌سازی زمانی از یک روش درجه دو پسرو استفاده شده است [۱۲]. دستگاه معادلات حاصل از یک روش بایکانجوگیت و با پیش‌بهینه‌سازی از نوع ILU، حل گردیده است [۱۲]. تمامی معادلات تا رسیدن به خطای نسبی 10^{-6} حل شده‌اند.

برای حل مسئله حاضر از کد اپن فوم که کدی با منبع باز^۱، مخصوص محیط لینوکس^۲ و به زبان C^{++} نوع شی‌گرا^۳ می‌باشد، استفاده شده‌است. از آنجا که حل گر روابط (۲) تا (۱۰) در محیط این کد وجود ندارد، حل گر مورد نیاز با اضافه کردن دو معادله غلظت و پارامتر سرعت سقوط به حلگر پیروفوم^۴ آماده شده است. همچنین، برای انجام شبیه‌سازی‌ها از یک کامپیوتر ۱۲ هسته‌ای با پردازنده ۳/۶ گیگاهرتز و رم ۱۶ گیگابایتی استفاده شد. هر اجرا حدود ۵-۶ روز زمان برده است.

۳-۱- بی‌بعدسازی پروفیل‌های سرعت و غلظت

پروفیل‌های سرعت و غلظت در شرایط مختلف جریان‌های چگال تغییر می‌کنند، با بی‌بعد کردن این پروفیل‌ها به کمک پارامترهای متوسط عمقی^۵ جریان چگال، پروفیل‌هایی مشابه بدست می‌آید و

- 1 Open Source
- 2 Linux Operating System
- 3 Objective
- 4 PisoFoam
- 5 Depth Average Parameters

مش لایه مرزی با ضرایب انبساطی مناسب استفاده شده است. این توزیع ابعادی شبکه باعث می‌شود در عین حال که دقت حل مسئله حفظ می‌شود، سرعت محاسبات افزایش یافته و زمان لازم برای کامل شدن شبیه‌سازی کاهش یابد.

برای بررسی استقلال از شبکه حل، نتایج شبیه‌سازی جریان چگال روی کانال با مانع برای سه شبکه با تراکم‌های مختلف در شکل ۲ نشان داده شده است. جزئیات هریک از شبکه‌بندی‌ها و تعداد کل سلول‌ها در جدول ۲ آمده است. شکل ۳ شبکه‌بندی هندسه مسئله بر روی یک صفحه گذرنده از مانع نشان داده شده است، به نحوی که در نزدیکی سطوح مانع به دلیل اهمیت رفتار جریان، شبکه‌بندی به صورت متراکم‌تر در نظر گرفته شده است.

شکل ۲ نشان می‌دهد که نتایج پروفیل‌های سرعت در شبکه‌بندی دوم و سوم به یکدیگر بسیار نزدیک هستند و احتمالاً با افزایش بیشتر تراکم شبکه‌بندی، نتایج تغییر چندانی نمی‌کند. بنابراین شبکه‌بندی سوم می‌تواند انتخاب مناسبی برای این شبیه‌سازی‌ها باشد. علاوه بر این توجه به این نکته ضروری است که در محاسبات پایا در روش شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ، با توجه به ماهیت ناپایای کلی این روش، زمان لازم برای رسیدن جریان به حالت شبه‌پایا خیلی بالاست [۱۲]. با توجه به زمان طولانی مورد نیاز برای انجام محاسبات کامل یک حالت از این شبیه‌سازی‌ها، استفاده از شبکه‌بندی متراکم‌تر با توجه به محدودیت زمانی، از نظر زمانی به صرفه نیست.

برای صحت‌سنجی نتایج این مدل عددی، مسئله برای جریان چگال حاوی دو نوع ذره و برای کانال صاف بدون مانع (با مشخصات هندسی شکل ۱) حل شده و پروفیل‌های بی‌بعد سرعت و غلظت جریان چگال شبیه‌سازی شده با نتایج آزمایشات گارسیا [۱۴] مقایسه شده است. شکل ۴ نتایج پروفیل سرعت و غلظت حل عددی را در کنار نتایج تجربی نشان می‌دهد.

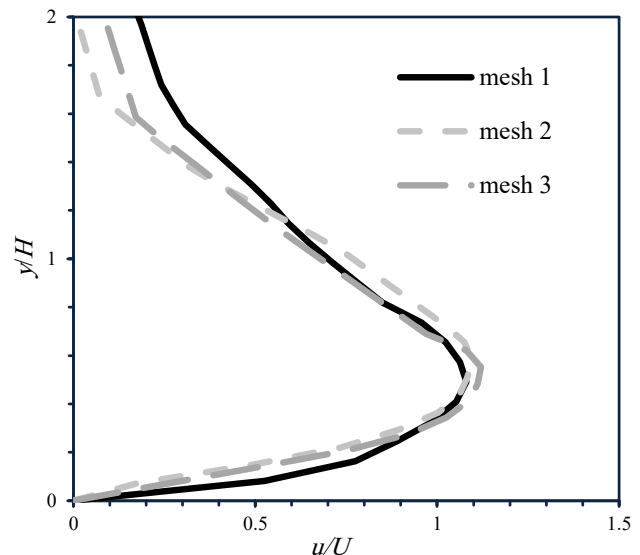
همانطور که از شکل ۴ مشخص است، تطابق خوبی بین نتایج این مدل‌سازی و داده‌های تجربی وجود دارد. این شکل، نتایج حاصل از بی‌بعدسازی پروفیل‌های سرعت و غلظت را در مقطع ۳ متر برای شبیه‌سازی انجام شده در شیب ۱ درصد و ارتفاع ورودی ۳ سانتی‌متر و غلظت ورودی برابر ۰/۴۵ برای هر کدام از دو ذره، نشان می‌دهد. در مقادیر سرعت با U ، ارتفاع با H و غلظت با C بی‌بعد می‌شوند. در شکل ۴ (الف) اختلاف بیشینه سرعت بی‌بعد در شبیه‌سازی عددی و

$$C = \frac{\int_0^{\infty} c(y)u(y)dy}{\int_0^{\infty} u(y)dy} \quad (17)$$

۴- اعتبارسنجی مدل عددی

هندسه مسئله در این مدل‌سازی یک کانال سه‌بعدی است که با فضایی شبیه یک مکعب مستطیل شبیه‌سازی شده است. در گام بعدی این مدل‌سازی برای بررسی اثرات مانع، مکعبی به عنوان مانع فرضی روی کف کانال و در وسط آن قرار می‌گیرد. به منظور بررسی استقلال از شبکه حل، هندسه مطابق شکل ۱ در نظر گرفته شده که در آن راستای هر یک از محورهای مختصات و هم‌چنین محل مبدأ مختصات نشان داده شده است.

برای شبکه‌بندی فضای هندسی از یک شبکه سازمان یافته استفاده شده است. در راستای عمق کانال (Z) تقسیم‌بندی‌ها یکنواخت و در راستای موازی با حرکت جریان (x) در نزدیکی مانع مش ریزتر انتخاب شده است. در راستای عمود بر جریان (y)، سلول‌ها در نزدیکی کف کانال و هم‌چنین در محدوده‌ای که جریان چگال غالباً در آن در حال حرکت است ($y \leq 3h$) تراکم بیشتری نسبت به سایر نواحی دورتر از کف کانال دارند. برای این منظور در فواصلی معین از

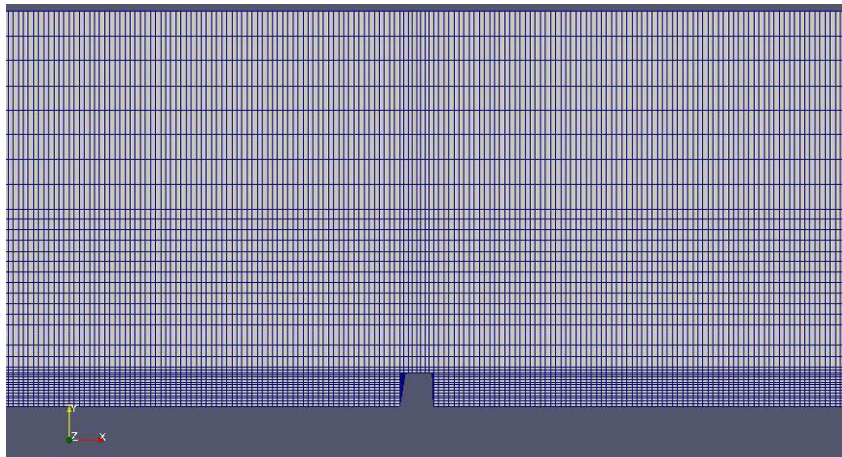


شکل ۲: نتایج شبیه‌سازی جریان چگال روی کانال با مانع برای سه شبکه با تراکم‌های مختلف در $x = 50h$

