

بررسی عددی رفتار رسوب‌گذاری جریان گل‌آلود رهاسازی توده در محیط دارای لایه‌بندی

صبا تیموری، احسان خواصی*، حمید یوسفی

دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه زنجان، زنجان، ایران

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۳۹۶/۱۱/۱۹

بازنگری: ۱۳۹۷/۰۲/۲۸

پذیرش: ۱۳۹۷/۰۲/۳۰

ارائه آنلاین: ۱۳۹۷/۰۳/۰۷

کلمات کلیدی:

جریان چگال

رهاسازی توده

محیط لایه‌بندی شده

شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ

سطح شیب‌دار

خلاصه: در این مقاله شبیه‌سازی عددی سه بعدی به منظور مطالعه رفتار رسوب‌گذاری جریان گل‌آلود رهاسازی توده در محیط دارای لایه‌بندی چگالی انجام شده است. شبیه‌سازی‌ها به روش شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ انجام شده است. نتایج به دست آمده در حضور لایه‌بندی تطابق خوبی با نتایج آزمایشگاهی دارند. هم‌چنین حضور لایه‌بندی چگالی در محیط، باعث کاهش قابل توجه سرعت پیشروی جریان می‌شود، به طوری که مکان پیشانی جریان ۵۷ درصد عقب می‌افتد، ولی تأثیر به‌سزایی بر روی الگوی رسوب‌گذاری ندارد. علاوه بر این، نتایج به دست آمده نشان داد که افزایش شیب تا ۱۲ درجه، باعث افزایش رسوب‌گذاری ۱۵ و ۴۰ درصدی نسبت به شیب‌های ۹ و ۶ درجه شده است. هم‌چنین، مشاهده شد که افزایش قطر ذرات، باعث کاهش مومنتوم جریان و ۰/۷۵ و ۳/۷ برابر شدن رسوب‌گذاری جریان شده است. با هدف نمایش دقیق‌تر برهم‌کنش ذرات روی هم، سرعت سقوط ذرات به صورت متغیر با غلظت نیز در نظر گرفته شده است. نتایج این تحلیل نشان می‌دهد که متغیر در نظر گرفتن سرعت سقوط ذرات در مراحل اولیه پیشروی جریان باعث تغییر ناچیزی در سرعت پیشانی می‌شود ولی در ادامه، در نظر گرفتن سرعت سقوط متغیر برای ذرات، سرعت بیشتری را برای پیشانی جریان پیش‌بینی می‌کند. در حالت سرعت متغیر مکان جدایش جریان ۲۲ درصد افزایش می‌یابد.

۱- مقدمه

جریان‌های گرانشی^۱، که جریان‌های چگال^۲ یا جریان‌های شناوری هم نام دارند، تحت تأثیر نیروی گرانش و به واسطه تفاوت چگالی بین جریان و محیط اطراف جریان حرکت می‌کنند. این جریان‌ها پدیده‌های مهمی هستند، که معمولاً در هر دو شرایط طبیعی و مصنوعی رخ می‌دهند. بر اساس شرایط ورودی جریان، جریان چگال را می‌توان به دو نوع اصلی تقسیم کرد: منبع پیوسته مایعات چگال (جریان ثابت) و رهاسازی توده^۳ [۱]. جریان‌های چگال بر اساس تغییرات چگالی به دو نوع همگن و یا لایه‌ای^۴ تقسیم‌بندی می‌شوند. در صورتی که چگالی در هر مکانی از جریان ثابت باشد، جریان همگن است و اگر

- 1 Gravity currents
- 2 Density current
- 3 Lock-exchange
- 4 Stratified

چگالی در جهات مختلف تغییر کند، جریان لایه‌ای است [۲ و ۳].

