



## مطالعه اثر باد بر رفتار هیدرودینامیکی جریان چگال رهاسازی توده

پارسا نظمی، احسان خواصی\*، صادق رستمی ده جلالی

دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه زنجان، زنجان، ایران.

### تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۳۹۹/۰۷/۲۹  
بازنگری: ۱۳۹۹/۱۱/۲۲  
پذیرش: ۱۳۹۹/۱۲/۰۷  
ارائه آنلاین: ۱۴۰۰/۰۱/۱۲

### کلمات کلیدی:

جریان باد  
جریان گل آلود  
پدیده‌های آشفته  
رسوب‌گذاری  
روش حجم سیال

**خلاصه:** در مطالعه حاضر انتشار جریان گل آلود رهاسازی توده به صورت دوبعدی، تحت تأثیر جریان باد با استفاده از نرم‌افزاری متن‌باز، مدل‌سازی شده است. جهت حل این مسئله از روش شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ به منظور مشاهده دقیق‌تر پدیده‌های آشفته، استفاده شده است. با توسعه حل گر دوفازی نرم‌افزار مذکور به گونه‌ای که معادلات روش حجم سیال با معادله اسکالر غلظت جفت شوند، مسئله سه‌فاز به صورت یک فاز مخلوط سیال چگال و آب خالص در کنار فاز هوا شبیه‌سازی می‌شود. نتایج نشان می‌دهد که افزایش سرعت باد سبب کاهش نیروی شناوری محرک جریان گل آلود و هم‌چنین افزایش درون‌آمیختگی می‌شود که معنای آن آلودگی سریع‌تر نواحی آبی است. این افزایش سرعت باد باعث افزایش تنش برشی دیوار نیز می‌شود با این تفاوت که مقدار تنش برشی دیوار در سرعت‌های باد کم، چشم‌گیر نیست و این خود مانع از تغییر قابل ملاحظه در رفتار رسوب‌گذاری جریان می‌شود. با بررسی رفتار رسوب‌گذاری جریان، مشاهده می‌شود که در سرعت‌های باد زیاد، جریان باد موافق با جریان گل آلود، تأثیرات زیان‌بارتری نسبت به جریان باد مخالف دارد و انباشت رسوب آن بیش‌تر است.

### ۱- مقدمه

بسیاری از جریان‌های ژئوفیزیکی که بر روی سطح زمین اتفاق می‌افتند، ناشی از وجود نیروی جاذبه هستند. جریان‌های گرانشی<sup>۱</sup>، جریان‌هایی با نیروی محرک شناوری (جریان‌های بویانسی<sup>۲</sup> نیز نام دارند) هستند که در آن‌ها اختلاف چگالی بین جریان و محیط اطراف، موجب توسعه جریان، عمدتاً در جهت افقی می‌شود. اگر این اختلاف چگالی به واسطه حضور ذرات معلق در جریان باشد به آن جریان گل آلود<sup>۳</sup> می‌گویند [۱]. این جریان یک خطر شناخته شده برای محیط زیست، مخازن سدها و تأسیسات دریایی است که می‌توان به آلودگی در سواحل، مدفون شدن تخم آبزیان در زیر رسوب و کاهش عمر مفید سدها اشاره کرد. به دلیل رفتار رسوب‌گذاری، فرسایشی و مخرب، مهندسی‌نیزمند شناخت ساختار جریان چگال و عوامل تأثیرگذار بر رفتار آن هستند [۲]. به دلیل مشکلات در اندازه‌گیری‌های

میدانی جریان چگال، آزمایش‌های تجربی و عددی به‌طور گسترده، به عنوان روش‌های مؤثر برای بررسی جریان چگال در چند دهه مورد استفاده قرار گرفته است. بر اساس شرایط، جریان چگال را می‌توان به دو نوع اصلی تقسیم کرد [۳]: الف) جریان پیوسته: منبع پیوسته مایعات چگال (جریان ثابت) و ب) جریان لاک اکسچنج<sup>۴</sup>: رهایی ناگهانی مایع‌های حجم محدود (جریان رهاسازی توده). در ادامه به پیشینه‌ای از مطالعات انجام شده در این زمینه اشاره می‌شود.

نکر<sup>۵</sup> و همکاران [۴] براساس کار آزمایشگاهی دی رویج و دالزیل [۵]، به شبیه‌سازی دوبعدی و سه‌بعدی جریان گل آلود لاک اکسچنج در یک کانال با بستر صاف پرداختند و دریافتند که در زمان‌های ابتدایی شبیه‌سازی، نتیجه حل دوبعدی تطابق بسیار بالایی با نتایج آزمایشگاهی دارد اما در زمان‌های پایانی، نتیجه حل دوبعدی اختلاف نسبتاً قابل توجهی با نتایج آزمایشگاهی دارد.

- 1 Gravity currents
- 2 Buoyancy currents
- 3 Turbidity current

- 4 Lock-Exchange current
- 5 Necker

\* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: khavasi@znu.ac.ir

حقوق مؤلفین به نویسندگان و حقوق ناشر به انتشارات دانشگاه امیرکبیر داده شده است. این مقاله تحت لایسنس آفرینندگی مردمی (Creative Commons License) در دسترس شما قرار گرفته است. برای جزئیات این لایسنس، از آدرس <https://www.creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/legalcode> دیدن فرمایید.



زاویه متفاوت، نشان داد که افزایش شیب، افزایش رسوب‌گذاری را در پی دارد. در قطرهای مختلف ذرات، مشاهده شد که افزایش قطر ذرات، کاهش مومنتوم جریان و در نتیجه افزایش رسوب‌گذاری را به همراه دارد.

یکی از عوامل مؤثر بر رفتار جریان گل‌آلود، جریان باد است. جریان‌ها و امواج به‌عنوان فرآیندهای فیزیکی اصلی تأثیرگذار بر اکوسیستم دریاچه‌ها و نواحی آبی کم‌عمق<sup>۱۰</sup>، شناخته می‌شوند. تعلیق مجدد ذرات<sup>۱۱</sup> یکی از نتایج این فرآیندهای هیدرودینامیکی می باشد که به صورت جدایش دوباره ذره ته‌نشین شده، از سطح (عمدتاً ناشی از تنش برشی) تعریف می‌شود [۱۰]. باید توجه داشت که شرایط آرام به ندرت اتفاق می‌افتد؛ این در حالی است که تعلیق مجدد ذرات به‌طور پیوسته در آب‌های کم‌عمق روی می‌دهد و علت آن اغتشاشاتی است که توسط جریان چگال زیرین و امواج به‌وجود آمده از باد، ایجاد شده و قادر هستند تا انتهای ستون آب و کف بستر نفوذ کنند. جریان باد قوی باعث ایجاد امواج و جریان‌های پرسرعت در سطوح تماس می‌شود و میدان جریان دولایه‌ای را ایجاد می‌کند که شامل یک جریان سطحی قوی به سمت خروجی و یک جریان برگشتی (به سمت ورودی) در امتداد کف می‌باشد. به عبارت دیگر جریان چگال تحت تأثیر یک ناحیه حجیم بازچرخش<sup>۱۲</sup> قرار می‌گیرد که این خود سبب افزایش در آشفتگی و اختلاط شده، در نتیجه از طریق تعلیق مجدد ذرات، مانع از تشکیل رسوب در کف می‌شود [۱۱]. از مطالعات انجام شده در این زمینه می‌توان به مواردی که در ادامه آمده است، اشاره کرد.

مورالس مارین<sup>۱۳</sup> و همکاران [۱۲] با شبیه‌سازی سه‌بعدی، به کمک کد متن باز افوی کام<sup>۱۴</sup> (کد رایج برای مهندسی اقیانوس<sup>۱۵</sup>) و یک مدل موج باد نیمه تجربی، توانستند توزیع رسوب و فرسایش<sup>۱۶</sup> را برای نواحی آبی عمیق و کم‌عمق دریاچه پلین کانوی<sup>۱۷</sup> (واقع در انگلستان) بدست آورند. آن‌ها مشاهده کردند که سهم تنش برشی کف بستر، ناشی از موج باد، همان‌گونه که انتظار می‌رفت، در نواحی کم‌عمق (کم‌تر از ۳ متر) نزدیک ساحل بیشتر از سهم تنش برشی جریان است. مشاهدات میدانی نیز نشان‌دهنده کم بودن میزان رسوب دریاچه، در این نواحی است. آن‌ها همچنین دریافتند که در نواحی آبی عمیق، تنش برشی ناشی از امواج باد غالب می‌باشد.

نصرآزادانی<sup>۱</sup> و همکاران [۶] با استفاده از شبیه‌سازی عددی مستقیم<sup>۲</sup>، جریان گل‌آلود لاک اکسچنج را با توزیع یک، دو و چند ذره با ابعاد مختلف در برخورد با مانع گاوسی شکل مورد بررسی قرار دادند. تعدادی از مشخصات جریان، هم‌چون پروفیل رسوب، محل پیشانی، جرم ذرات معلق و طول پیشروی جریان در کار آن‌ها بحث شده‌است. آن‌ها دریافتند که حضور ذرات کوچک در میان ذرات بزرگ بر رفتار رسوب‌گذاری جریان تأثیرگذار است. هم‌چنین آن‌ها تأثیر مانع سه‌بعدی گاوسی<sup>۳</sup> روی الگوی رسوب جریان را مطالعه کردند.

نصرآزادانی و میبرگ [۷]، جریان گل‌آلود حاوی چند نوع ذره در برخورد با دو مانع گاوسی سه‌بعدی با ارتفاع‌های مختلف (برای مشابه‌سازی با پستی و بلندی‌های کف بستر دریا) را بررسی کردند. نتایج برخورد جریان با دو مانع با نتایج جریان منتشرشده روی یک بستر صاف مقایسه شده است. علاوه بر این، اثرات سرعت سقوط ذرات روی جریان در مقایسه با جریان بدون ذره مطالعه شده است. نتایج نشان داده که اثر هندسه کف روی سرعت پیشانی جریان گل‌آلود بسیار ضعیف‌تر از اثر سرعت سقوط ذرات است. آن‌ها نشان دادند که سقوط ذرات باعث می‌شود تا جریان گل‌آلود اختلاط شدیدتری با محیط اطرافش نسبت به جریان چگال بدون ذره داشته باشد.

پاگنر<sup>۸</sup> [۸] با مطالعه بر جریان چگال لاک اکسچنج، روش شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ (ال‌ای‌اس)<sup>۹</sup> دوبعدی و سه‌بعدی را مورد مقایسه قرار داد. او دریافت که مقدار عدد فرود<sup>۴</sup> در روش دوبعدی تفاوتی با روش سه‌بعدی در فاز سقوط<sup>۵</sup> ندارد اما مشاهده کرد که مقدار درون‌آمیختگی<sup>۶</sup> در روش دوبعدی دو برابر روش سه‌بعدی است.