Fig. 2: Results of density current simulation on the channel with obstacle for three grids with different concentration at $x=50h$

جدول ۲: جزئیات تقسیم‌بندی و تعداد کل سلول‌ها در هر یک از شبکه‌بندی‌ها
Table 2: Details of division and total number of cells in each grid

تعداد تقسیمات در راستای x	تعداد تقسیمات در راستای y	تعداد تقسیمات در راستای z	تعداد کل سلول‌ها
۱۳۰۰	۳۲	۸	۳۸۶۴۸۷
۱۲۰۰	۶۵	۳۰	۲۴۵۷۶۴۹
۲۰۴۴	۴۶	۳۰	۲۹۸۰۰۳۰



شکل ۳: شبکه‌بندی هندسه بر روی یک صفحه گذرنده از مانع
Fig. 3: Geometry grid on a crossed plate of the obstacle

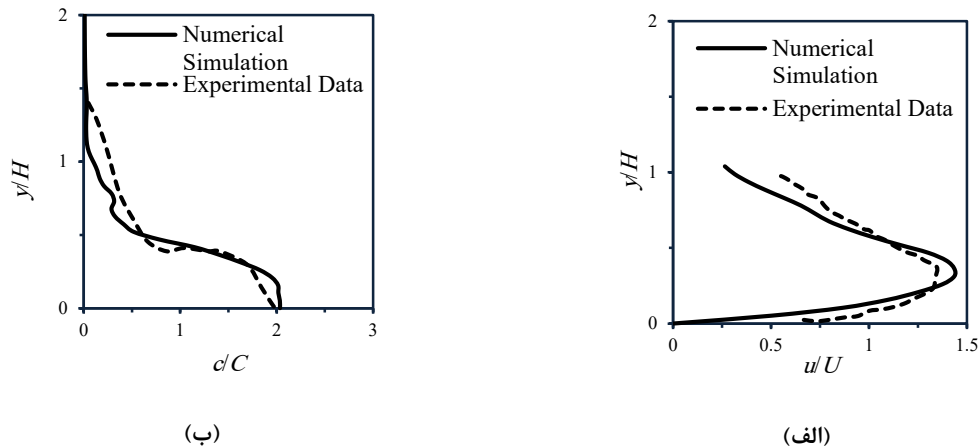
عمقی دارند، که این روابط تقریباً برای همه آزمایش‌ها مقدار یکسانی را نشان می‌دهد. برای مثال آلتیناکار [۲۸] نشان داده است که در آزمایش‌هایی که انجام داده، سرعت ماکزیمم در هر مقطع در همه جریان‌ها تقریباً $1/3$ برابر سرعت متوسط است ($u_{max}/U=1/3$). جدول ۳ مقادیر u_{max}/U به دست آمده در شبیه‌سازی‌های انجام شده را نشان می‌دهد که با مقادیر گزارش شده توسط آلتیناکار و همکاران [۲۸]، گارسیا [۱۴] و خواصی [۲۷] مقایسه شده‌اند.

مقادیر اختلاف با کارهای قبلی نیز در جدول ۳ آمده‌است. با توجه به نتایج ارائه شده در جدول و نمودارهای بی‌بعد شده سرعت می‌توان از صحت نتایج شبیه‌سازی شده اطمینان یافت. در واقع این نتایج نشان می‌دهند که داده‌های حاصل از شبیه‌سازی عددی، به درستی قادر به توصیف رفتار عمومی جریان چگال می‌باشند.

پس از اعتبارسنجی نتایج بدست آمده به روش اویلری-اویلری و اطمینان از صحت جمله سقوط افزوده شده به معادله غلظت، به بررسی تغییر پارامترهای موردنظر، ابعاد ذرات، غلظت ورودی و نیز

داده‌های تجربی برابر $6/2$ درصد است و اختلاف بیشینه غلظت بی‌بعد برابر $3/1$ درصد می‌باشد. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که داده‌های بی‌بعد شده سرعت و غلظت تطابق مطلوبی دارند. در نتیجه می‌توان از سرعت، غلظت و ارتفاعی که از روابط (۴) تا (۶) بدست می‌آید به عنوان یک متغیر بی‌بعدکننده جهت متشابه‌سازی نمودارها استفاده کرد. در جریان چگالی، سرعت بر روی بستر بر اساس اصل عدم لغزش روی دیواره، صفر است که با شیب تندی تا یک مقدار بیشینه افزایش می‌یابد. پس از این مقدار بیشینه، سرعت به تدریج کاهش می‌یابد تا به صفر برسد. البته برای برقراری بقای جرم در هر مقطع، در ارتفاع‌های بالاتر سرعت منفی نیز می‌شود.

علاوه بر موارد فوق، شکل ۵ پروفیل‌های بی‌بعد شده سرعت با استفاده از پارامترهای متوسط عمقی برای شیب ۱ درصد، ارتفاع ورودی ۳ سانتی‌متر و قطر ذرات ۱۲، ۲۰ و ۳۰ میکرون را نشان می‌دهد. آلتیناکار [۲۸] و گارسیا [۱۴] گزارش کرده‌اند که مقادیر ماکزیمم جریان چگال مورد آزمایششان روابطی با مقادیر متوسط



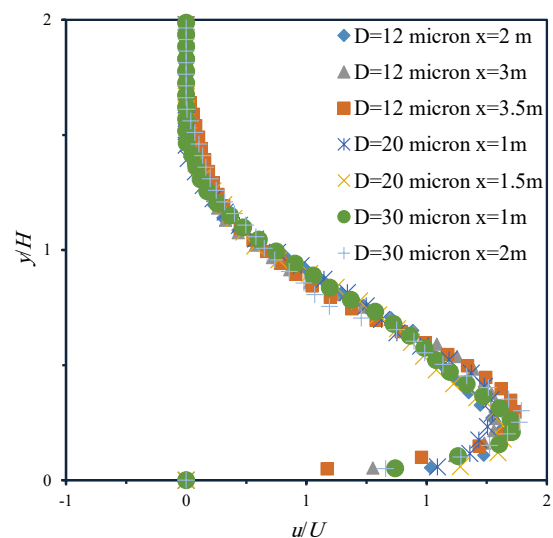
شکل ۴: مقایسه نتایج شبیه‌سازی عددی و داده‌های تجربی [۱۴] برای پروفیل‌های بی‌بعد (الف) سرعت (ب) غلظت روی کانال صاف بدون مانع در $x=100h$
Fig. 4: Comparison of numerical simulation results and experimental data [14] for dimensionless profiles A) Velocity b) Concentrations in the plain channel without obstacle at $x = 100h$

در این بخش همان‌طور که پیش از این گفته شد، تأثیر مانع مربعی بر انتشار جریان چگال پیوسته بررسی می‌شود. برای این منظور سه حالت کانال صاف بدون مانع، کانال با مانع و دو ذره یکسان با غلظت برابر، دو حالت برای کانال با مانع و دو ذره با قطرهای متفاوت و غلظت برابر و دو حالت برای کانال با مانع و دو ذره با قطرهای متفاوت و غلظت‌های نابرابر هر یک به‌طور جداگانه مدل‌سازی و نتایج آن‌ها مقایسه شده است. مشخصات هر یک از این حالات در جدول ۴ آمده است.

۱-۴- ساختار جریان در عبور از مانع

برای درک بهتر دینامیک جریان چگال پیوسته در برخورد با مانع، مراحل عبور جریان چگال از روی مانع در شکل ۶ در ۹ زمان متفاوت نشان داده شده است. در این شکل‌ها برای تشخیص و تحلیل بهتر حرکت لایه‌های مختلف جریان از نمایش گروهی کانتورهای غلظت استفاده شده است.