جریان‌های گل‌آلود^۵ نوع خاصی از جریان گرانشی هستند که نیروی محرک آن (یعنی اختلاف چگالی) به دلیل حضور ذرات جامد معلق در سیال است. فرسایش و رسوب‌گذاری جزو ویژگی‌هایی مهم جریان‌های گل‌آلود است [۴-۶]. این جریان‌ها سازوکار مهمی برای حمل رسوب در اقیانوس‌ها یا دریاچه‌ها هستند و نقش مهمی در تشکیل مخازن هیدروکربن آب‌های عمیق و ویژگی‌های هندسی در مقیاس بزرگ، مانند امواج رسوبی در دریا، ایفا می‌کنند [۷-۱۴].

برای جریان‌های چگال با جریان ورودی ثابت روی یک سطح شیب‌دار در محیط یکنواخت، نتایج آزمایشگاهی نشان داده‌اند که سرعت پیشانی جریان تقریباً ثابت بوده و تغییر کمی با تغییر شیب دارد [۱۷-۱۵]. برای جریان‌های چگال رهاسازی توده در محیط یکنواخت و شیب‌دار، آزمایش‌های انجام شده نشان داده‌اند که ابتدا

5 Turbidity currents

* 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 فرمائید.



افزایش می‌یابد. این میزان افزایش اندازه پیشانی، به طور تقریبی به صورت خطی با زاویه سطح شیب‌دار افزایش می‌یابد. نتایج این مقاله هم‌چنین نشان داد که جریان گرانشی پایین دست، تا زمانی که به سطح چگالی خنثی (جایی که جریان از روی بستر جدا می‌شود)، نرسیده است، ضخامت یکنواختی دارد [۲۷].

ساموسراکیس^۶ [۲۸] جریان چگال پایین دست یک سطح شیب‌دار را در یک محیط دولایه‌ای بررسی کرد. آن‌ها تأثیر سطح شیب‌دار را روی فرایند اختلاط مطالعه کردند. هم‌چنین رابطه بین درون‌آمیختگی و عدد ریچاردسون را به دست آوردند. اسنو و ساترلند^۷ [۲۹] در مقاله خود، یک فرمول برای پیش‌بینی عمق جدایش را پیشنهاد کردند.

در مقاله نیکلسون^۸ [۳۰]، مطالعه جریان گرانشی بر روی هندسه خاص و بستری تخت در محیط دو لایه‌ای، با استفاده از آزمایش‌های آزمایشگاهی انجام شده است. این تحقیق با فرض بوزینسک انجام شده است به طوری که اختلاف چگالی کم‌تر از ۱۰ درصد است. هندسه تحقیق به صورت بستر سینوسی بررسی شده است. مقاله نیکلسون [۳۰] به بررسی فاکتورهایی که باعث کاهش ناگهانی سرعت جریان (عواملی مانند هندسه و یا میزان امواج داخلی) و در نتیجه تغییر سرعت پیشانی در زمان‌های نسبتاً اولیه می‌شوند، پرداخته است [۳۰].

هی^۹ و همکاران [۱] نشان دادند جریان چگال در محیط لایه‌ای رفتار بسیار متفاوتی دارد. در این مقاله یک مطالعه تجربی بر روی جریان چگال رهاسازی توده به منظور بررسی تأثیر محیط لایه‌بندی شده و هم‌چنین شیب بستر، بر روی هیدرودینامیک جریان گرانشی انجام شده است. نتایج نشان می‌دهد که در ابتدا سرعت پیشانی جریان گرانشی افزایش می‌یابد سپس در هر دو محیط‌های لایه‌بندی شده و لایه‌بندی نشده کاهش می‌یابد. هرچند، در محیط‌های لایه‌بندی شده در طی حرکت جریان روی سطح شیب‌دار، لایه‌بندی باعث کاهش شدید سرعت پیشانی می‌شود. بعلاوه در پایین دست اگر نسبت پارامتر لایه‌بندی $\lambda > 1$ باشد ($\lambda =$ اندازه نسبی لایه‌بندی)، جریان از سطح شیب‌دار جدا شده و پس از آن به صورت افقی درون محیط وارد می‌شوند. در مقایسه با جریان‌های گرانشی در محیط لایه‌بندی نشده، اختلاط آشفته‌گی در محیط‌های لایه‌بندی شده به طور کلی