تیموری [۹] جریان چگال حاوی ذره لاک اکسچنج را به‌منظور بررسی جریان در محیط لایه‌بندی شده<sup>۷</sup> و شیبدار با روش شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ به‌صورت سه‌بعدی بررسی کرد. براساس نتایج به‌دست آمده، حضور لایه‌بندی چگالی در محیط، باعث کاهش قابل توجه سرعت پیش‌روی جریان چگال می‌شود؛ در صورتی که تأثیر بسزایی روی الگوی رسوب‌گذاری ندارد. علاوه بر این، نتایج رهاسازی جریان چگال در راستای سطح شیب‌دار با سه

- 1 Nasr-Azadani
- 2 Direct numerical simulation (DNS)
- 3 3D Gaussian bump
- 4 Bhaganagar
- 5 Large eddy simulation (LES)
- 6 Froude Number
- 7 Slumping phase
- 8 Entrainment
- 9 Stratified ambient

- 10 Shallow water regions
- 11 Particle resuspension
- 12 Recirculation
- 13 Morales-Marin
- 14 Finite Volume Community Ocean Model (FVCOM)
- 15 Ocean Engineering
- 16 Erosion
- 17 Liyn Conwy

درون کانال باز و یا بستر نزدیک ساحل، از تأثیر جریان باد صرف نظر شده است و همین‌طور تأثیر جریان باد بر آب‌های کم‌عمق به کمک داده‌های ماهواره‌ای و ایستگاه‌های زمینی، مورد بررسی قرار گرفته است. علت این مورد افزایش پیچیدگی مسئله با اضافه شدن فاز هوا به مسئله است و این پیچیدگی در کنار هزینه و زمان شبیه‌سازی، با سه‌بعدی شدن مسئله افزایش می‌یابد. دیدگاه‌های اوپلری-اوپلری<sup>۱۱</sup> و اوپلری-لاگرانژی<sup>۱۲</sup> از نگرش‌های معروف در مطالعه عددی جریان چگال هستند. دیدگاه حاکم در زمان حاضر، دیدگاه اوپلری-اوپلری است که برای جریان‌های چند فاز<sup>۱۳</sup> غیرقابل امتزاج<sup>۱۴</sup>، دو روش اوپلری<sup>۱۵</sup> و حجم سیال (وی‌اُف)<sup>۱۶</sup> را در اختیار دارد. دقیق‌ترین روش، اوپلری است که برای هر فاز یک معادله تکانه و برای سطح تماس نیز یک معادله تکانه اضافی را به‌طور مستقل حل می‌کند اما این دقت، زمان محاسباتی زیادی را در پی دارد. سریع‌ترین روش موجود، حجم سیال است که یک معادله تکانه را برای همه فازها حل می‌کند اما این روش نیز در رویارویی با جریان هوا دچار مشکل زمان محاسباتی می‌شود. در کار حاضر با ادغام روش حجم سیال و معادله انتقالی اسکالرِ غلظت، مسئله سه فاز به مسئله دو فاز کاهش می‌یابد. در روش جدید یک معادله تکانه برای دو فاز هوا و مخلوط چگال (حاوی آب خالص و سیال چگال‌تر از آب) و یک معادله اسکالرِ غلظت برای جریان چگال حل می‌شود و تأثیر این معادله غلظت در معادله ساختاری چگالی اصلاح شده روش حجم سیال، اضافه می‌شود. کار حاضر با اعتبارسنجی حل گر دو فازی جدید برای جریان‌های حاوی ذره، با توجه به فیزیک حقیقی مسئله، به استقبال پیچیدگی این موضوع می‌رود. در کار حاضر به‌دلیل تمایل به مشاهده پدیده‌های سطحی و مدل‌سازی قابل قبول اختلاط در سطح مشترک از روش ال‌ای‌اس استفاده شده است. با هدف کاهش هزینه و زمان محاسباتی و همچنین کاستن پیچیدگی، مسئله به‌صورت دوبعدی با روش ال‌ای‌اس شبیه‌سازی شده است. در کار حاضر برخلاف مطالعات پیشین (که از روش‌های تقریبی برای محاسبه درون‌آمیختگی استفاده می‌شد) از روشی نسبتاً دقیق برای محاسبه درون‌آمیختگی استفاده شده است و تنش برشی دیواره برای بررسی تأثیر جریان باد بر رفتار رسوب‌گذاری جریان گل‌آلود محاسبه شده است.

دینگ<sup>۱</sup> و همکاران [۱۰] با استفاده از سنسورهای فرکانس بالا، تأثیر جریان باد بر تعلیق مجدد را در دریاچه تاپهو<sup>۲</sup> چین از ۱۰ سپتامبر تا ۱۷ اکتبر ۲۰۱۷ مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها عامل تعلیق مجدد را تنش‌های برشی ناشی از جریان و امواج ایجاد شده توسط باد می‌دانستند. با بررسی داده‌های ایستگاهی دریافتند که موج ایجاد شده توسط جریان باد، ۶۰ درصد تنش برشی کل را به خود اختصاص می‌دهد.

صادقی [۳] جریان چگال رهاسازی توده را در حضور هوا به کمک اُپن‌فوم<sup>۳</sup> شبیه‌سازی کرده و دریافته است که در نظر گرفتن سطح آزاد در مقایسه با نادیده گرفتن آن، باعث ایجاد تغییراتی در رفتار جریان مانند محل پیشانی، رفتار رسوب‌گذاری، گردابه‌های ایجاد شده و درون‌آمیختگی، می‌شود. او جریان چگال را در حضور هوا (سطح آزاد) بررسی کرده اما به بررسی جریان باد با سرعت‌های بالا و محاسبه تنش برشی دیواره نپرداخته است. او همچنین روشی تقریبی در محاسبه درون‌آمیختگی به کار برده است. ژی<sup>۴</sup> و همکاران [۱۳] در امتداد خلیج چسپیک<sup>۵</sup> با بررسی داده‌های ماهواره‌ای برای دو نقطه با غلظت رسوب معلق زیاد، دریافتند که پس از طوفان، بیش‌ترین تعلیق ذرات در مصب رودها اتفاق می‌افتد.

گِسوئلی<sup>۶</sup> و استمو<sup>۷</sup> [۱۱] با مطالعه عددی و آزمایشگاهی تأثیر باد بر مخزن رسوب‌ساز<sup>۸</sup> که ابزاری برای جداسازی ذرات جامد قابل ته‌نشین شدن از فاضلاب می‌باشد، دریافتند که با افزایش سرعت باد، نرخ رسوب‌گذاری افزایش یافته و سرعت جریان چگال کاهش می‌یابد. آن‌ها همچنین دریافتند که جریان باد در جهت موافق با جریان چگال، تأثیر به مراتب زیان‌بارتری نسبت به جریان باد در جهت مخالف دارد. در حل عددی، آن‌ها از نرم‌افزار تجاری انسیس س اف ایکس<sup>۹</sup> و مدل آشفتگی اس‌اس‌تی کامگا<sup>۱۰</sup> برای شبیه‌سازی استفاده کردند اما برای صرفه‌جویی در زمان، به‌جای مدل‌سازی جریان هوا (در نظر گرفتن جریان سه فاز)، سرعت هوا را به عنوان شرط مرزی به بالای سیال محیطی اعمال کردند (مدل‌سازی به‌صورت دوفاز).

عملاً در تمام مطالعات عددی انجام شده پیشین بر روی جریان چگال

- 11 Eulerian-Eulerian
- 12 Eulerian-Lagrangian
- 13 Multi-phase flows
- 14 Immiscible
- 15 Eulerian
- 16 Volume of fluid (VOF)

- 1 Ding
- 2 Taihu
- 3 Open-source Field Operation And Manipulation (Open-FOAM)
- 4 Xie
- 5 Chesapeake Bay
- 6 Gkesouli
- 7 Stamou
- 8 Settling tank
- 9 Ansys CFX
- 10 SST k-omega

## ۲- معادلات حاکم

مشترک (از هوا به سمت آب) و  $K$  انحناى سطح آزاد که از بردار عمود بر سطح به صورت زیر به دست می آید.

$$\kappa = \nabla \cdot \left( \frac{\nabla \alpha'}{|\nabla \alpha'|} \right) \quad (5)$$

اگر سیالات فقط هوا و آب خالص بودند، خواص محلی سیال،  $\rho$  و  $\mu$  در هر سلول مخلوط وزنی خواص هر دو سیال است [۱۴]، یعنی:

$$\rho = \alpha' \rho_w + (1 - \alpha') \rho_{air} \quad (6)$$

$$\mu = \alpha' \mu_w + (1 - \alpha') \mu_{air} \quad (7)$$

این دو معادله ساختاری برای بسته شدن معادله اندازه حرکت، ضروری هستند. همان طور که از معادله (۳) مشخص است کوپلینگ معادله غلظت و اندازه حرکت وجود ندارد؛ علت این موضوع آن است که  $\rho$  نمی تواند از مشتق زمانی و مکانی خارج شود. نوآوری کار حاضر در آن است که کوپلینگ معادله غلظت و اندازه حرکت توسط رابطه ساختاری چگالی اصلاح شده انجام می شود:

$$\rho = \alpha' \rho_w + (1 - \alpha') \rho_{air} + \alpha' \rho_w \beta C \quad (8)$$

در این رابطه  $\beta C = \left( \frac{\rho_m}{\rho_w} - 1 \right)$  که چگالی مخلوط جریان چگال و  $\rho_w$  چگالی سیال سبک (آب) هستند.  $C = \frac{\rho - \rho_w}{\rho_m - \rho_w}$  غلظت بدون بعد با مقدار بین صفر تا یک است و مقدار آن از معادله ادوکن-دیفیوژن غلظت<sup>۱</sup> (با توجه به فرض دوبعدی و تراکم ناپذیر بودن) به دست می آید [۱۷]:

$$\frac{\partial C}{\partial t} + u \frac{\partial C}{\partial x} + v \frac{\partial C}{\partial y} = \alpha \left( \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} \right) - V_s \frac{\partial C}{\partial y} \quad (9)$$

مقدار عدد اشمیت<sup>۲</sup> مولکولی  $Sc = \frac{\nu}{\alpha}$  برای آب نمک برابر ۷۰۰ است،

وی آلف یکی از معروفترین روش های حجمی شبیه سازی سطح آزاد، با استفاده از یک شبکه بندی (مش) اوپلری ثابت و غیر متحرک است. این روش برای دو یا چند سیال تراکم ناپذیر و غیرقابل امتزاج استفاده می شود و هدف آن ردیابی و تعیین موقعیت سطح مشترک بین این سیالات است. این روش از یک تابع اندیکاتور اسکالر که با  $\alpha'$  (کسر حجمی سیال) نمایش داده می شود، استفاده می کند. محدوده  $\alpha'$  از مقدار صفر برای سلولی که خالی از سیال است تا مقدار یک برای سلولی که تماماً از سیال پر شده است، متغیر است [۱۴]. برای یافتن درصد حضور هر فاز در سلول محاسباتی و تعیین مرز بین فازها، معادله اسکالر زیر برای کسر حجمی حل می شود [۱۵].

$$\frac{\partial \alpha'}{\partial t} + \frac{\partial \alpha' u_j}{\partial x_j} = 0 \quad (1)$$

معادله پیوستگی و اندازه حرکت به ترتیب در روش وی آلف با در نظر گرفتن اثر سطح مشترک (در اینجا سطح آزاد) و جریان تراکم ناپذیر به صورت زیر است [۱۵]:

$$\frac{\partial u_j}{\partial x_j} = 0 \quad (2)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho u_i) + \frac{\partial \rho u_i u_j}{\partial x_j} = - \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \mu \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \rho g \delta_{ij} + F_i^{ST} \quad (3)$$

جمله چشمه  $F_i^{ST}$ ، بردار نیروی کشش سطحی است. این نیروی کششی، مماس بر سطح مشترک جداکننده دو سیال است و مقدار آن به خواص ذاتی هر دو سیال بستگی دارد. این نیرو سعی دارد تا ارتباط بین مولکول های سیال در سطح آزاد را با مولکول های سیال در بقیه قسمت های آن حفظ کند. این جمله به صورت زیر محاسبه می شود [۱۵ و ۱۶]:

$$\mathbf{F}^{ST} = \sigma \kappa \mathbf{n} \delta \quad (4)$$

در این معادله،  $\sigma$  کشش سطحی،  $\mathbf{n} = \nabla \alpha'$  بردار عمود بر سطح

1 Concentration Advection-Diffusion equation  
2 Schmidt number

$$v_{SGS} = C_k \Delta k_{SGS}^{1/2} \quad (13)$$

$$\frac{\partial k_{SGS}}{\partial t} + u_j \frac{\partial k_{SGS}}{\partial x_j} = v_{SGS} (\nu S_{ij} S_{ij}) - \varepsilon + \frac{\partial}{\partial x_j} \left( v_{SGS} \frac{\partial k_{SGS}}{\partial x_j} \right) \quad (14)$$

در سمت راست معادله (۱۴) سه جمله وجود دارد که به ترتیب بیانگر نرخ تولید، نرخ اضمحلال و نرخ انتقال انرژی جنبشی زیرشبکه هستند. برای محاسبه نرخ اضمحلال انرژی جنبشی زیرشبکه از رابطه زیر استفاده می‌شود [۲۰]:

$$\varepsilon = C_\varepsilon k_{SGS}^{3/2} / \Delta \quad (15)$$

$\Delta$  عرض فیلتر است و ضرایب  $C_k$  و  $C_\varepsilon$  به کمک روش ارائه شده توسط کیم<sup>۵</sup> محاسبه می‌شوند [۲۱].

$$Sc_{SGS} = 0.4 \exp(-2/\Delta Fr_t) + 1 \quad (16)$$

$$Fr_t = \frac{\varepsilon}{Nk_{SGS}} \quad (17)$$

$$N = \sqrt{-\frac{g}{\rho} \left( \frac{\partial \rho}{\partial y} \right)} \quad (18)$$

در معادله (۱۲)،  $\alpha_{SGS}$  به کمک عدد اشمیت زیرشبکه به صورت  $\alpha_{SGS} = \frac{v_{SGS}}{Sc_{SGS}}$  محاسبه می‌شود. برای به دست آوردن عدد اشمیت زیرشبکه از روابط زیر استفاده می‌شود [۲۰]:

در روابط فوق،  $Fr_t$  عدد فرود آشفته و  $N$  عدد شناوری هستند.