در شکل ۶ (الف) همان‌طور که مشاهده می‌شود، جریان چگال در مرحله پیش از برخورد قرار دارد. در فاصله‌ای معین پیش از مانع پیشانی جریان بدون تأثیر از حضور مانع، حرکتی مانند حالت انتشار بر روی کانال صاف بدون مانع دارد. در این مرحله می‌توان به خوبی ناپایداری‌های کلین-هلمهولتز را کمی عقب‌تر از پیشانی جریان در مرز مشترک بین سیال چگال و سیال محیطی مشاهده کرد. این ناپایداری‌ها با نماد KH در شکل ۶ (الف) نشان داده شده است. با



شکل ۵: پروفیل‌های بی‌بعد شده سرعت با استفاده از پارامترهای متوسط عمقی برای شیب ۱ درصد برای قطر ذرات ۱۲، ۲۰ و ۳۰ میکرون در فواصل طولی مختلف

Fig. 5: Velocity dimensionless profiles using parameters of average depth for 1% slope for 12, 20, and 30 micron particle in different length distances

تأثیر حضور مانع روی جریان چگالی پرداخته خواهد شد.

مقیاس طولی کولموگروف η ، به بزرگ‌ترین مقیاس طولی l ، با رابطه $Re_l^{-3/4}$ متناسب است؛ یعنی هرچه شدت آشفتگی و عدد رینولدز بیشتر باشد، ساختار مقیاس کوچک ریزتر است. در جریان چگال حاضر با عدد رینولدز در حدود ۳۳۰۰، طول مقیاس کولموگروف در حدود $0.076h$ و مقیاس طولی بزرگ از مرتبه ارتفاع جریان است [۱۲].

جدول ۳: رابطه بین مقادیر ماکزیمم جریان با مقادیر متوسط درمقایسه با کارهای آزمایشگاهی انجام شده (آلتیناکار و همکاران [۲۸]، گارسیا [۱۴] و خواصی [۲۷])

Table 3: The relation between the maximum current-rates with the average rates compared to the laboratory works (Altınakar et al. [28], Garcia [14] and Khavasi [27]).

پارامتر جریان چگال	آلتیناکار و همکاران [۲۸]	گارسیا [۱۴]	خواصی [۲۷]	میانگین نتایج عددی
u_{max}/U	۱/۳	۱/۳	۱/۲۳	۱/۳۲۶
y/H	۰/۳	۰/۳	۰/۳۱۷	۰/۲۶۸
اختلاف حاصل با نتایج عددی (u_{max}/U) (درصد)	۱/۹۶	۱/۹۶	۷/۲۳	
اختلاف حاصل با نتایج عددی (y/H) (درصد)	۱۰/۷	۱۰/۷	۱۵/۴۵	

جدول ۴: پارامترهای اصلی برای هر یک از حالات شبیه‌سازی

Table 4: The main parameters for each simulation states

حضور مانع	ذره دوم		ذره اول		
	غلظت	قطر (μm)	غلظت	قطر (μm)	
-	۰/۴۵	۱۲	۰/۴۵	۱۲	R0
*	۰/۴۵	۱۲	۰/۴۵	۱۲	R1
*	۰/۴۵	۲۰	۰/۴۵	۱۲	R2
*	۰/۴۵	۳۰	۰/۴۵	۱۲	R3
*	۰/۳	۲۰	۰/۶	۱۲	R4
*	۰/۶	۲۰	۰/۳	۱۲	R5

گذشت زمان به طرف بالا تغییر مکان داده، ضعیف شده و در نهایت از بین می‌رود. اما قسمت کوچکی از آن نزدیک سطح بالایی مانع باقی می‌ماند که با گذشت زمان و عبور بدنه اصلی جریان قدری قوی‌تر نیز می‌شوند. پس از عبور از سطح بالایی مانع، جریان به سمت کف کانال فرود می‌آید (شکل ۶ (ت)). چرخش جریان در این ناحیه باعث تولید نوعی از ورتکس‌ها به نام گردابه‌های اختلاط تشدید شده^۳ می‌شود. همچنین با گذشتن پیشانی جریان از روی مانع، ناحیه چرخشی دیگری نزدیک بستر و در کنار وجه پایین دست مانع شکل می‌گیرد. وجود نواحی چرخشی در بالای مانع و بلافاصله پس از آن باعث افزایش درون آمیختگی دو سیال می‌شود. جریان چگالی که پس از

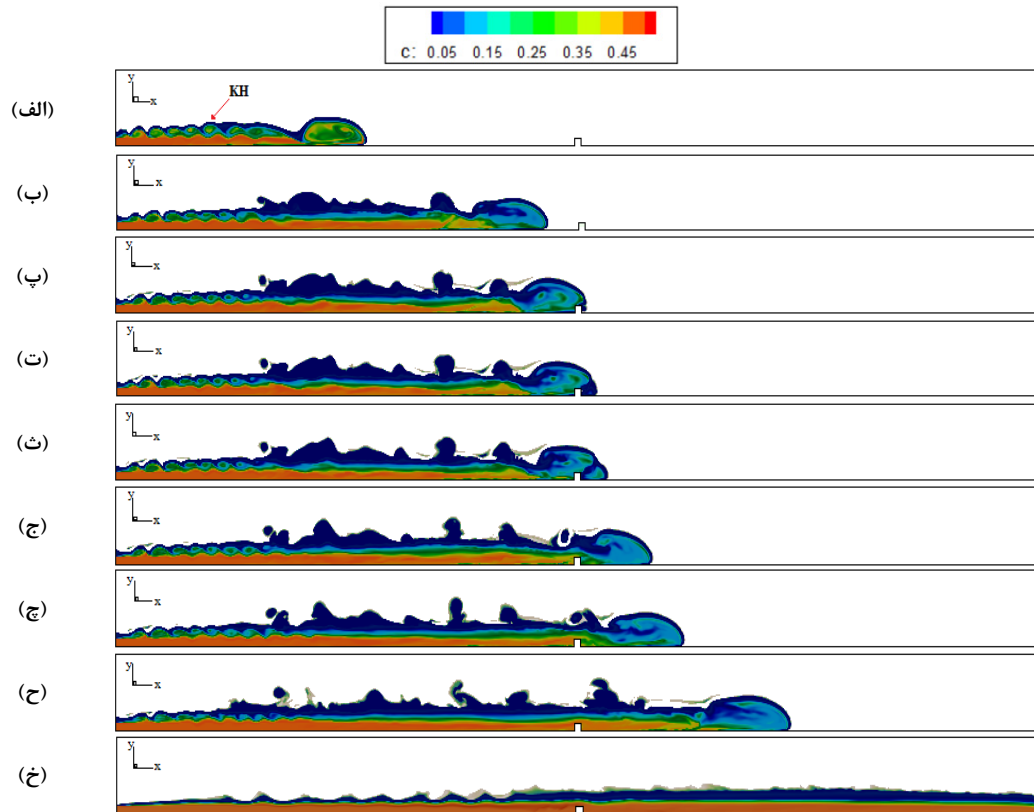
نزدیک شدن جریان به مانع، حرکت پیشانی کندتر می‌شود.

در لحظه برخورد، جریان به سمت بالا منحرف می‌شود. با برخورد پیشانی جریان به مانع نوعی پرش هیدرولیکی اتفاق می‌افتد و این زمانی است که اولین جریان برگشتی ایجاد می‌شود. در جریان‌های چگالی به این نوع جریان‌های برگشتی اصطلاحاً بور^۱ گفته می‌شود [۱۶]. در ادامه قسمتی از جریان که در لحظه برخورد به سمت بالا تغییر جهت داده بود دوباره بر روی سطح بالایی مانع فرود می‌آید. این تغییر جهت جریان باعث ایجاد ناحیه چرخشی^۲ نسبتاً قوی در سطح بالایی مانع می‌شود. هسته قسمتی از این ناحیه چرخشی با

1 Bore

2 Recirculation Zone

3 Intensified Mixing Vortex (IMV)



شکل ۶: مراحل عبور جریان چگال از روی مانع در صفحه $x-y$ در وسط کانال ($z=0$) در ۹ زمان (c برابر غلظت می باشد): (الف) $t=20s$ (ب) $t=37s$ (پ) $t=41s$ (ت) $t=42s$ (ث) $t=43s$ (ج) $t=46s$ (ح) $t=50s$ (خ) $t=120s$

Fig. 6: Levels of passing current through the obstacle in the $x-y$ plane in the middle of the channel ($z = 0$) in 9 times (c is the concentration): a) $t = 20s$ b) $t = 37s$ c) $t = 41s$) $t = 42 s$ t = 43 s) t = 46 s) t = 50 s) t = 60 s) t = 120 s

جریان به مانع غلظت جریان چگال در وسط کانال کاهش می یابد و در کناره های کانال جریان دارای غلظت بیش تری است. هنگامی که جریان به مانع می رسد، پیشانی جریان به توسط مانع دو بخش می شود که به کناره های کانال منحرف می شوند (شکل ۷ (پ)) و پس از عبور از مانع، دو بخش پیشانی ترکیب شده و دوباره یک پیشانی واحد را تشکیل می دهند (شکل ۷ (ت)). در کانال با مانع به دلیل کاهش اینرسی در ناحیه پیشانی، سرعت دماغه کم می شود. به عبارت دیگر جریان با احساس حضور مانع، ارتفاع خود را افزایش می دهد که این موجب کاهش سرعت ماکزیمم می شود.