سرعت پیشانی جریان افزایش، سپس کاهش می‌یابد [۲۳-۱۸]. تحقیق نصرآزادانی و میبورگ^۱ [۲۴] بر روی رفتار رسوب‌گذاری جریان رهاسازی توده انجام شده است. جریان در حالت‌های تک و یا چند ذره‌ای روی هندسه‌های مسطح یا پیچیده، در نظر گرفته شده است. در این مقاله بر روی مقادیری مانند مکان پیشانی جریان، طول زمان اجرا و منحنی‌های رسوب ذرات ریز و درشت تمرکز شده است. بررسی هندسه‌های بسیار پیچیده از این رو حائز اهمیت است که امکان رخداد آن در پدیده‌های واقعی وجود دارد [۲۴].

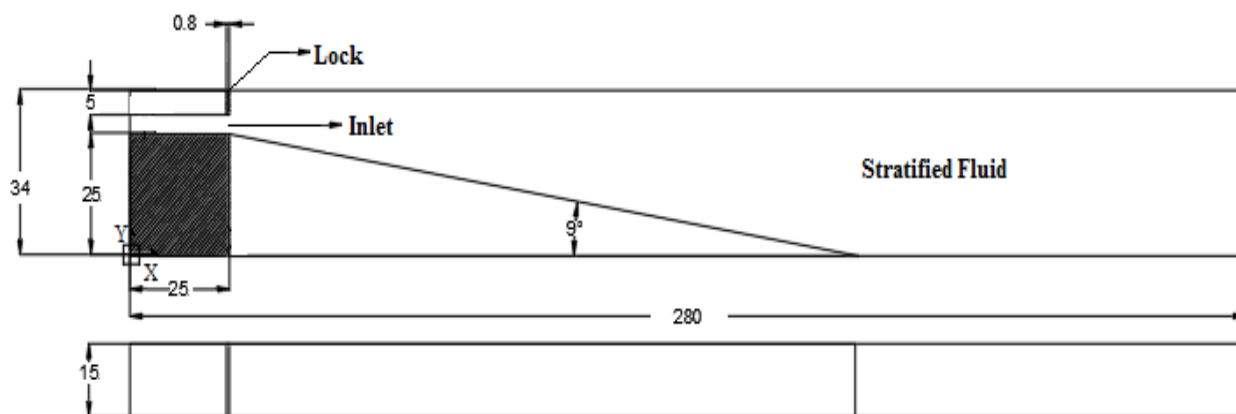
در مطالعه گارسیا و توکیای^۲ [۲۵] از یک مدل شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ^۳ برای انتشار جریان گرانشی بر روی شیب ۵ درصد استفاده شده است. این مطالعه بر روی تأثیر شرایط ورودی در انتشار جریان گرانشی برای حالت جریان پیوسته روی سطح شیب‌دار تمرکز کرده است. دو شرایط ورودی، یعنی نحوه تخلیه جریان و چگالی ورودی، به عنوان پارامترهای اصلی در این شبیه‌سازی در نظر گرفته شده است، و تأثیر آن‌ها بر جریان به طور جداگانه مورد بررسی قرار گرفته است [۲۵].

در مقاله اتولنگی^۴ و همکاران [۲۶] به بررسی بار ذرات معلق و اختلاط در جریان‌های گرانشی ناپایدار که از دامنه‌هایی با شیب‌های ملایم ($\theta = 0^\circ, \theta = 1/4^\circ, \theta = 2/5^\circ$ و $\theta = 5^\circ$) به سمت بالا حرکت می‌کنند، با استفاده از روش شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ، پرداخته‌اند. هدف اصلی این پژوهش، بررسی هیدرودینامیک جریان‌های ژئوفیزیکی منتشرشده در یک سیال محیطی عمیق و نامحدود است که بر روی هندسه‌های پیچیده جاری می‌شوند. از اهداف دیگر این تحقیق، بررسی تأثیر پارامترهای بی‌بعد مانند نسبت ابعاد حجم اولیه جریان گرانشی و نسبت ابعاد عمق بر روی اختلاط و بار ذرات معلق، در جریان گرانشی و در حالت رهاسازی توده می‌باشد [۲۶].