در روش شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ لازم است که جملات معادلات با دقت هرچه بیشتر گسسته شوند، تا از قابلیت‌های مدل عددی بیشترین استفاده صورت گیرد. برای گسسته‌سازی جملات دیورژانس در معادلات از

ولی بر اساس نتایج به دست آمده، مقدار این پارامتر در صورتی که از مرتبه یک یا بالاتر انتخاب شود، تأثیر چندانی بر نتایج شبیه‌سازی ندارد. بنابراین در کار حاضر عدد اشمیت برابر یک در نظر گرفته می‌شود تا  $v = \alpha$  باشد [۹]. در این رابطه  $V_s$  سرعت سقوط استوکس است که از رابطه زیر محاسبه می‌شود [۱۸]:

$$V_s = g D_p^2 \frac{\rho_p - \rho_w}{18\mu} \quad (10)$$

که در آن  $\mu$  تقریباً لزجت دینامیکی آب است و اثر ذرات بر آن نادیده گرفته می‌شود.  $D_p$  قطر متوسط ذرات ۲۰ میکرومتر و  $\rho_p$  چگالی ذرات از جنس کائولن که در این تحقیق برابر  $3217 \text{ kg/m}^3$  است. در کار حاضر  $V_s = 0.000483 \text{ m/s}$  می‌باشد.

برای حل معادلات بالا از روش شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ استفاده شده است. معادلات به کمک فیلتر جعبه<sup>۱</sup> فیلترگیری می‌شوند. در مطالعه حاضر، علامت  $\tau_{ij}^m$  برای تانسور زیرشبکه حاصل از معادله اندازه حرکت روش وی‌آف و علامت  $J_j^m$  برای بردار زیرشبکه حاصل از معادله غلظت در نظر گرفته شده و مدل‌سازی این دو جمله مهم به صورت زیر است [۹ و ۱۹]:

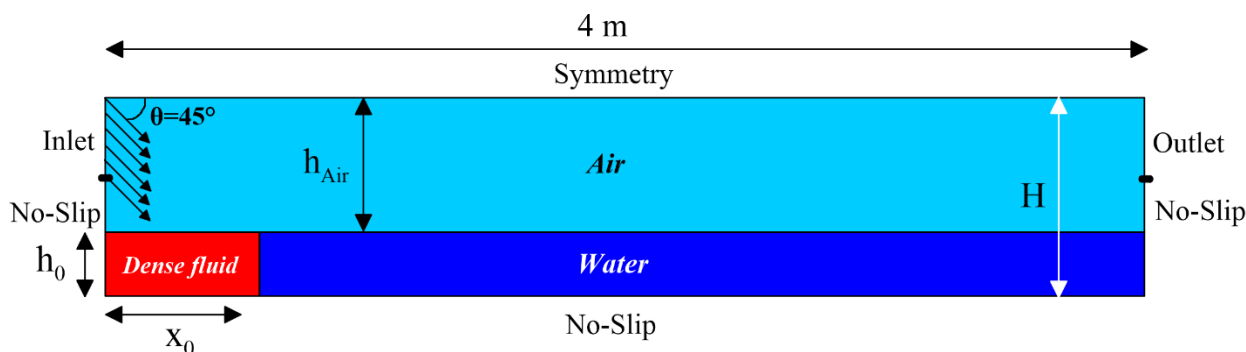
$$\tau_{ij}^m = \nu v_{SGS} \bar{S}_{ij} \quad (11)$$

$$J_j^m = \alpha_{SGS} \frac{\partial \bar{C}}{\partial x_j} \quad (12)$$

در این روابط  $\bar{S}_{ij} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right)$  تانسور نرخ کرنش فیلترشده و  $\bar{C}$  غلظت فیلتر شده است.  $\alpha_{SGS}$  و  $v_{SGS}$  به ترتیب لزجت گردابه‌ای<sup>۲</sup> (یا لزجت زیرشبکه) و نفوذ گردابه‌ای<sup>۳</sup> (یا نفوذ زیرشبکه) هستند که نحوه محاسبه آن‌ها در ادامه توضیح داده می‌شود.

برای محاسبه  $v_{SGS}$  در مطالعه حاضر از مدل تک معادله‌ای انتقال انرژی جنبشی زیرشبکه دینامیک<sup>۴</sup> استفاده شده است [۲۰]:

- 1 Box filter
- 2 Eddy viscosity
- 3 Eddy diffusivity
- 4 Dynamic One-equation SGS kinetic energy transport model



شکل ۱. شماتیک دامنه حل کار حاضر به همراه ابعاد و شرایط مرزی

Fig. 1. Schematic of the domain of the present work solution with dimensions and boundary conditions

برای حل مسئله حاضر از کد متن باز اُپن فوم که مخصوص محیط لینوکس<sup>۱۲</sup> و به زبان سی پلاس می باشد، استفاده شده است. حل گر اینترفوم<sup>۱۳</sup> برپایه معادلات روش وی آف گسترش داده شده و در اُپن فوم قرار دارد. از مزایای متن باز بودن اُپن فوم می توان به امکان ایجاد تغییرات در کدهای اصلی و قانونی بودن استفاده از آن اشاره کرد. برای کویپینگ معادله غلظت و معادله اندازه حرکت معادلات (۸) و (۹) به این حل گر اضافه شده است.

### ۳- مسئله مورد بررسی

شبیه سازی کار حاضر که جریان چگال لاک اکسچنچ در حضور جریان باد می باشد، به صورت دوبعدی و در یک هندسه با دامنه حل که مشخصات آن در شکل ۱ ذکر شده، انجام شده است. در این شکل  $h_0 = 0.1m$ ،  $x_0 = 0.2m$ ،  $H = 0.4m$  و  $h_{Air} = 0.3m$  به ترتیب ارتفاع اولیه لاک، طول اولیه لاک، ارتفاع کل دامنه حل و ارتفاع هوای بالای جریان چگال، هستند. برای مرزهای جامد، شرط عدم لغزش ( $\vec{U} = 0$ ) برای سرعت و همین طور شرط گرادیان صفر<sup>۱۴</sup> ( $\frac{\partial \Psi}{\partial x_i} = 0$ ) برای دیگر کمیت ها در نظر گرفته شده است ( $\Psi$  می تواند  $P$ ،  $C$ ،  $\alpha$  و ... در نظر گرفته شود). صفحه بالایی، شرط تقارن ( $\vec{U} \cdot \vec{n} = 0$ ) و  $\frac{\partial U}{\partial n} = 0$  دارد. مرز ورودی<sup>۱۵</sup> محل ورود جریان باد با زاویه ۴۵ درجه

روش های گوس خطی<sup>۱</sup>، گوس کوئیک<sup>۲</sup>، گوس خطی محدود شده<sup>۳</sup> و گوس ال یواس تی<sup>۴</sup> و برای گسسته سازی ترم های لاپلاسین در معادلات از روش گوس خطی اصلاح شده<sup>۵</sup> استفاده شده است. برای جمله گرادیان نیز از روش گوس خطی بهره گرفته شده است. برای گسسته سازی زمانی از روش اویلر<sup>۶</sup> استفاده شده است.

با توجه به اینکه مسئله حاضر تراکم ناپذیر است، برای کویپ کردن جملات فشار و سرعت از الگوریتم پیمپل<sup>۷</sup> استفاده شده است. برای حل جملات فشار از حل گر جی ای ام جی<sup>۸</sup>، برای جمله غلظت جریان چگال از حل گر پی بی آی سی جی<sup>۹</sup> و برای جمله کسر حجمی و دیگر جملات از حل گر اسموس<sup>۱۰</sup> استفاده شده است.

تمامی معادلات تا رسیدن به خطای نسبی  $10^{-6}$  حل شده اند. حل به طور موازی و با استفاده از ۸ هسته پردازش صورت گرفته است. زمان محاسباتی برای هر یک از موارد حدود ۷ تا ۱۰ روز بوده است. در کار حاضر از روش کنترل عدد کورانت<sup>۱۱</sup> استفاده شده و با تخصیص مقدار  $0.65$  به عدد کورانت بیشینه، مقدار گام زمانی به صورت متغیر و برحسب عدد کورانت بیشینه محاسبه می شود.

- 1 Gauss linear
- 2 Gauss QUICK
- 3 Gauss limitedLinear
- 4 Gauss LUST
- 5 Corrected Gauss linear
- 6 Euler
- 7 Pimple
- 8 GAMG
- 9 PBICG
- 10 Smooth
- 11 Courant number

- 12 Linux
- 13 interfoam
- 14 Zero-gradient
- 15 Inlet

جدول ۱. مشخصات تمام شبیه‌سازی‌های انجام شده

Table 1. Specifications of all performed simulations

محل ورودی	$Re_{Air}$	اجرا
سمت چپ کانال (جریان باد موافق با جریان گل‌آلود)	۰	۱
سمت چپ کانال (جریان باد موافق با جریان گل‌آلود)	۸۶۰۰	۲
سمت چپ کانال (جریان باد موافق با جریان گل‌آلود)	۱۷۲۰۰	۳
سمت چپ کانال (جریان باد موافق با جریان گل‌آلود)	۲۵۸۰۰	۴
سمت چپ کانال (جریان باد موافق با جریان گل‌آلود)	۳۴۴۰۰	۵
سمت چپ کانال (جریان باد موافق با جریان گل‌آلود)	۴۳۰۰۰	۶
سمت چپ کانال (جریان باد موافق با جریان گل‌آلود)	۵۱۶۰۰	۷
سمت چپ کانال (جریان باد موافق با جریان گل‌آلود)	۶۸۸۰۰	۸
سمت راست کانال (جریان باد مخالف با جریان گل‌آلود)	۳۴۴۰۰	۹
سمت راست کانال (جریان باد مخالف با جریان گل‌آلود)	۵۱۶۰۰	۱۰
سمت راست کانال (جریان باد مخالف با جریان گل‌آلود)	۶۸۸۰۰	۱۱

$$t^* = \frac{t}{(h/\tau)/u_b} \quad (20)$$

$$g' = \left(\frac{\rho_m}{\rho_w} - 1\right)g, \quad u_b = \sqrt{g' h} / \tau$$

کاهش یافته است.