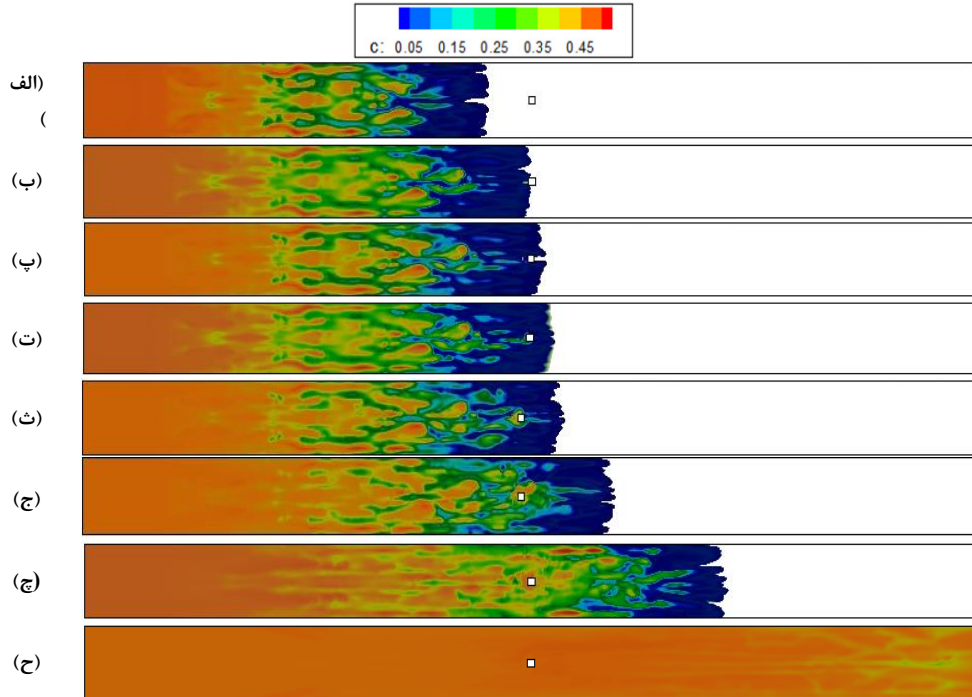
۲-۴- پروفیل های سرعت

شکل ۸، پروفیل های بی بعد شده سرعت جریان چگال را در دو مقطع قبل و پس از مانع نشان می دهد. با توجه به شکل ۸ (الف) مشاهده می شود پروفیل های سرعت در قبل از مانع تقریباً روی هم می افتند و بیانگر این است که قبل از

عبور از مانع به سمت کف کانال سرازیر شده است همانند یک جریان بر روی پله معکوس^۱ عمل می کند. جریان جت مانند به وجود آمده پس از برخورد به کف کانال و تغییر مسیر، با تغییر فاز از ناحیه فوق بحرانی به ناحیه زیر بحرانی دچار پرش هیدرولیکی می شود و در ادامه مسیر انبساط می یابد.

با دور شدن جریان از مانع پیشانی جریان بار دیگر تشکیل شده و حالت نیمه پایداری خود را باز می یابد (شکل ۶ (ج)). با گذشت زمان و با دور شدن جریان های برگشتی از مانع به تدریج مرز مشترک دوسیال در سمت چپ مانع به صورت یکنواخت و موازی با سطح کانال درمی آید. در نهایت پس از گذشت مدت زمان کافی جریان تقریباً به حالت شبه پایدار می رسد و ارتفاع مرز مشترک تقریباً ثابت بوده و برابر ۵/۵ سانتی متر می باشد (شکل ۶ (خ)).

شکل ۷ تأثیر مانع بر جریان چگال در نواحی قبل از مانع را بهتر نشان می دهد. همان طور که مشاهده می شود با نزدیک تر شدن



شکل ۷: مراحل عبور جریان چگال از روی مانع در صفحه‌ای موازی $x-z$ ($y=0.022$) در ۸ زمان (c برابر غلظت می‌باشد): الف) $t=37s$ ب) $t=41s$ پ) $t=42s$ ت) $t=43s$ ث) $t=46s$ ج) $t=50s$ چ) $t=60s$ ح) $t=120s$

Fig. 7: Levels of passing current through the obstacle in a parallel plane $x-z$ ($y = 0.022$) in 8 times (c is the concentration): a) $t = 37s$ b) $t = 41s$ c) $t = 42s$ t) $t = 43 s$ t) $t = 46 s$ t) $t = 50 s$ t) $t = 60 s$ t) $t = 120 s$

ذرات در نظر گرفته شده متناسب با ابعاد آن‌ها است، ذرات درشت‌تر، سریع‌تر رسوب می‌کنند.

۳-۴- پروفیل‌های غلظت

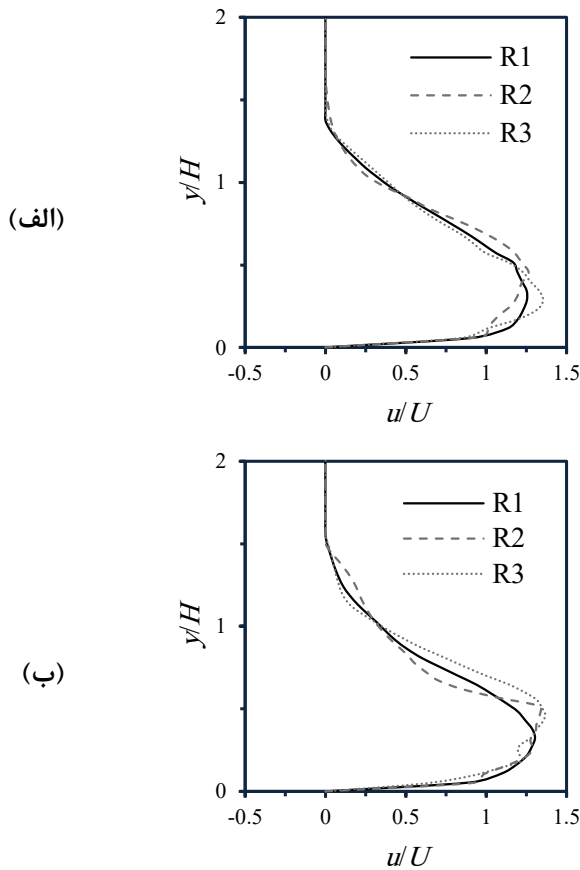
شکل ۱۱ پروفیل‌های بی‌بعد غلظت جریان را در دو مقطع پیش و پس از مانع نشان می‌دهد. با مقایسه پروفیل‌ها مشاهده می‌شود شکل کلی پروفیل غلظت در حالتی که مانع حضور دارد مشابه حالت بدون مانع است و تفاوت عموداً در ارتفاع جریان است. در حالت شبه پایدار نهایی پس از عبور جریان از مانع، غلظت ماکزیمم $15/3$ درصد نسبت به حالت بدون مانع کاهش یافته است.

شکل ۱۲ پروفیل‌های غلظت بی‌بعد شده را پیش و پس از مانع برای ذراتی با قطر ۱۲، ۲۰ و ۳۰ میکرون نشان می‌دهد. ماکزیمم غلظت با افزایش قطر ذرات تا ۲۰ و ۳۰ میکرون، به ترتیب $12/5$ درصد و $22/3$ درصد افزایش می‌یابد، یا به عبارت دیگر ذرات بزرگ‌تر بیش‌تر رسوب می‌کنند. با مقایسه دو شکل قبل و بعد از مانع می‌توان دریافت که مانع موجب رسوب ذرات می‌شود و میزان غلظت ماکزیمم جریان بعد از عبور از مانع افزایش می‌یابد.