در مقاله بینز^۵ [۲۷] یک مطالعه آزمایشگاهی از جریان‌هایی بر روی بستر با زاویه شیب کم (کم‌تر از ۲۰ درجه) در محیط لایه‌بندی شده، انجام شده است. بیش‌تر شیب‌های پایین دست اقیانوس‌ها در این محدوده زاویه شیب قرار دارند. نتایج به دست آمده نشان داد که اندازه پیشانی جریان، با توجه به ورود سیال محیطی به جریان چگال

- 1 Nasr-Azadani and Meiburg
- 2 Garcia and Tokyay
- 3 Large Eddy Simulayion (LES)
- 4 Ottolenghi
- 5 Baines

- 6 Samothrakis
- 7 Snow and Sutherland
- 8 Nicholson
- 9 He



شکل ۱: نمای کنار و بالای هندسه به کار رفته در شبیه‌سازی (اندازه‌ها در واحد سانتی‌متر می‌باشند).

Fig. 1. Top and side view of the geometry used in the simulations (dimension are in centimeter)

از نوآوری‌های این مقاله محسوب می‌شود. این تحقیق تأثیر شیب کانال و محیط لایه‌بندی شده را بر روی نتایج شبیه‌سازی عددی بررسی کرده و با مقایسه آن با نتایج تجربی هی و همکاران [۱] نشان داده شده‌است که این روش تطابق خوبی با نتایج آزمایشگاهی دارد. باید توجه داشت که با شبیه‌سازی این مسأله می‌توان به بررسی جریان‌های طبیعی به صورت دقیق‌تری پرداخت. از آنجا که آلاینده‌ها معمولاً به ذرات رسوب چسبیده و با آن‌ها حمل می‌شوند، درک و پیش‌بینی حرکت جریان‌های رسوبی، به بررسی و کنترل گسترش آلودگی‌ها کمک می‌کند. به علاوه، مشکلات اساسی موجود در مصب‌ها و نواحی ساحلی مانند نفوذ آب شور و یا انتقال رسوب و انباشته شدن لایه‌های گل سیال عمدتاً مربوط به جریان‌های لایه‌بندی شده هستند.

۲- مسأله مورد بررسی

شبیه‌سازی رهاسازی توده در مخزن مستطیلی به عرض $W=15$ سانتی‌متر، طول $L=280$ سانتی‌متر و ارتفاع $H=34$ سانتی‌متر مطابق شکل ۱، انجام شده‌است. بلوک بالای سطح شیب‌دار به منظور کاهش نوسانات سطح آب ناشی از رهاسازی توده اولیه تنظیم شده‌است. ارتفاع بازشدگی بلوک در ورودی، به مقدار ۴ سانتی‌متری نگه داشته شده‌است. ضخامت بلوک $0/8$ سانتی‌متر است، که در مقایسه با طول مخزن بسیار کوچک است. در نتیجه، تأثیر این ضخامت را می‌توان نادیده گرفت، همان‌طور که در بسیاری از تحقیقات قبلی انجام شده‌است [۲۱ و ۲۷]. صفحات پایین، بالا و صفحات جانبی، دیوار در نظر گرفته شده‌اند و همچنین انتهای کانال

کاهش می‌یابد. حضور لایه‌بندی می‌تواند منجر به پیچیده‌تر شدن ساختار جریان گرانشی شود [۱].

در تحقیق بیگرت^۱ و همکاران [۳۱] با استفاده از شبیه‌سازی عددی مستقیم^۲ سه‌بعدی و به صورت اویلری-اویلری، میزان رسوب ذرات و فیزیک جریان‌های گل‌آلود بررسی شده‌است. این مطالعه بر روی بررسی حالت‌های پیچیده جریان، مانند برخورد جریان با بستر دریا یا سازه‌های دریایی در محیط لایه‌بندی شده، تمرکز کرده‌است. برای به دست آوردن نمایش دقیق دینامیک فرسایش و بار ذرات معلق در جریان، از یک روش شبیه‌سازی ذره‌ای در منطقه‌ای در نزدیکی بستر استفاده شده‌است [۳۱].