۴- اعتبارسنجی شبکه و حل گر

برای کسب اطمینان از شبکه انتخاب شده  $y^+$  به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$y^+ = \frac{u_\tau \Delta y}{\nu} \quad (21)$$

$$u_\tau = \sqrt{\frac{\tau_w}{\rho}} \quad (22)$$

$$\tau_w = \mu \left. \frac{\partial u}{\partial y} \right|_{wall} \quad (23)$$

در معادلات بالا،  $y^+$  و  $\Delta y$  به ترتیب فاصله بی‌بعد از دیوار و ارتفاع اولین سلول مجاور مرز جامد هستند.  $\tau_w$  تنش برشی دیواره و  $u_\tau$  سرعت اصطکاکی

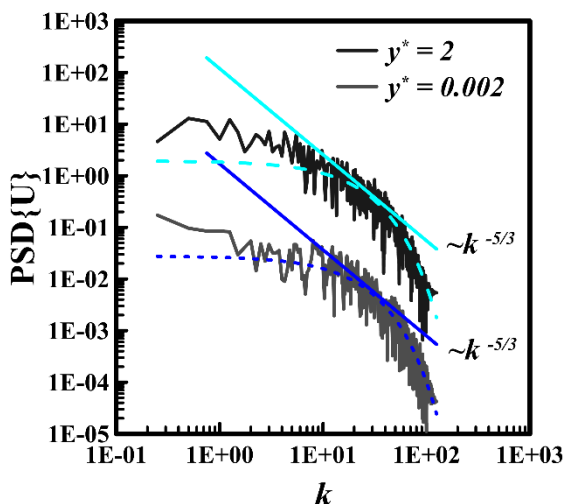
(مقدار ثابت  $\bar{U}$ ،  $\alpha' = 1$  و  $\frac{\partial \Psi}{\partial x_i} = 0$ ) و مرز خروجی<sup>۱</sup> برای خروج جریان ( $\bar{U} = 0$  و  $\frac{\partial \Psi}{\partial x_i} = 0$ ) است.

برای شبکه‌بندی این دامنه حل از  $673200$  سلول استفاده شده است که از این مقدار تعداد  $3400$  گره در راستای X و تعداد  $197$  گره در راستای Y می‌باشد و برای بهبود مقدار  $y^+$  به کمک ابزار ریفاین‌مش<sup>۲</sup> در این فوم یک لایه سلول به تعداد  $3400$ ، در مرز جامد پایین به مجموع سلول‌ها اضافه گردید. بررسی اعتبار این شبکه‌بندی در بخش‌های بعد ارائه گردیده است. در جدول ۱ تمام مشخصات شبیه‌سازی‌های انجام شده، قرار داده شده و در همه شبیه‌سازی‌ها مقدار اولیه C، یک و  $\beta = 0.04$  فرض می‌شود.

در اجراهای ۹، ۱۰ و ۱۱ مکان ورودی و خروجی نشان داده شده در شکل ۱، جابه‌جا شده است. در جدول ۱، عدد رینولدز باد به صورت  $Re_{Air} = \frac{\rho_{Air} U_{Air-Inlet} D_{Inlet}}{\mu_{Air}}$  تعریف می‌شود که در آن  $\rho_{Air}$  و  $\mu_{Air}$  به ترتیب چگالی و لزجت دینامیکی هوا می‌باشند. سرعت  $U_{Air-Inlet}$  جریان باد یکنواخت ورودی و  $D_{Inlet}$  قطر مجرای ورودی باد است. قبل از ورود به بخش‌های دیگر باید پارامترهای بی‌بعد مسئله را به صورت زیر تعریف کرد:

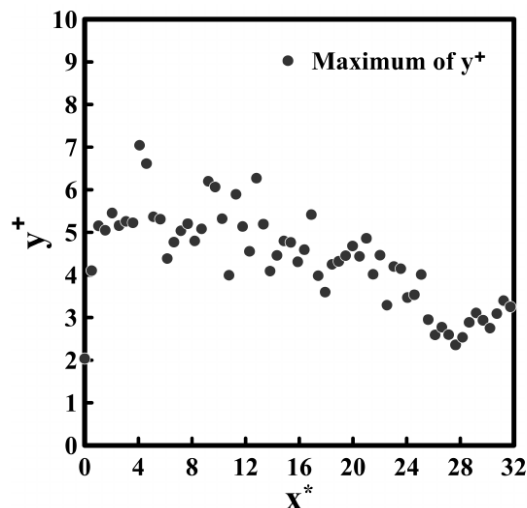
$$x_i^* = \frac{x_i}{h/\tau} \quad (19)$$

- 1 Outlet
- 2 Refine-mesh



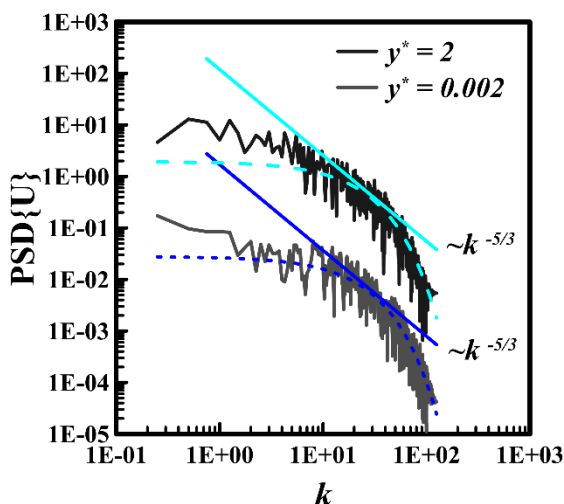
شکل ۳. نمودار طیف انرژی در ناحیه نزدیک دیوار و محل اولیه سطح آزاد برای اجرای ۸

Fig. 3. Diagram of the energy spectrum in the region near the wall and the initial position of the free surface for run 8



شکل ۲. نمودار بیشینه  $y^+$  برای اجرای ۸

Fig. 2. Diagram of the Maximum  $y^+$  for run 8



شکل ۴. نمودار مقایسه محل پیشانی جریان حاصل از حل گر حاضر با کار نصرآزادانی و همکاران [۶]

Fig. 4. Comparison of the current head position obtained from the present solver with the work of Nasr Azadani et al [6]

متناظر با تنش برشی دیواره است. پلمارد و همکاران [۲۲] محدوده زیرلایه لزوج را در جریان چگال لاک اکسچنج به صورت  $y_{max}^+ < 10$  به دست آورده‌اند. در کار حاضر برای اطمینان از شبکه محاسباتی، بحرانی‌ترین شرایط (اجرای ۸) در نظر گرفته شده و بیشینه مقدار  $y^+$  در هر نقطه و در کل زمان محاسباتی، به دست آمده است. از شکل ۲ مشخص است که مقادیر  $y_{max}^+$  زیر ۱۰ قرار دارد.

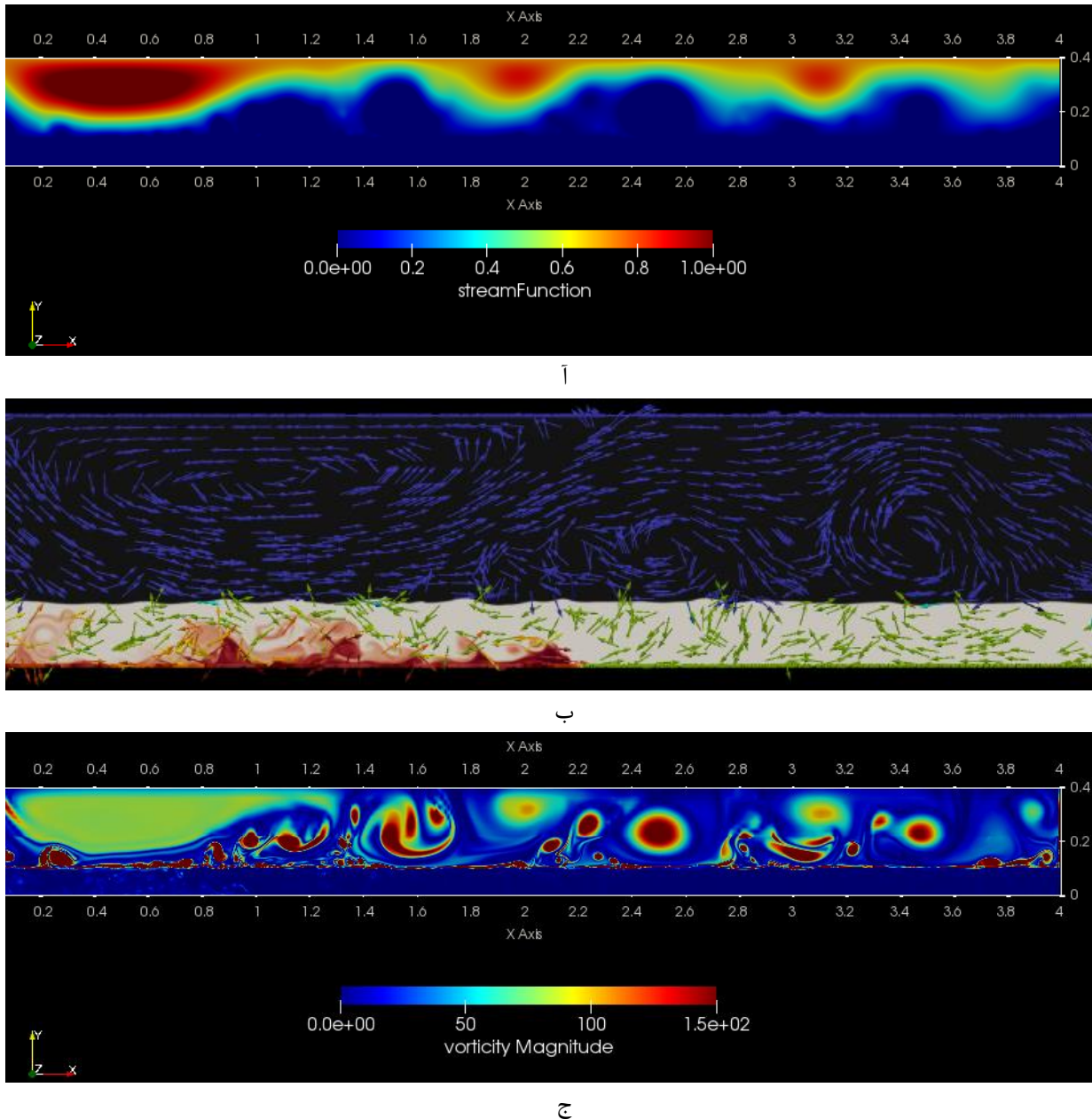
در شکل ۳ نمودار طیف انرژی برای بحرانی‌ترین شرایط (اجرای ۸)، در نزدیک دیوار و در محل اولیه سطح آزاد به دست آمده است. همان‌طور که از شکل ۳ مشخص است طول موج‌های فیلتر شده، در زیربازه اینرسی قرار دارند و شبکه کیفیت خوبی دارد.

کار آزمایشگاهی دی رویج و دالزیل [۵] برای جریان چگال حاوی ذره، در مخزنی روباز به طول ۲/۶ m، انجام گرفته است. این مخزن شامل لاک به طول ۰/۱ m، ارتفاع ۰/۲۶ m و عرض ۰/۲۶۵ m است. این لاک حاوی ۵۰ g ذرات کریید سیلیکون<sup>۱</sup> به قطر ۳۷  $\mu\text{m}$  و چگالی ۳/۲۱۷  $\text{g/cm}^3$  است. سرعت سقوط استوکس ۰/۱۶  $\text{cm/s}$  و سرعت شناوری  $V_s = 0/16$  و سرعت  $u_b = 8$   $\text{cm/s}$  هستند. نصرآزادانی و همکاران [۶] آزمایش مذکور را با فرض متقارن برای مرز بالا و فرض عدم لغزش برای دیواره‌ها به صورت عددی شبیه‌سازی کرد. در کار حاضر جهت

بررسی اعتبار حل‌گر استفاده شده، آزمایش مذکور به‌طور کامل شبیه‌سازی شده و محل پیشانی به دست آمده از شبیه‌سازی عددی با نتایج به دست آمده از کار نصرآزادانی مورد مقایسه قرار گرفته است.