مانع رفتار جریان تقریباً مشابه کانال بدون مانع می‌باشد. هم‌چنین شکل ۸ (ب) نشان می‌دهد حضور مانع بر سر راه جریان باعث کاهش ۱۰ درصد سرعت ماکزیمم آن شده است. با توجه به پروفیل سرعت جریان در حالت با مانع، می‌توان گفت که پس از عبور جریان از مانع سرعت ماکزیمم جریان افزایش می‌یابد و متناظر با آن ارتفاع جریان کاهش می‌یابد.

شکل ۹ پروفیل‌های سرعت بی‌بعد شده را پیش و پس از مانع برای ذراتی با قطر ۱۲، ۲۰ و ۳۰ میکرون نشان می‌دهد. اختلاف سرعت ماکزیمم ذرات بعد از مانع بیش‌تر می‌شود.

شکل ۱۰ کانتورهای غلظت سه‌بعدی برای شبیه‌سازی‌های $R1$ ، $R2$ و $R3$ در زمان $t=35s$ را نشان می‌دهد. شکل ۱۰ نشان می‌دهد، جریان‌های حاوی ذرات درشت‌تر در زمان یکسان، عقب‌تر از جریان حاوی ذرات کوچک‌تر هستند. در جریان‌های چگالی که به دلیل وجود ذرات جامد معلق در سیال ایجاد می‌شوند، با گذشت زمان بخشی از ذرات ته‌نشین شده و از چگالی سیال چگال کاسته می‌شود و اختلاف چگالی که عامل حرکت این نوع جریان است، کم شده و با گذر زمان سرعت حرکت جریان کاهش می‌یابد. از آنجایی که سرعت سقوط برای

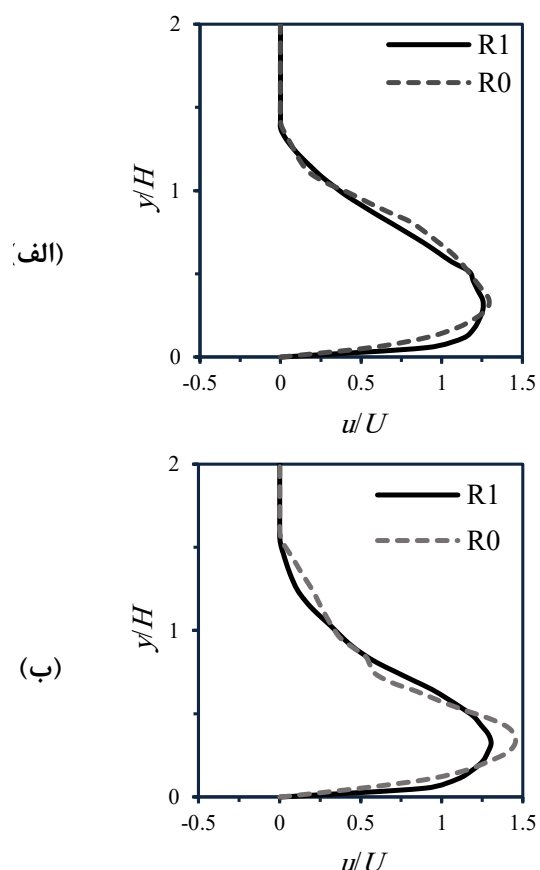


شکل ۹: پروفیل‌های سرعت بی‌بعد شده برای $R1$ ، $R2$ و $R3$ در دو مقطع (الف) قبل از مانع ($x=50h$) و (ب) پس از مانع ($x=83.4h$) در زمان $t=200s$ ، حالت شبه پایدار نهایی

Fig. 9: Dimensionless velocity profiles for $R1$, $R2$ and $R3$ in two sections: a) before the obstacle ($x = 50h$), and b) after the obstacle ($x = 83.4h$) at time $t = 200s$, the final quasi-steady state

مانع در طول و عرض کانال نمایش می‌دهد. بار ذرات معلق در طول کانال صاف بدون مانع به دلیل رسوب ذرات کاهش می‌یابد اما در کانال دارای مانع، دو بخشی شدن جریان و انحراف جانبی توسط مانع موجب افزایش رسوب و در نتیجه کاهش بیش‌تر بار ذرات معلق در روی مانع می‌شود.

در شکل ۱۴ رفتار رسوب‌گذاری جریان در عرض کانال برای کانال با مانع و بدون مانع به‌صورت کیفی با نتایج نصرآزادانی و میبرگ [۸] مقایسه شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، تطابق خوبی از نظر کیفی وجود دارد و هر دو کاهش میزان بار ذرات معلق روی مانع را نشان می‌دهند. علت تفاوت در نتایج این است که شرایط مسئله کمی متفاوت است. در مقاله نصر آزدانی و میبرگ [۸] جریان گل‌آلود رهاسازی توده مدل شده است در حالی که در مقاله حاضر جریان



شکل ۸: پروفیل‌های سرعت بی‌بعد شده برای کانال با مانع و کانال بدون مانع در دو مقطع (الف) قبل از مانع ($x=50h$) و (ب) پس از مانع ($x=83.4h$) در زمان $t=200s$ ، حالت شبه پایدار نهایی

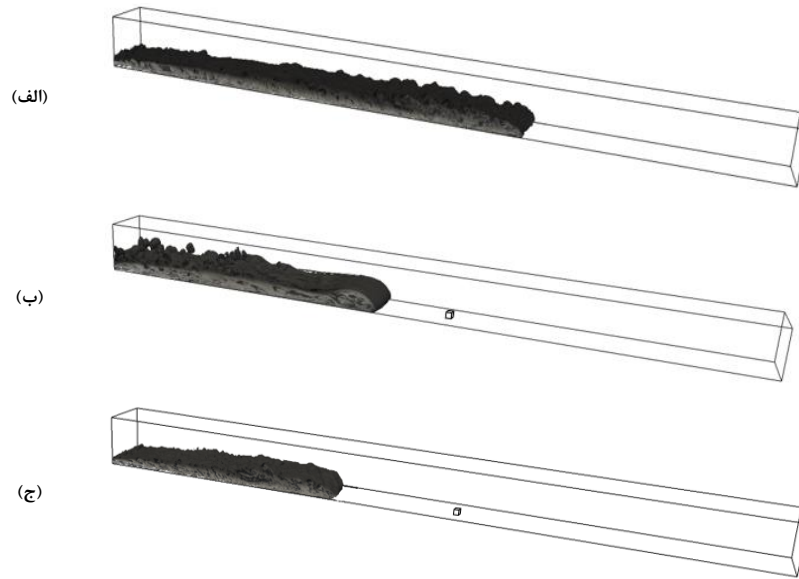
Fig. 8: Dimensionless velocity profiles for a channel with obstacle and without obstacle in two sections: a) before the obstacle ($x = 50h$); and b) after the obstacle ($x = 83.4h$) at time $t = 200s$, the final quasi-steady state

۴-۴- رفتار رسوب‌گذاری در جریان گل‌آلود

به منظور بررسی رسوب‌گذاری در جریان گل‌آلود، بار ذرات معلق محاسبه می‌شود. بار ذرات معلق معیاری است برای رفتار رسوب‌گذاری جریان حاوی ذره، زیرا با توجه به این‌که در جریان ورودی همه ذرات معلق هستند، کاهش بار ذرات معلق در هر مقطع به معنی افزایش رسوب ذرات در آن مقطع است، بدین ترتیب می‌توان با محاسبه بار ذرات معلق در هر مقطع و مقایسه با مقدار آن در ورودی، به بررسی رفتار رسوب‌گذاری جریان پرداخت. بار ذرات معلق از رابطه (۱۸) محاسبه می‌شود [۲۷]:

$$q_s = \int_0^{\infty} u(y)c(y)dy \quad (18)$$

شکل ۱۳ بار ذرات معلق را برای کانال بدون مانع و کانال با



شکل ۱۰: کانتورهای غلظت سه‌بعدی برای در زمان $t=35s$ (الف) $R1$ (ب) $R2$ (ج) $R3$
Fig. 10: Three-dimensional concentration contours at time $t = 35s$ a) $R1$ b) $R2$ c) $R3$

به دلیل برابر بودن قطر ذرات و غلظت ورودی آن‌ها، منحنی‌ها بر هم منطبقند. در شکل ۱۸ (ب) برابر بودن غلظت ورودی موجب شده‌است تا هر سه منحنی از یک نقطه شروع شوند، در ادامه منحنی ذره با قطر بیش‌تر ($C3$) با شیب بیش‌تری نزولی می‌شود که بیانگر رسوب زودتر ذره بزرگ‌تر نسبت به ذرات کوچک‌تر است. به عبارت دیگر، ذره کوچک‌تر تا مسافت بیش‌تری توسط جریان حمل می‌شود. با افزایش قطر ذرات تا ۲۰ و ۳۰ میکرون بار معلق ذرات به ترتیب ۲۱ درصد و ۶۸ درصد کاهش یافته‌است. در شکل ۱۸ (پ) غلظت ورودی ذره کوچک‌تر ($C1$)، بیش‌تر است و در شکل ۱۸ (ت) برعکس می‌باشد. همان‌طور که در شکل‌ها مشخص است، ذره با قطر بزرگ‌تر سریع‌تر رسوب می‌کند. با مقایسه منحنی $C2$ در این دو شکل می‌توان گفت با کاهش غلظت ورودی، ذره دیرتر رسوب می‌کند. با کاهش غلظت، ناپایداری‌های موجود در مرز مشترک بیشتر شده و باعث می‌شود تا درون آمیختگی سیال محیطی و آشفتگی در لایه چگال بیش‌تر شود. از آن‌جا که آشفتگی مکانیزم اصلی تعلیق ذرات است، لذا با کاهش غلظت، بار ذرات معلق افزایش و نرخ رسوب کاهش می‌یابد.