همان‌طور که از شکل ۴ مشخص است، نتیجه حل‌گر حاضر تطابق بسیار خوبی (با توجه به میانگین خطای نسبی ۰/۳۳ درصدی و بیشینه خطای





شکل ۵. کانتور تابع جریان (آ)، بردارهای میدان سرعت (ب) و کانتور ورتیسیتیته (ج) ترسیم شده در زمان بی بعد ۲۸ برای اجرای ۸

Fig. 5. Stream function contour (a), velocity field vectors (b) and vorticity contour (c) drawn in dimensionless time 28 for run 8

بردارهای میدان سرعت و ورتیسیتی<sup>۱</sup> در زمان بی بعد ۲۸ رسم می شوند (شکل ۵) و سپس تنش برشی ایجاد شده در سطح مشترک با تنش برشی ایجاد شده بر سطح جریان گل آلود (برای اجرای ۸ و ۱۱) مقایسه می شود (شکل ۶). شکل ۵، نواحی گردابی را به وضوح نمایش می دهد. برای وضوح بیشتر بردارهای میدان سرعت در ۱/۸ متری ابتدای کانال، در شکل ۵ (ب) ترسیم

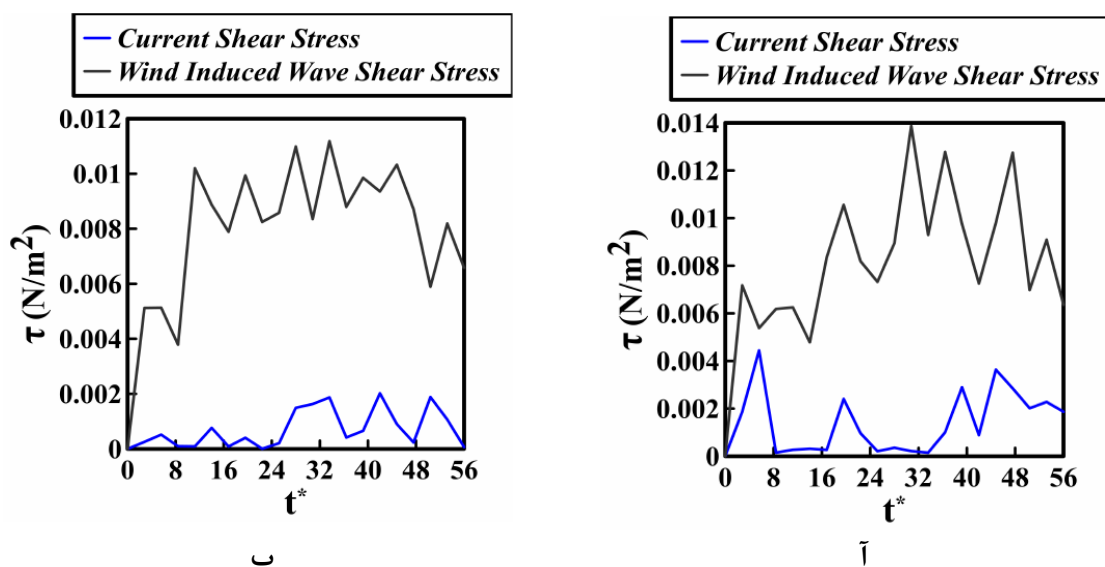
نسبی (۶/۳۱ درصدی) با نتیجه حاصل از شبیه سازی نصرآزادانی دارد. شایان ذکر است که محل پیشانی بی بعد  $x_f^*$  نسبت به دهانه لاک به دست آمده است.

## ۵- نتایج

### ۵-۱- بررسی رفتار باد در میدان حل

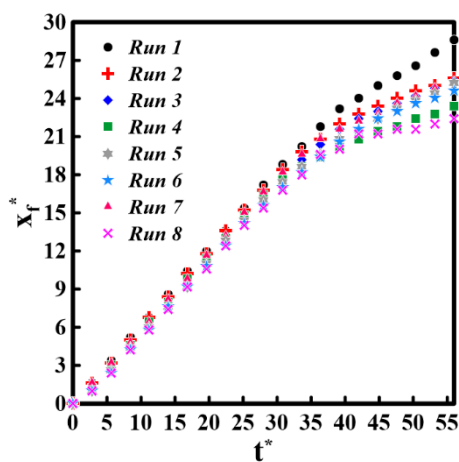
پیش از ورود به نتایج تأثیر باد بر رفتار جریان گل آلود، ابتدا تابع جریان،

1 Vorticity



شکل ۶. نمودار مقایسه تنش برشی ایجاد شده در سطح مشترک توسط باد با تنش برشی ایجاد شده در سطح جریان گل آلود در اجرای ۸ (آ) و اجرای ۱۱ (ب)

Fig. 6. Diagram of the comparison of shear stress generated by wind at the interface with shear stress generated at the surface of the turbidity current at run 8 (a) and run 11 (b)



شکل ۷. نمودار محل پیشانی جریان برای شبیه‌سازی‌های جریان باد

موافق با اعداد  $Re_{Air} = 0$  تا  $Re_{Air} = 68800$

Fig. 7. Current head position diagram for wind flow simulations with  $Re_{Air} = 0$  to  $Re_{Air} = 68800$

شده است. در شکل ۵ (ج) کانتور ورتیسیته ترسیم شده و همان‌گونه که مشخص است پدیده‌های گردابی نظیر کشیدگی گردابه، فشردگی گردابه، ادوکشن و دیفیوژن گردابه‌ها قابل مشاهده است. از طرفی مقدار ورتیسیته در سطح مشترک آب و هوا بسیار قابل توجه است.

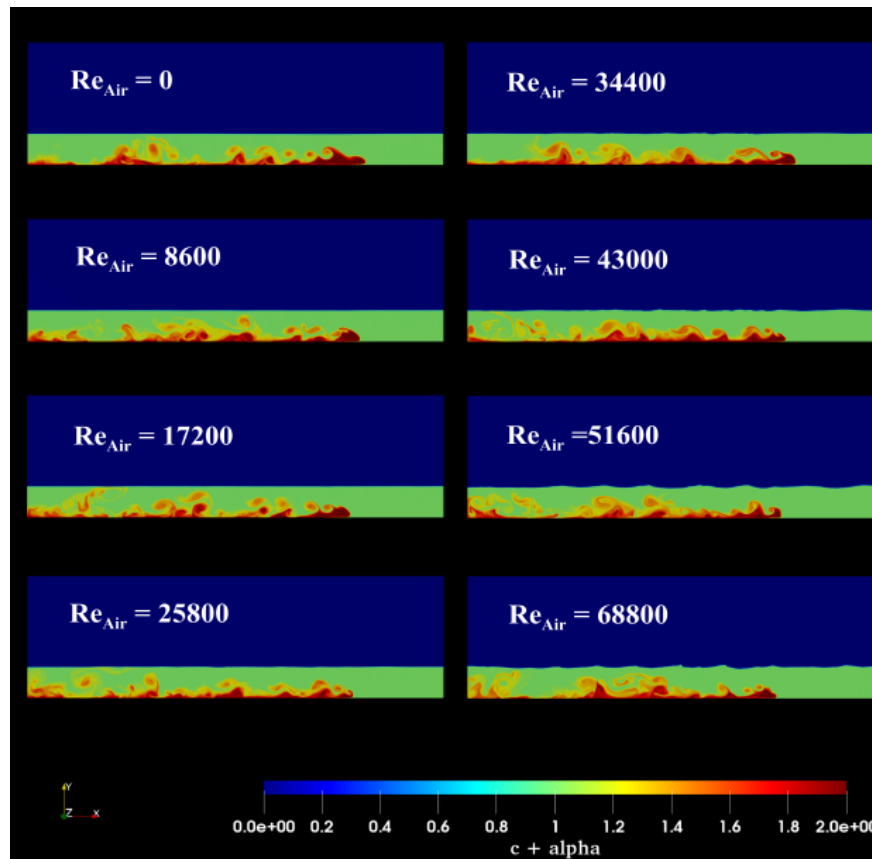
در شکل ۶ برای هر دو جریان باد موافق و مخالف با جریان گل‌آلود، مشاهده شد که نیروی برشی ایجاد شده توسط باد در سطح مشترک چندین برابر نیروی برشی ایجاد شده در سطح جریان گل‌آلود است (به‌طور میانگین  $17/8$  برابر برای اجرای ۸ و  $82/8$  برابر برای اجرای ۱۱). برای محاسبه تنش برشی در این دو قسمت از مقادیر  $\alpha' = 0/5$  و  $C = 0/02$  برای یافتن سطح مشترک و سطح جریان گل‌آلود (از طریق تعریف ایزوسرفیس) استفاده شده است؛ درنهایت با محاسبه گرادیان سرعت در این دو صفحه و به کمک لزجت دینامیکی مقادیر تنش‌ها محاسبه گردید.

۵-۲- بررسی تأثیر جریان باد موافق و مخالف بر محل پیشانی جریان

در این بخش تأثیر افزایش  $Re_{Air}$ ، برای شبیه‌سازی‌های جریان باد موافق، بر محل پیشانی جریان چگال مورد بررسی قرار می‌گیرد و با حالت

- 1 Vortex stretching
- 2 Vortex squeezing

$Re_{Air} = 0$  (اجرای ۱) مقایسه می‌شود. در شکل ۷، محل پیشانی جریان برای اعداد رینولدز باد ۰ تا ۶۸۸۰۰ به‌دست آمده است. این نمودار پیداست که در تمامی حالت‌های جریان باد موافق، محل پیشانی جریان از حالت  $Re_{Air} = 0$  عقب‌تر است؛ همچنین همان‌طور که گسولتی و استمو [۱۱]

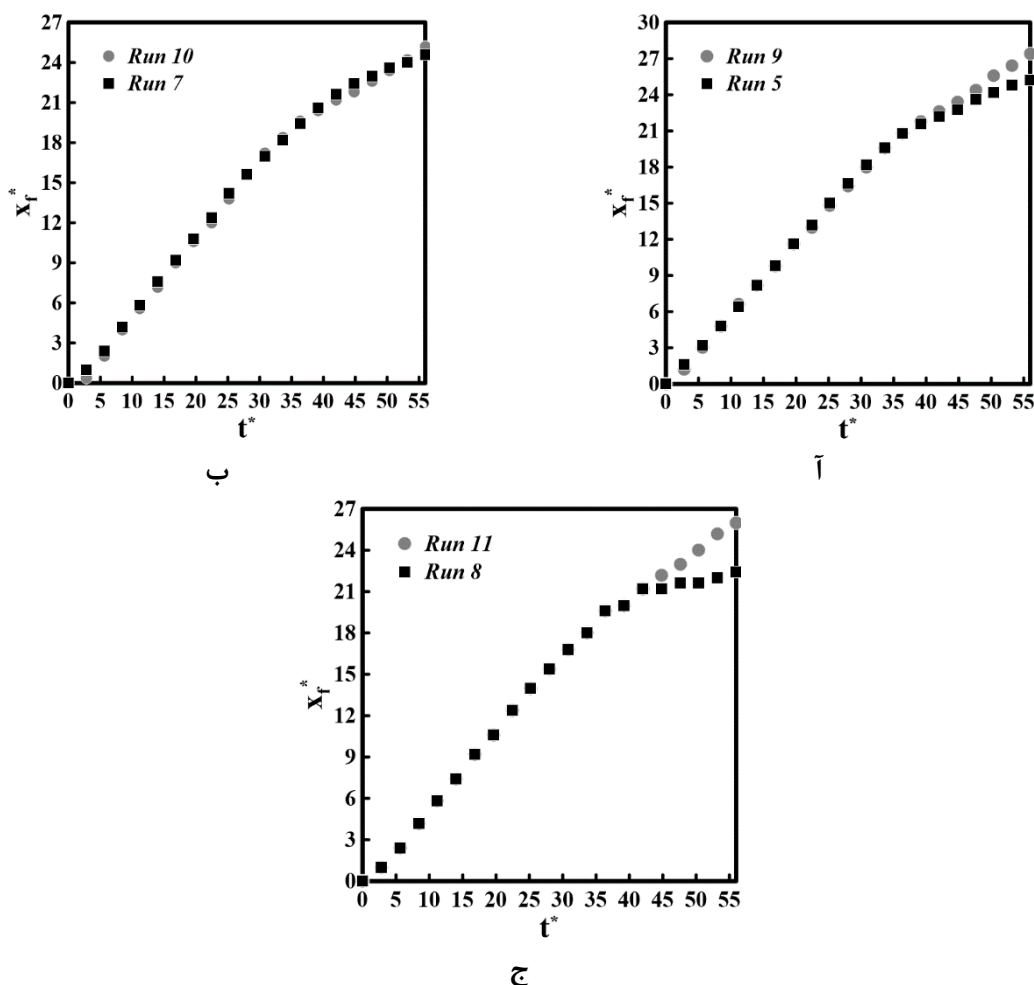


شکل ۸. کانتور مجموع غلظت و کسر حجمی سیال برای شبیه‌سازی‌های جریان باد موافق با اعداد  $Re_{Air} = 0$  تا  $Re_{Air} = 68800$  در زمان بی‌بعد