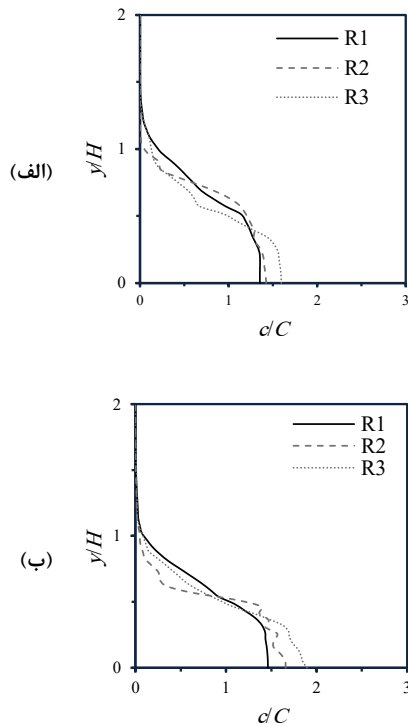
۵- نتیجه‌گیری

با توجه به کانتورهای غلظت می‌توان گفت که جریان در ابتدا حضور مانع را حس نمی‌کند و مانع تأثیری روی شکل و سرعت انتشار جریان ندارد. در لحظه برخورد، جریان به سمت بالا منحرف

ورودی پیوسته است. ضمن این‌که مدل‌سازی مقاله ذکر شده با روش شبیه‌سازی عددی مستقیم است و شکل مانع هم متفاوت است. در شکل ۱۵ تأثیر افزایش قطر بر بار ذرات معلق مشاهده می‌شود. با توجه به شکل می‌توان گفت بار ذرات معلق با افزایش قطر ذرات کاهش می‌یابد. به عبارت دیگر، ذرات با قطر بیش‌تر زودتر رسوب می‌کنند و ذرات ریز تا فواصل بیش‌تری توسط جریان حمل می‌شوند. بار ذرات معلق با افزایش قطر ذرات برای قطر ۳۰ و ۲۰ میکرون به ترتیب ۶۸ درصد و ۲۱ درصد کاهش می‌یابد.

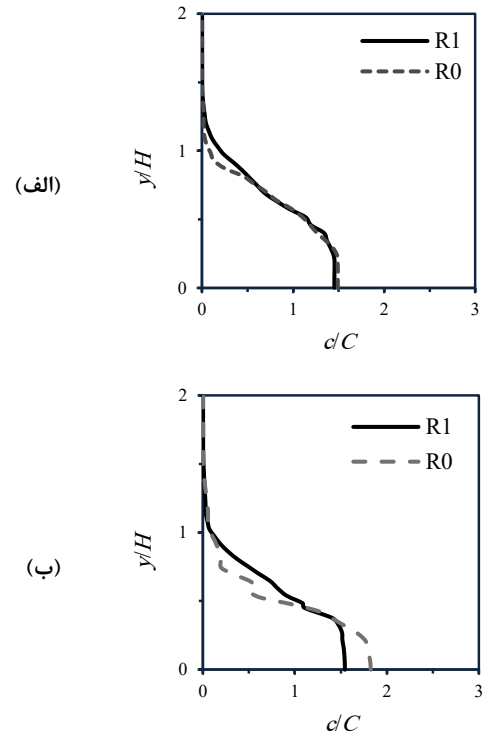
شکل ۱۶ دو حالتی را نشان می‌دهد که غلظت ورودی ذره با قطر کمتر و ذره با قطر بیش‌تر برابر نیست. همان‌طور که پیش از این گفته شد و در شکل نیز مشخص است، در حالتی که غلظت ورودی ذره با قطر کمتر، بیش‌تر می‌باشد (منحنی خطی)، بار ذرات معلق ۱۱/۲ درصد افزایش یافته و جریان قابلیت حمل بار معلق بیش‌تری را دارد. شکل ۱۷ بار ذرات معلق را در وسط کانال ($z=0$) و در نزدیکی دیواره جانبی ($z=0/11$) نشان می‌دهد. تا قبل از مانع بار ذرات معلق در وسط و نزدیک دیواره تقریباً برابر است اما با نزدیک شدن به مانع و دوبخشی شدن جریان، در وسط کانال بار معلق ذرات بیش‌تر کاهش می‌یابد و پس از عبور از مانع و ایجاد پیشانی واحد، ذرات در کناره‌ها رسوب کرده و در وسط کانال بار ذرات معلق افزایش می‌یابد.

در شکل ۱۸ بار ذرات معلق، برای ذره $C1$ و ذره $C2$ برای همه حالات شبیه‌سازی کانال با مانع آورده شده‌است. در شکل ۱۸ (الف)



شکل ۱۲: پروفیل‌های غلظت بی‌بعد شده برای $R1$ ، $R2$ و $R3$ در دو مقطع (الف) قبل از مانع ($x=50h$) و (ب) پس از مانع ($x=83.4h$) در زمان $t=200s$ ، حالت شبه پایدار نهایی

Fig. 12: Dimensionless concentration profiles for $R1$, $R2$ and $R3$ in two sections: a) before the obstacle ($x = 50h$),



شکل ۱۱: پروفیل‌های غلظت بی‌بعد شده برای کانال با مانع و بدون مانع در دو مقطع (الف) قبل از مانع ($x=50h$) و (ب) پس از مانع ($x=83.4h$) در زمان $t=200s$ ، حالت شبه پایدار نهایی

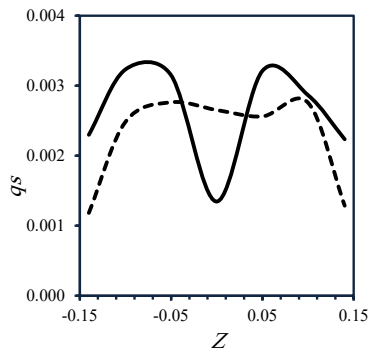
Fig. 11: Dimensionless concentration profiles for channel with obstacle and without obstacle in two sections: a) before the obstacle ($x = 50h$); and b) after the obstacle ($x = 83.4h$) at time $t = 200s$, the final quasi-steady state

سطح کانال در می‌آید و پس از گذشت مدت زمان کافی جریان تقریباً به حالت شبه پایداری می‌رسد و ارتفاع مرز مشترک تقریباً ثابت است و برابر $1/84$ می‌باشد.

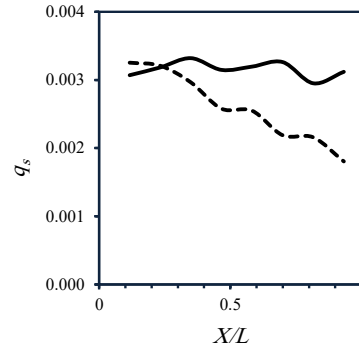
پروفیل‌های سرعت در قبل از مانع تقریباً روی هم می‌افتند و بیانگر این است که قبل از مانع رفتار جریان تقریباً مشابه کانال بدون مانع می‌باشد. همچنین حضور مانع بر سر راه جریان باعث کاهش ۱۰ درصدی سرعت ماکزیمم آن شده است. همچنین اختلاف ماکزیمم سرعت ذرات بعد از مانع بیش‌تر می‌شود.