Fig. 8. Contour of total concentration and volume fraction of fluid for wind flow simulations with  $Re_{Air} = 0$  to  $Re_{Air} = 68800$  in dimensionless time 28

نتایج، نشان داده شده است. این شکل نیز به وضوح نشان می‌دهد که با افزایش  $Re_{Air}$ ، محل پیشانی بیش از پیش عقب می‌افتد. در شکل ۹، جهت مقایسه روند، محل پیشانی جریان در حضور باد موافق و مخالف، برای ۳ عدد  $Re_{Air} = 34400$ ،  $Re_{Air} = 51600$  و  $Re_{Air} = 68800$  به دست آمده است. در هر سه نمودار مشخص شد که پس از زمان بی‌بعد ۴۰، محل پیشانی جریان در حضور باد مخالف نسبت به حالت متناظر آن در حضور باد موافق، جلوتر است. اما پیش از زمان بی‌بعد ۴۰، اختلاف محسوسی بین مقادیر محل پیشانی در هیچ‌یک از نمودارها دیده نمی‌شود.

گزارش کردند، روندی که مشاهده می‌شود به این صورت است که با افزایش  $Re_{Air}$ ، محل پیشانی بیش از پیش عقب می‌افتد. در بخش بعد نشان داده خواهد شد که افزایش سرعت باد سبب افزایش درون‌آمیختگی می‌شود و افزایش درون‌آمیختگی به معنای افزایش اختلاط است که سبب کاهش اختلاف چگالی و به تبع آن کاهش نیروی محرک شناوری می‌شود و مانع از پیشروی سریع‌تر جریان چگال می‌گردد. در مورد اجرای ۴ که متناظر با  $Re_{Air} = 25800$  است، مشاهده شد که پس از زمان بی‌بعد ۳۵، محل پیشانی نسبت به شبیه‌سازی‌ها با سرعت باد بالاتر، بیش‌تر عقب می‌افتد. در شکل ۸، کانتور مجموع غلظت و کسر حجمی سیال برای تمامی شبیه‌سازی‌های جریان باد موافق در زمان بی‌بعد ۲۸ جهت نمایش گرافیکی



شکل ۹. نمودارهای مقایسه محل پیشانی جریان چگال در حضور باد موافق و مخالف با جریان در اعداد (ا)  $Re_{Air} = 34400$ ،

(ب)  $Re_{Air} = 51600$  و (ج)  $Re_{Air} = 68800$

**Fig. 9. Comparison diagrams of the density current head position in the presence of winds for and against the current in the numbers (a)  $Re_{Air} = 34400$ , (b)  $Re_{Air} = 51600$  and (c)  $Re_{Air} = 68800$**

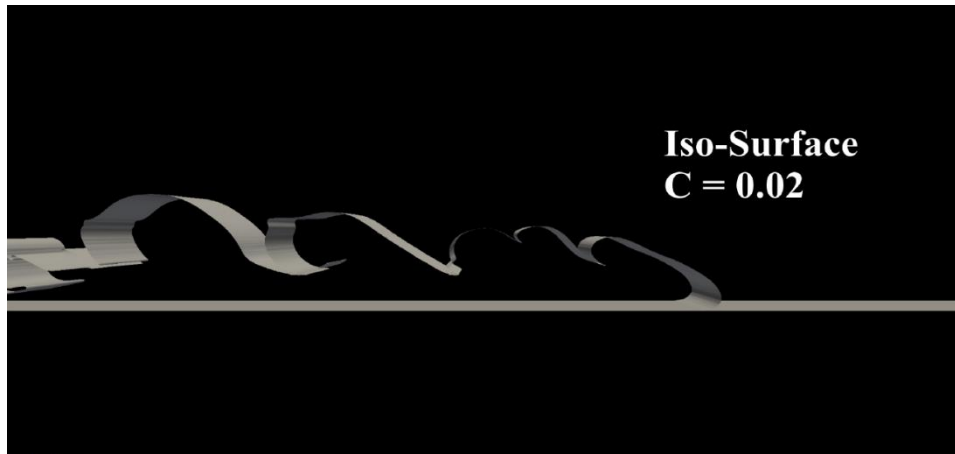
شده به جریان چگال محاسبه می‌شود. سپس با تعریف یک صفحه صاف مستطیلی و تقسیم دبی حجمی به دست آمده در قسمت قبل بر مساحت این صفحه فرضی، مقدار سرعت درون آمیختگی ( $U_e$ ) به دست می‌آید [۲۳]. در کار حاضر از روشی دیگر برای محاسبه درون آمیختگی در هر لحظه، استفاده شده است. در این روش، با تعریف یک ایزوسرفیس<sup>۱</sup> با مقدار غلظت بی بعد  $C = 0.02$  سطح تماس بین سیال محیطی و سیال چگال به طور کامل به دست می‌آید (شکل ۱۰).

سپس به کمک میدان سرعت محاسبه شده، بردارهای نرمال سطح

### ۵-۳- بررسی درون آمیختگی

در این بخش به بررسی پارامتر بی بعد درون آمیختگی پرداخته می‌شود. هنگامی که انرژی پتانسیل اولیه جریان چگال به انرژی جنبشی تبدیل می‌شود، اختلاط بین جریان و سیال محیطی (آب تازه) اتفاق می‌افتد. در طول مسیر، آب تازه وارد جریان چگال شده و حجم آن را افزایش می‌دهد که به این پدیده درون آمیختگی گفته می‌شود [۱]. این پارامتر نشان می‌دهد که به چه میزان آب خالص محیطی آلوده شده است. درون آمیختگی محاسبه شده در کارهای پیشین، از روشی تقریبی به دست می‌آید. با تقسیم اختلاف حجم جریان چگال بین دو زمان متوالی بر اختلاف آن دو زمان، دبی حجمی وارد

1 Iso-surface



شکل ۱۰. ایزوسرفیس  $C = 0.02$  برای به دست آوردن سطح مشترک بین سیال محیطی و سیال چگال

Fig. 10. Iso-surface  $C=0.02$  to obtain the interface between ambient fluid and dense fluid

#### ۵-۴- بررسی تنش برشی دیوار

همان طور که در قسمت‌های قبل توضیح داده شد عامل اصلی تعلیق مجدد ذرات، تنش برشی دیوار است. با توجه به این موضوع که جریان چگال در شبیه‌سازی‌های انجام شده برای جریان باد موافق و مخالف، دارای ذرات با قطر یکسان (۲۰ میکرون) است؛ بررسی تنش برشی دیوار می‌تواند مفید باشد. در این بخش تأثیر جریان باد بر تنش برشی دیوار بررسی می‌شود. برای بی‌بعدسازی تنش برشی دیوار از رابطه زیر استفاده می‌شود.

$$\tau_w^* = \frac{\tau_w}{g(\rho_s - \rho_w)D_p} \quad (25)$$

که در آن چگالی ذرات موجود در جریان چگال است. در جدول ۲ مقادیر میانگین و بیشینه تنش برشی دیوار برای شبیه‌سازی‌های جریان باد موافق و مخالف ارائه شده است. تنش برشی دیوار نماینده میدان سرعت آشفته است و نینو [۲۵] نشان داد که معادله (۲۵) بی‌بعد، در تناسب مستقیم با نسبت نیروی لیفت آشفته به نیروی گرانش وارده بر ذرات است. جدول ۲ نشان می‌دهد که مقدار میانگین تنش برشی دیوار با افزایش سرعت باد در هر دو دسته شبیه‌سازی جریان باد موافق و مخالف، افزایش می‌یابد؛ در نتیجه با افزایش سرعت جریان باد و در پی آن افزایش نیروی لیفت در ذرات (غلبه

ایزوسرفیس و مساحت ایزوسرفیس مقدار سرعت درون‌آمیختگی محاسبه می‌شود و سپس به کمک رابطه

$$E = \frac{U_\epsilon}{U_{head}} \quad (24)$$

پارامتر بی‌بعد درون‌آمیختگی محاسبه می‌شود ( $U_{head}$  سرعت لحظه‌ای پیشانی جریان است). شایان ذکر است که با تغییر مقدار  $C$  تغییر محسوسی در نتایج درون‌آمیختگی ایجاد نمی‌شود [۲۴]. در جدول ۲ مقادیر میانگین و بیشینه درون‌آمیختگی هر اجرا به تفکیک آورده شده است. مشاهده شد که مقدار میانگین و بیشینه درون‌آمیختگی با افزایش سرعت جریان باد در هر دو دسته شبیه‌سازی‌های باد موافق و مخالف، افزایش می‌یابد. مشاهده شد که برای اجرای ۸ (جریان باد موافق)، مقدار میانگین ۴۶۳ درصد و مقدار بیشینه ۹۲۱ درصد نسبت به اجرای ۱ (بدون جریان باد) افزایش می‌یابد و همین‌طور برای اجرای ۱۱ (جریان باد مخالف)، مقدار میانگین ۳۹۱ درصد و مقدار بیشینه ۳۵۲ درصد نسبت به اجرای ۱ افزایش می‌یابد. نتیجه مهم این قسمت آن است که سرعت ورود سیال خالص تمیز به داخل سیال چگال‌تر با افزایش سرعت باد به‌طور قابل ملاحظه‌ای افزایش می‌یابد که خود به معنای آلودگی سریع‌تر نواحی آبی کم‌عمق است.

جدول ۲. مقادیر میانگین و بیشینه درون آمیختگی و تنش برشی دیوار و همین‌طور مساحت سطح زیر نمودار پروفیل رسوب برای جریان‌های باد موافق و مخالف

Table 2. Mean and maximum values of entrainment and wall shear stress as well as the area under the sedimentation profile diagram for agree and disagree wind flows

$\int Q_s^* dx^*$	$\tau_{wmax}^*$	$\tau_{wave}^*$	$E_{max}$	$E_{ave}$	اجرا
۲/۵۱۴۸	۰/۲۱۰۸	۰/۰۴۴	۰/۰۰۰۹۸	۰/۰۰۰۳۲	۱
۲/۲۹۷۹	۰/۳۴۷	۰/۰۴۶	۰/۰۰۱۸۷	۰/۰۰۰۵۸	۲
۲/۲۰۱۱	۰/۲۶۶	۰/۰۴۸	۰/۰۰۲۱۷	۰/۰۰۰۶۱	۳
۲/۳۴۲۴	۰/۳۰۷	۰/۰۵۱	۰/۰۰۳۱۲	۰/۰۰۰۷۱	۴
۲/۳۴۷۱	۰/۴۱۵	۰/۰۵۵	۰/۰۰۳۲۸	۰/۰۰۰۷۴	۵
۲/۳۰۶۸	۰/۲۹۹	۰/۰۷	۰/۰۰۲۸۳	۰/۰۰۰۸۸	۶
۲/۲۵۱۹	۰/۵۷۳	۰/۰۷۲	۰/۰۱۱۵	۰/۰۰۱۵	۷
۲/۱۳۵۵	۰/۴۴۵	۰/۱۰۷	۰/۰۱	۰/۰۰۱۸	۸
۲/۳۳۷۴	۰/۳۰۹	۰/۰۵۷	۰/۰۰۱۹۳	۰/۰۰۰۶۶	۹
۲/۰۳۸۵	۰/۳۹۱	۰/۰۶۷	۰/۰۰۵۴۱	۰/۰۰۱۲۵	۱۰
۱/۸۷۱۹	۰/۴۰۲	۰/۱۲۱	۰/۰۰۴۴۳	۰/۰۰۱۵۷	۱۱

$$Q_s = \int_0^\infty C_w(x,t) V_s dt \quad (26)$$

استفاده می‌شود که در آن  $C_w$  غلظت بی‌بعد جریان چگال در کف کانال است. مفهوم فیزیکی  $Q_s$  در واقع ارتفاع رسوب و واحد آن متر است؛ در نتیجه برای بی‌بعدسازی آن از همان نصف ارتفاع لاک استفاده می‌شود. واضح است که صفر شدن مقدار آن پایان رسوب‌گذاری را نشان می‌دهد.

در شکل ۱۱، پروفیل رسوب برای شبیه‌سازی‌های جریان چگال در حضور جریان باد موافق رسم شده است. همان‌طور که در قسمت قبل اشاره شد، به دلیل کم‌بودن مقادیر تنش برشی دیوار، تفاوت محسوسی بین پروفیل‌های رسوب مشاهده نشد اما به‌طور قابل توجهی دیده شد که در بسیاری از نقاط ارتفاع رسوب در شبیه‌سازی‌های دارای جریان باد نسبت به حالت بدون باد کمتر بود که این خود نشان‌دهنده پدیده تعلیق مجدد ذرات است. از طرفی دیده شد که با افزایش سرعت باد، فرایند رسوب‌گذاری ذرات در فواصل کمتری نسبت به حالت بدون باد به پایان می‌رسد.

در شکل ۱۲ مقایسه پروفیل رسوب برای دو جریان باد موافق و مخالف آورده شده و همانند نمودار برای جریان باد مخالف، اختلاف محسوسی نسبت به حالت جریان باد موافق در پروفیل‌های رسوب مشاهده نشد اما مشاهده شد که در بسیاری از نقاط، ارتفاع رسوب در حالت جریان باد مخالف کمتر از حالت

این نیرو به نیروی گرانش وارد بر ذرات)، تعلیق مجدد ذرات بیشتر می‌شود. مشاهده شد که برای اجرای ۸، مقدار میانگین ۱۴۳ درصد و برای اجرای ۱۱، مقدار میانگین ۱۷۵ درصد نسبت به اجرای ۱ افزایش می‌یابد.

در مورد بیشینه تنش برشی دیوار روند مشخصی مشاهده نشد. باید توجه داشت، با اینکه روند صعودی در مقادیر تنش برشی دیوار مشاهده می‌شود اما جز در بیش‌ترین سرعت جریان باد (اجرای ۸)، مقادیر مطلق این تنش چشم‌گیر نیستند و به تبع آن نباید در فرایند رسوب‌گذاری تأثیر چندان زیادی داشته باشد.

#### ۵-۵- بررسی رفتار رسوب‌گذاری

همان‌گونه که در قسمت‌های قبل اشاره شد، رسوب‌گذار بودن جریان چگال حاوی ذره، یکی از مخرب‌ترین ویژگی‌های این پدیده ژئوفیزیکی است. به‌منظور بررسی رسوب‌گذاری در جریان گل‌آلود، پروفیل رسوب ذرات رسم می‌شود زیرا با توجه به اینکه در ابتدای حرکت جریان همه ذرات معلق هستند، روند کاهش این پروفیل در مقاطع مختلف کانال به معنی کاهش رسوب ذرات در طی بستر است. بدین ترتیب می‌توان با محاسبه پروفیل رسوب در هر مقطع کانال و مقایسه با مقدار آن در ورودی، به بررسی رفتار رسوب‌گذاری جریان پرداخت. برای به‌دست آوردن پروفیل رسوب ذرات در جریان از رابطه

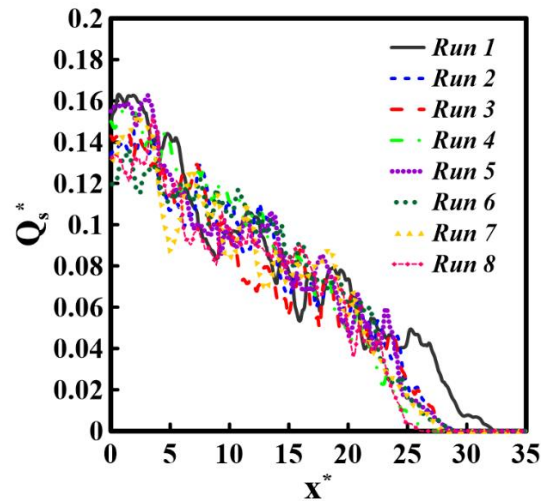
به حالت بدون جریان باد عقب‌تر است.

۲. با بررسی اجراهای دارای جریان باد مخالف با جریان چگال، اختلاف محسوسی بین مقادیر محل پیشانی آن‌ها با اجراهای جریان باد موافق متناظر جز در زمان‌های پایانی، مشاهده نشد.

۳. در بخش بعد به بررسی تأثیر جریان باد بر پارامتر بی بعد درون‌آمیختگی پرداخته شد. مشاهده شد که مقدار میانگین و بیشینه درون‌آمیختگی با افزایش سرعت جریان باد در هر دو دسته شبیه‌سازی‌های باد موافق و مخالف، افزایش می‌یابد. در سرعت‌های باد زیاد دیده شد که مقدار بیشینه تا حدود ۱۰ برابر مقدار بیشینه در حالت بدون جریان باد نیز می‌تواند بالا رود. نتیجه مهم این قسمت آن است که سرعت ورود سیال خالص تمیز به داخل سیال چگال‌تر با افزایش سرعت باد به‌طور قابل ملاحظه‌ای افزایش می‌یابد که خود به معنای آلودگی سریع‌تر نواحی آبی کم‌عمق است.

۴. در بخش بعد به بررسی تأثیر جریان باد بر رفتار تنش برشی دیوار پرداخته شد. مشاهده شد که مقدار میانگین تنش برشی دیوار با افزایش سرعت باد در هر دو دسته شبیه‌سازی جریان باد موافق و مخالف، افزایش می‌یابد؛ در نتیجه با افزایش سرعت جریان باد و در پی آن افزایش نیروی لیفت در ذرات (غلبه این نیرو به نیروی گرانش وارد بر ذرات)، تعلیق مجدد ذرات بیشتر می‌شود. در مورد بیشینه تنش برشی دیوار روند مشخصی مشاهده نشد. باید توجه داشت، با اینکه روند صعودی در مقادیر تنش برشی دیوار مشاهده می‌شود اما جز در بیشترین سرعت جریان باد (اجرای ۸)، مقادیر مطلق این تنش چشم‌گیر نیستند و به تبع آن نباید در فرایند رسوب‌گذاری تأثیر چندانی زیادی داشته باشد.

۵. در انتها به بررسی تأثیر جریان باد بر رفتار رسوب‌گذاری جریان پرداخته شد. همان‌طور که در قسمت قبل اشاره شد، به دلیل کم‌بودن مقادیر تنش برشی دیوار، تفاوت محسوسی بین پروفیل‌های رسوب مشاهده نشد اما به‌طور قابل توجهی دیده شد که در بسیاری از نقاط ارتفاع رسوب در شبیه‌سازی‌های دارای جریان باد نسبت به حالت بدون باد کم‌تر بود که این خود نشان‌دهنده پدیده تعلیق مجدد ذرات است. از طرفی دیده شد که با افزایش سرعت باد، فرایند رسوب‌گذاری ذرات در فواصل کمتری نسبت به حالت بدون باد به پایان می‌رسد. در ادامه این قسمت، مقایسه پروفیل رسوب برای دو جریان باد موافق و مخالف آورده شده و برای جریان باد مخالف نیز اختلاف محسوسی نسبت به حالت جریان باد موافق در پروفیل‌های رسوب مشاهده نشد اما دیده شد که در بسیاری از نقاط، ارتفاع رسوب در حالت جریان باد مخالف کم‌تر از حالت جریان باد موافق است (یعنی انباشت رسوب



شکل ۱۱. نمودار پروفیل رسوب برای شبیه‌سازی‌های جریان چگال در حضور جریان باد موافق

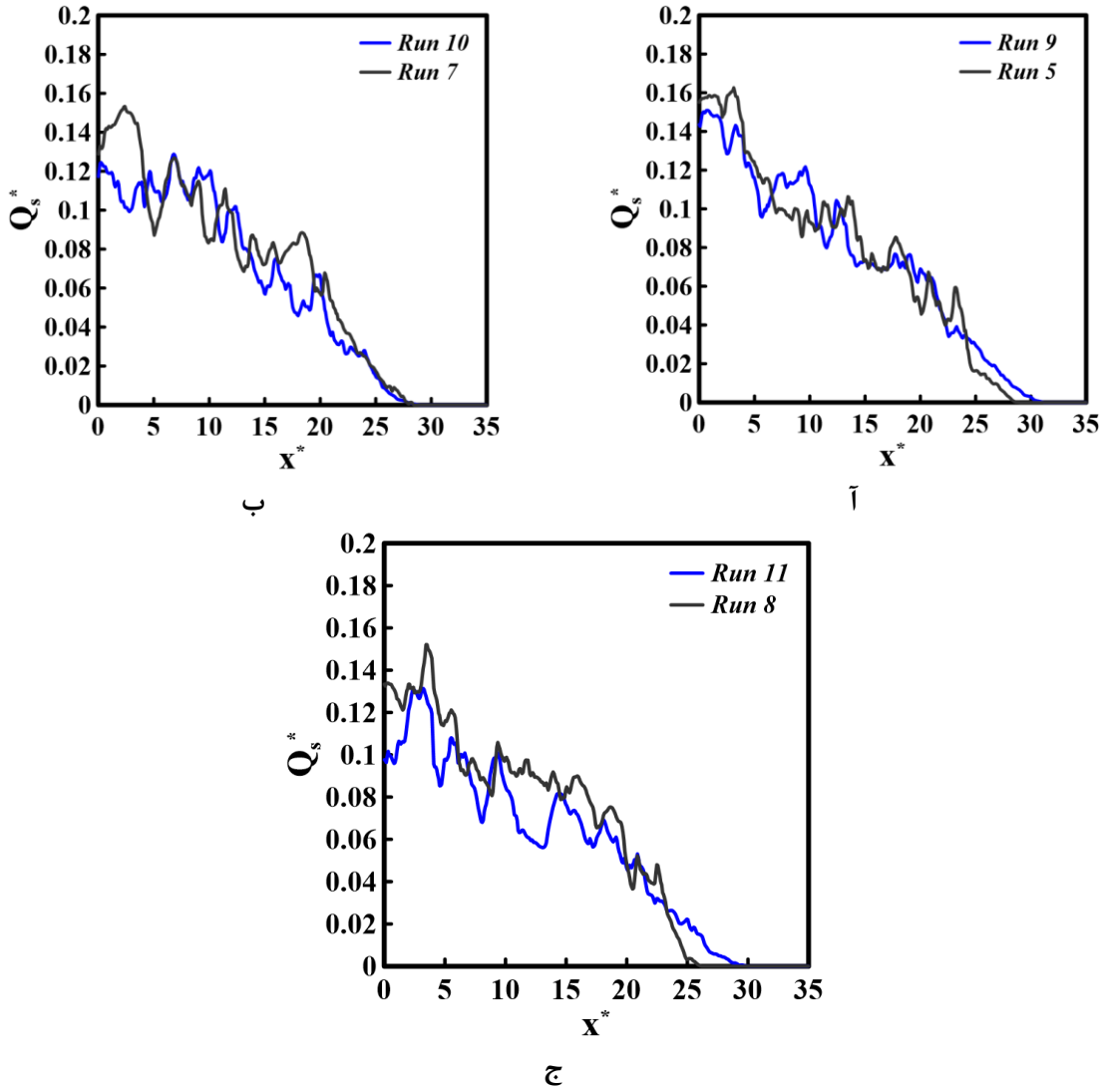
Fig. 11. Sedimentation profile diagram for density current simulations in the presence of agree wind flow