شکل کلی پروفیل غلظت در حالتی که مانع حضور دارد مشابه حالت بدون مانع است و تفاوت عموماً در ارتفاع جریان است. در حالت شبه پایدار نهایی پس از عبور جریان از مانع، غلظت ماکزیمم $15/3$ درصد نسبت به حالت بدون مانع کاهش یافته است. ماکزیمم غلظت با افزایش قطر ذرات، افزایش می‌یابد یا به عبارت دیگر ذرات بزرگ‌تر بیش‌تر رسوب می‌کنند.

می‌شود و با برخورد پیشانی جریان به مانع نوعی پرفشار هیدرولیکی اتفاق می‌افتد فرود آمدن جریان بر روی سطح بالایی مانع باعث ایجاد ناحیه چرخشی نسبتاً قوی در سطح بالایی مانع می‌شود. پس از عبور از سطح بالایی مانع، جریان به سمت کف کانال فرود می‌آید و نوعی از ورتکس‌ها به نام گردابه‌های اختلاط تشدید شده را تولید می‌کند. همچنین با گذشتن پیشانی جریان از روی مانع، ناحیه چرخشی دیگری نزدیک بستر و در کنار وجه پایین دست مانع شکل می‌گیرد که وجود این نواحی چرخشی موجب افزایش درون آمیختگی دو سیال می‌شود. جریان چگالی پس از عبور از مانع و برخورد به کف کانال، با تغییر فاز از ناحیه فوق بحرانی به ناحیه زیر بحرانی دچار پرفشار هیدرولیکی می‌شود. با دور شدن جریان از مانع پیشانی جریان بار دیگر تشکیل شده و حالت نیمه‌پایداری خود را باز می‌یابد. با گذشت زمان و با دور شدن جریان‌های برگشتی از مانع به تدریج مرز مشترک دو سیال در سمت چپ مانع به صورت یکنواخت و موازی با



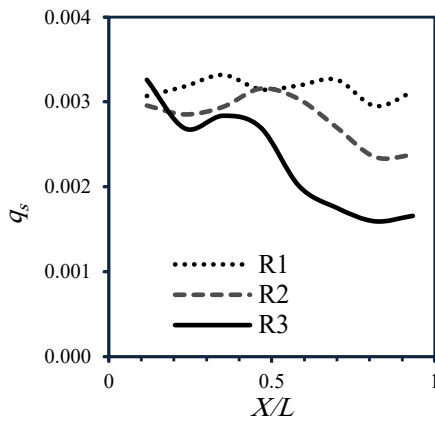
(ب)



(الف)

شکل ۱۳: بار ذرات معلق برای کانال صاف بدون مانع (خط‌چین) و کانال با مانع (خط) الف) در طول کانال (x) در $z=0$ و ب) در عرض کانال (z) در $x=71.5h$

Fig. 13: The amount of suspended particle for plain channel without obstacle (dashed line) and channel with obstacle (line) a) along the channel (x) at $z = 0$ and b) in Width of the channel (z) at $x = 71.5h$

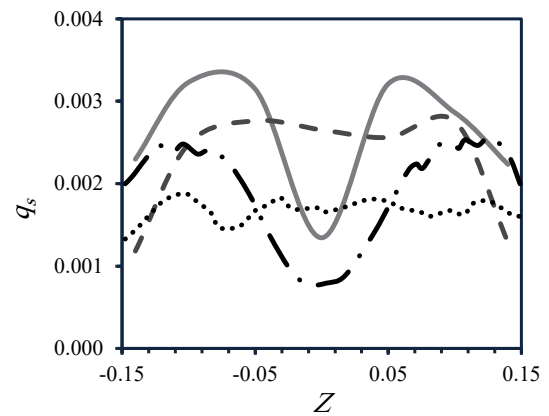


شکل ۱۵: بار ذرات معلق برای $R1$ ، $R2$ و $R3$ در طول کانال

Fig. 15: The number of suspended particles for $R1$, $R2$ and $R3$ along the channel

واحد، ذرات در کناره‌ها رسوب کرده و در وسط کانال بار ذرات معلق افزایش می‌یابد.

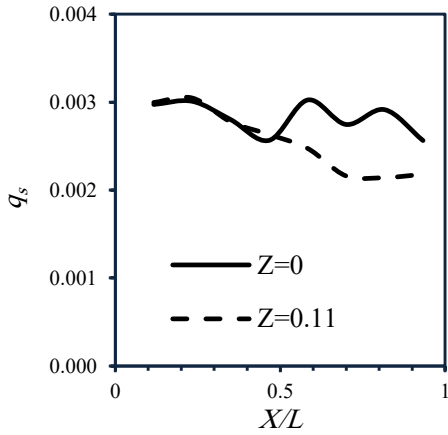
بار ذرات معلق با افزایش قطر ذرات کاهش می‌یابد. به عبارت دیگر، ذرات با قطر بیشتر زودتر رسوب می‌کنند و ذرات ریز تا فواصل بیشتری توسط جریان حمل می‌شوند. هنگامی که غلظت ورودی ذره با قطر کمتر، بیشتر می‌باشد، بار ذرات معلق بیشتر است و جریان قابلیت حمل بار معلق بیشتری را دارد. با کاهش غلظت ورودی، ذره دیرتر رسوب می‌کند. با کاهش غلظت، ناپایداری‌های موجود در مرز مشترک بیشتر شده و باعث می‌شود تا درون آمیختگی سیال محیطی و آشفتگی در لایه چگال بیشتر شود. از آنجا که آشفتگی مکانیزم اصلی تعلیق ذرات است، لذا با کاهش غلظت، بار ذرات معلق افزایش و نرخ رسوب کاهش می‌یابد.



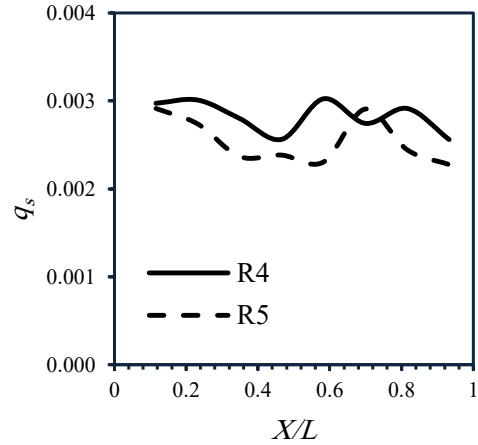
شکل ۱۴: مقایسه نتایج حل عددی برای کانال بدون مانع (خط‌چین) و کانال با مانع (خط) با نتایج نصرآزادانی و میبرگ [۸] برای کانال بدون مانع (نقطه-چین) و کانال با مانع (نقطه-خط‌چین)

Fig. 14: Comparison of the numerical results for channel without obstacle (dashed line) and a channel with obstacle (line) with the results of Nasr Azadani and Meiburg [8] for channel without obstacle (dots) and channel with channel (dots- dashed line)

برای بررسی رفتار رسوب‌گذاری جریان، بار ذرات معلق محاسبه شده است. بار ذرات معلق در طول کانال صاف بدون مانع، به دلیل رسوب ذرات کاهش می‌یابد اما در کانال دارای مانع، دو بخشی شدن جریان و انحراف جانبی توسط مانع موجب افزایش رسوب و در نتیجه کاهش بیشتر بار ذرات معلق در روی مانع می‌شود. همچنین تا قبل از مانع بار ذرات معلق در وسط و نزدیک دیواره تقریباً برابر است اما با نزدیک شدن به مانع و دوبخشی شدن جریان، در وسط کانال بار معلق ذرات بیشتر کاهش می‌یابد و پس از عبور از مانع و ایجاد پیشانی



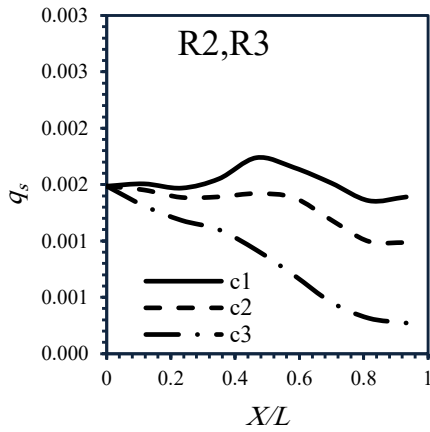
شکل ۱۷: بار ذرات معلق در وسط کانال (خط) و در نزدیکی دیواره (خط چین)