جریان باد موافق است (یعنی انباشت رسوب کم‌تر از حالت جریان باد موافق است). همان‌طور که گسولتی و استمو دریافتند، به‌نظر می‌رسد که جریان باد موافق در سرعت‌های بسیار بالاتر از سرعت اجرای ۸ (یعنی سرعت طوفان یا تُندر)، تأثیرات زیان‌بارتری نسبت به جریان باد مخالف دارد و انباشت رسوب آن بیش‌تر می‌شود. برای وضوح بیش‌تر مسئله، مساحت سطح زیر نمودار پروفیل رسوب برای هر دو دسته شبیه‌سازی‌های باد موافق و مخالف در جدول ۲ محاسبه شد و همان‌طور که مشاهده می‌شود، مقدار این مساحت برای جریان باد مخالف کم‌تر از جریان باد موافق در  $Re_{Air} = 68800$  است (برای اجرای ۸، ۱۵ درصد و برای اجرای ۱۱، ۲۶ درصد کاهش در رسوب‌گذاری نسبت به اجرای ۱ مشاهده شد).

## ۶- نتیجه‌گیری

پیش از این مطرح شد که کار حاضر شبیه‌سازی عددی دو بعدی جریان چگال رهاسازی توده در حضور جریان باد است. این شبیه‌سازی به کمک مدل آشفتگی ال‌ای‌اس انجام شده است و نتایج آن به‌صورت مختصر در زیر آمده است:

۱. مشاهده شد که با افزایش عدد رینولدز جریان باد موافق، اختلاف چگالی بین سیال محیطی و سیال چگال و به تبع آن نیروی شناوری محرک جریان کاهش یافته و در نتیجه محل پیشانی عقب می‌افتد. همچنین به‌وضوح دیده شد که در همه اجراهای دارای جریان باد، محل پیشانی نسبت



شکل ۱۲. نمودارهای مقایسه پروفیل رسوب جریانی چگال در حضور باد موافق و مخالف با جریان در اعداد (ا)  $Re_{Air} = 34400$ ، (ب)

$Re_{Air} = 51600$  و (ج)  $Re_{Air} = 68800$

Fig. 12. Comparison diagrams of density current sedimentation profiles in the presence of agree and disagree wind in the numbers in (a)  $Re_{Air} = 34400$ , (b)  $Re_{Air} = 51600$  and (c)  $Re_{Air} = 68800$



$V_s$	طول موج امواج هلمبولت، m
$\Delta$	عرض فیلتر
$\delta$	دلتای کرونیگر
$\varepsilon\varepsilon$	نرخ اضمحلال انرژی جنبشی زیر شبکه
$\kappa$	انحنای سطح آزاد
$\mu$	لزجت دینامیکی، kg/m.s
$\nu$	لزجت سینماتیکی، m <sup>2</sup> /s
$\rho$	چگالی، kg/m <sup>3</sup>
$\rho_0$	چگالی مرجع، kg/m <sup>3</sup>
$\sigma$	کشش سطحی، N/m
$\tau_{ij}^m$	تانسور زیر شبکه
$\tau_w$	تنش برشی دیواره، Pa
$\psi$	مولفه‌ی مورد نظر

#### زیرنویس

<i>Air</i>	هوا
<i>ave</i>	متوسط
<i>b</i>	شناوری
<i>f</i>	مؤلفه محل پیشانی
<i>i</i>	شمارنده
<i>j</i>	شمارنده
<i>m</i>	مخلوط
<i>max</i>	حداکثر
<i>SGS</i>	مؤلفه زیر شبکه
<i>p</i>	ذرات
<i>w</i>	آب

#### بالانویس

*	مؤلفه‌ی بی‌بعد
-	فیلتر شده
→	بردار

کمتر از حالت جریان باد موافق است). به نظر می‌رسد که جریان باد موافق در سرعت‌های بسیار بالاتر از سرعت اجرای ۸ (یعنی سرعت طوفان یا تندر) تأثیرات زیان‌بارتری نسبت به جریان باد مخالف دارد و انباشت رسوب آن بیش‌تر می‌شود.

#### ۷- فهرست علائم

##### علائم انگلیسی

$C$	غلظت جریان چگال
$C_k$	ثابت
$C_w$	غلظت بی‌بعد جریان چگال در کف کانال
$C_{\varepsilon\varepsilon}$	ثابت
$D$	قطر متوسط ذرات، m
$E$	درون آمیختگی
$F_i^{ST}$	بردار نیروی کشش سطحی
$Fr_i$	عدد فرود آشفته
$g$	شتاب گرانشی، m/s <sup>2</sup>
$g'$	شتاب گرانشی کاهش‌یافته
$H$	ارتفاع کانال، m
$h$	ارتفاع جریان چگال، m
$N$	عدد شناوری
$J_j^m$	بردار زیر شبکه
$n$	بردار عمود بر سطح مشترک
$p$	فشار، Pa
$Q_s$	ارتفاع رسوب، m
$Re$	رینولدز
$S_{ij}$	تانسور نرخ کرنش، ۱/s
$Sc$	عدد اشمیت
$t$	زمان، s
$U$	سرعت، m/s
$U_{head}$	سرعت لحظه‌ای پیشانی جریان، m/s
$u$	میدان سرعت در نماد تانسوری، m/s
$u_\tau$	سرعت اصطکاکی متناظر با تنش برشی دیواره، m/s
$V_s$	سرعت سرعت سقوط استوکس، m/s
$x$	مؤلفه طول، m
$x_0$	طول جریان چگال، m
$y$	مؤلفه ارتفاع، m
$y^+$	ارتفاع اولین سلول مجاور مرز جامد

##### علائم یونانی

$\alpha$	ضریب نفوذ مولکولی، m <sup>2</sup> /s
$\alpha'$	کسر حجمی سیال
$\beta$	ثابت چگالی

#### منابع

- [1] R.I. Wilson, H. Friedrich, C. Stevens, Turbulent entrainment in sediment-laden flows interacting with an obstacle, *Physics of Fluids*, 29(3) (2017) 036603.
- [2] R. Manica, Sediment gravity flows: Study based on experimental simulations, *Hydrodynamics-Natural Water Bodies*, 1 (2012).
- [3] A. Koohandaz, E. Khavasi, H. Yousefi, H. Sadeghi Sarsari, Air flow effect on the behavior of lock-exchange gravity current, *Journal of Hydraulic Structures*, 6(1) (2020) 33-54.
- [4] F. Necker, C. Härtel, L. Kleiser, E. Meiburg, High-resE

- Research: Oceans, 123(11) (2018) 8638-8654.
- [14] P. Lopes, Free-surface flow interface and air-entrainment modelling using OpenFOAM, 2013.
- [15] O. Ubbink, Numerical prediction of two fluid systems with sharp interfaces, (1997).
- [16] J.U. Brackbill, D.B. Kothe, C. Zemach, A continuum method for modeling surface tension, Journal of computational physics, 100(2) (1992) 335-354.
- [17] S.K. Friedlander, Smoke, dust and haze: Fundamentals of aerosol behavior, wi, (1977).
- [18] W.C. Hinds, Aerosol technology: properties, behavior, and measurement of airborne particles, John Wiley & Sons, 1999.
- [19] S.B. Pope, Turbulent flows, in, IOP Publishing, 2001.
- [20] H. Tofighian, E. Amani, M. Saffar-Avval, A large eddy simulation study of cyclones: The effect of sub-models on efficiency and erosion prediction, Powder Technology, 360 (2020) 1237-1252.
- [21] W.-W. Kim, S. Menon, A new dynamic one-equation subgrid-scale model for large eddy simulations, in: 33rd Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, 1995, pp. 356.
- [22] J. Pelmaud, S. Norris, H. Friedrich, LES grid resolution requirements for the modelling of gravity currents, Computers & Fluids, 174 (2018) 256-270.
- [23] L. Ottolenghi, C. Adduce, R. Inghilesi, V. Armenio, F. Roman, Entrainment and mixing in unsteady gravity currents, Journal of Hydraulic Research, 54(5) (2016) 541-557.
- [24] R. Ouillon, E. Meiburg, B.R. Sutherland, Turbidity currents propagating down a slope into a stratified saline ambient fluid, Environmental Fluid Mechanics, 19(5) (2019) 1143-1166.
- [25] Y. Niño, F. Lopez, M. Garcia, Threshold for particle entrainment into suspension, Sedimentology, 50(2) (2003) 247-263.
- olution simulations of particle-driven gravity currents, International Journal of Multiphase Flow, 28(2) (2002) 279-300.
- [5] F. De Rooij, S. Dalziel, Time-resolved measurements of the deposition under turbidity currents, in: Proceedings of the Conference on Sediment Transport and Deposition by Particulate Gravity Currents, Leeds, 1998.
- [6] M. Nasr-Azadani, B. Hall, E. Meiburg, Polydisperse turbidity currents propagating over complex topography: comparison of experimental and depth-resolved simulation results, Computers & Geosciences, 53 (2013) 141-153.
- [7] M. Nasr-Azadani, E. Meiburg, Turbidity currents interacting with three-dimensional seafloor topography, Journal of Fluid Mechanics, 745 (2014) 409.
- [8] K. Bhaganagar, Role of head of turbulent 3-D density currents in mixing during slumping regime, Physics of Fluids, 29(2) (2017) 020703.
- [9] S.a.K. Teymouri, Ehsan., Numerical study of lock exchange turbidity current depositional behavior in stratified environment, Amirkabir Journal of Mechanical Engineering, 50(1-3) (2018).
- [10] W. Ding, T. Wu, B. Qin, Y. Lin, H. Wang, Features and impacts of currents and waves on sediment resuspension in a large shallow lake in China, Environmental Science and Pollution Research, 25(36) (2018) 36341-36354.
- [11] A. Gkesouli, A. Stamou, A CFD modeling procedure to assess the effect of wind in settling tanks, Journal of Hydroinformatics, 21(1) (2019) 123-135.
- [12] L. Morales-Marin, J. French, H. Burningham, R. Battarbee, Three-dimensional hydrodynamic and sediment transport modeling to test the sediment focusing hypothesis in upland lakes, Limnology and Oceanography, 63(S1) (2018) S156-S176.
- [13] X. Xie, M. Li, W. Ni, Roles of Wind-Driven Currents and Surface Waves in Sediment Resuspension and Transport During a Tropical Storm, Journal of Geophysical

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

*P. Nazmi, E. Khavasi, S. Rostami Dehjalali, Studying Wind Effect on the Hydrodynamic Behavior of Lock-Exchange Density Current, Amirkabir J. Mech Eng., 53(9) (2021) 4807-4826.*

**DOI:** 10.22060/mej.2021.19158.6962