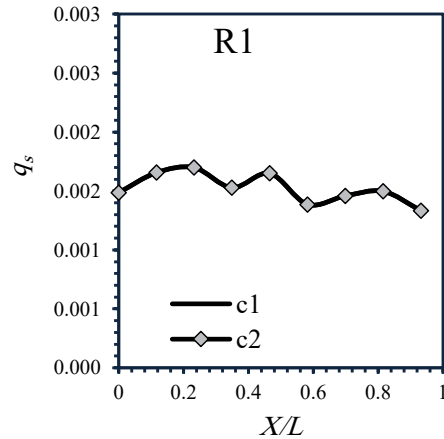
شکل ۱۶: بار ذرات معلق برای R5 و R4 در طول کانال

Fig. 17: The number of suspended particles in the middle of the channel (line) and near the walls (dashed line)

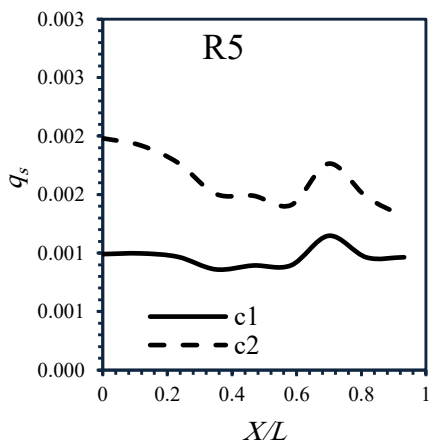
Fig. 16: The number of suspended particles for R4 and R5 along the channel



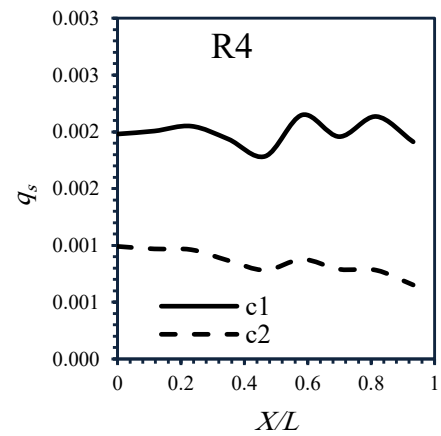
(ب)



(الف)



(ت)



(پ)

شکل ۱۸: بار معلق ذرات برای ذره c1 و ذره c2 برای R1, R2, R3, R4 و R5 در وسط کانال (z=0)

Fig. 18: The number of suspended particles for particle c1 and particle c2 for R1, R2, R3, R4 and R5 in the middle of the channel (z = 0)

- [11] N. Najafpour, 3D modeling of continuous dense current using large eddy simulation method, Master's Thesis, Department of Mechanical Engineering, Sharif University of Technology, Tehran, 2012. (in Persian)
- [12] S. Abbaszadeh, Large Eddy Simulation of Continuous Density Current impinging on Obstacles, PhD Thesis, Department of Mechanical Engineering, Sharif University of Technology, Tehran 2014. (in Persian)
- [13] J. H. Francisco, E.P., Espath, L.F.R., and Silvestrini, Direct numerical simulation of bi-disperse particle-laden gravity currents in the channel configuration, *Appl. Math. Model* 49 (2017) 739–752.
- [14] M. H. Garcia, Hydraulic jumps in sediment-driven bottom currents, *J. Hydraul. Eng* 119 (1993) (10) 1094–1117.
- [15] C. D. Pierce, Progress-variable approach for large-eddy simulation of turbulent combustion, in Rep. TF-80, Mech. Eng. Department, Rep. TF-80, Mech. Eng. Dep. Stanford University 2001.
- [16] S. K. Ooi, G. Constantinescu, and L. Weber, Numerical simulations of lock-exchange compositional gravity current, *J. Fluid Mech* 635 (2009) 361–388.
- [17] J. Kim, and P. Moin, Numerical investigation of turbulent channel flow, *J. Fluid Mech* 118 (1982) 341–377.
- [18] E. Khavasi, M. Oshaghi, S. M. A. Mousavi, V. Zarei, M. Ghenaatpishe, B. Firoozabadi, and H. Afshin Experimental investigation of the effect of obstacle on turbidity currents, in Center of Excellence in Energy Conversion, School of Mechanical Engineering, Sharif University of Technology, Tehran, Iran 2012.
- [19] D. K. Lilly, A proposed modification of the Germano subgrid-scale closure method, *Phys. Fluids A Fluid Dyn* 4 (3) (1992) 633–635.
- [20] C. Härtel, E. Meiburg, and F. Necker, Analysis and direct numerical simulation of the flow at a gravity-current head. Part 1. Flow topology and front speed for slip and no-slip boundaries, *J. Fluid Mech* 418 (2000) 189–212.
- [21] C. Härtel, F. Carlsson, and M. Thunblom, Analysis and direct numerical simulation of the flow at a
- [1] J. Zordan, C. Juez, A. J. Schleiss, and M. J. Franca, Entrainment, transport and deposition of sediment by saline gravity currents, *Advances in Water Resources* 115 (2018) 17-32.
- [2] L. Ottolenghi, C. Adduce, R. Inghilesi, V. Armenio, and F. Roman, Entrainment and mixing in unsteady gravity currents, *J. Hydraul. Res* 54 (5) (2016) 541–557.
- [3] J. Pelmard, S. Norris, and H. Friedrich, LES grid resolution requirements for the modelling of gravity currents, *Computers & Fluids* 174 (30 September) (2018) 256-270.
- [4] M. Mahdinia, B. Firoozabadi, M. Farshchi, A.G. Varnamkhasti, Large Eddy Simulation of Lock-Exchange Flow in a Curved Channel, *J. Hydraul. Eng* 138 (1) (2011) 57–70.
- [5] L. Ottolenghi, C. Adduce, R. Inghilesi, F. Roman, and V. Armenio, Mixing in lock-release gravity currents propagating up a slope, *Phys. Fluids* 28(5) (2016).
- [6] G. Gonzalez-Juez, E., Meiburg, E., and Constantinescu, Gravity currents impinging on bottom-mounted square cylinders: Flow fields and associated forces, *J. Fluid Mech* 631(2009) 65–102.
- [7] M. Nasr-Azadani and E. Meiburg, Influence of seafloor topography on the depositional behavior of bi-disperse turbidity currents: a three-dimensional, depth-resolved numerical investigation, *Environ. Fluid Mech* 14 (2) (2014) 319–342.
- [8] M. M. Nasr-Azadani and E. Meiburg, Turbidity currents interacting with three-dimensional seafloor topography, *J. Fluid Mech* 745 (2014) 409–443.
- [9] M. M. Nasr-Azadani, B. Hall, and E. Meiburg, Polydisperse turbidity currents propagating over complex topography: Comparison of experimental and depth-resolved simulation results, *Comput. Geosci* 53 (2013) 141–153.
- [10] M. M. Nasr-azadani, E. Meiburg, and B. Kneller, Mixing dynamics of turbidity currents interacting with complex seafloor topography, *Environ. Fluid Mech* 18 (1) (2016) 201-223.

- [25] M. Garcia and G. Parker, Experiments on the Entrainment of Sediment into Suspension by a Dense Bottom Current, *J. Geophys. Res* 98 (3) (1993) 4793–4807.
- [26] M. H. Garcia, Depositional turbidity currents laden with poorly sorted sediment, *J. Hydraul. Eng* 120 (11) (1994) 1240–1263.
- [27] E. Khavasi, Experimental study of sediment behavior of the particle laden density current, Master's Thesis, Department of Mechanical Engineering, Sharif University of Technology, Tehran 2009. (in Persian)
- [28] M. S. Altinakar, W. H. Graft, and E.J. Hopfinger, Flow Structure in Turbidity Current, *J. Hydr. Res* 34 (5) (1996) 713-718.
- gravity-current head. Part 2. The lobe-and-cleft instability, *J. Fluid Mech* 418 (1) (2000) 213–229.
- [22] S. Venayagamoorthy, S. J. Koseff, J. Ferziger, and L. Shih, Testing of RANS turbulence models for stratified flows based on DNS data., *DTIC Doc* (2003) 127-138.
- [23] B. P. Leonard, A stable and accurate convective modelling procedure based on quadratic upstream interpolation, *Comput. Methods Appl. Mech. Eng* 19 (1) (1979) 59–98.
- [24] A. Peer, A., M. Dauhoo, and M. Bhuruth, A new fourth-order nonoscillatory central scheme for hyperbolic conservation laws, *Appl. Numer. Math* 58 (5) (2008) 674–688.