با مطالعه تحقیق‌های مختلف می‌توان مشاهده کرد که بیشتر مدل‌سازی‌های جریان چگال بدون ذره، همراه با محیطی همگن و به صورت تجربی صورت گرفته‌است و رفتار رسوب‌گذاری این جریان‌ها در محیط لایه‌بندی شده، چه به صورت تجربی و چه به صورت عددی مطالعه نشده است. بنابراین، در مطالعه حاضر، شبیه‌سازی عددی رفتار رسوب‌گذاری جریان گل‌آلود رهاسازی توده در محیط لایه‌بندی شده، صورت گرفته است. در شبیه‌سازی عددی حاضر با استفاده از روش گردابه‌های بزرگ، به مدل‌سازی و بررسی جریان چگال در کانال مستطیلی دارای بستر شیب‌دار، در حالت‌های بدون حضور ذرات و در حضور ذرات، پرداخته شده‌است. برای بررسی برهم‌کنش ذرات روی هم، شبیه‌سازی در حالت جریان حاوی ذره، در دو حالت سرعت سقوط ذرات ثابت و سرعت متغیر با غلظت، انجام شده‌است، که یکی

1 Bigert

2 Direct Numerical Simulation (DNS)

شرط دیوار وجود دارد.

پیوستگی می‌توان نوشت [۳۲]:

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

که در آن S_{lk} نرخ کرنش فیلترشده می‌باشد. با استفاده از رابطه (۱) در معادله مومنتوم، معادلات پیوستگی، مومنتوم و غلظت (برای جریان حاوی یک نوع ذره) به ترتیب با استفاده از روابط معادله پیوستگی، مومنتوم و غلظت در شکل فیلتر شده به شکل نهایی زیر درمی‌آیند [۳۲]:

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

$$\frac{\partial u_l}{\partial t} + u_k \frac{\partial u_l}{\partial x_k} = \nu_w \frac{\partial^2 u_l}{\partial x_k \partial x_k} + \frac{\partial}{\partial x_k} (2\nu_{SGS} S_{lk}) - \frac{1}{\rho_w} \frac{\partial P}{\partial x_l} - g'c \delta_{2k} \quad (3)$$

$$\frac{\partial c}{\partial t} + u_k \frac{\partial c}{\partial x_k} = \alpha \frac{\partial^2 c}{\partial x_k \partial x_k} + \frac{\partial}{\partial x_k} (\alpha_{SGS} \frac{\partial c}{\partial x_k}) + \nu_s \frac{\partial c}{\partial x_k} \delta_{2k} \quad (4)$$

$$\frac{\partial c_2}{\partial t} + u_k \frac{\partial c_2}{\partial x_k} = \alpha \frac{\partial^2 c_2}{\partial x_k \partial x_k} + \frac{\partial}{\partial x_k} (\alpha_{SGS} \frac{\partial c_2}{\partial x_k}) \quad (5)$$

باید توجه شود که برای سادگی معادلات، علامت خط روی کمیت‌های فیلتر شده حذف شده‌است و تمامی کمیت‌های موجود از نوع فیلتر شده هستند. در این شبیه‌سازی برای مشاهده بهتر پیشانی جریان چگال در مواجهه با جریان محیطی لایه‌بندی شده از دو معادله غلظت استفاده شده‌است. معادله (۴)، معادله غلظت مورد استفاده در جریان چگال اصلی است که دارای سرعت سقوط است، در صورتی که معادله (۵) معادله غلظت جریان محیطی لایه‌بندی شده می‌باشد که فاقد سرعت سقوط است. در این معادلات ν_w ، ρ_w و ν_s چگالی و ویسکوزیته سیال محیطی (آب) و سرعت سقوط ذرات، c و c_2 برابر غلظت جریان چگال و غلظت محیط پیرامون، δ_{2k} دلتای کرونیگر، α و α_{SGS} به ترتیب برابر ضریب نفوذ مولکولی و ضریب نفوذ زیر شبکه و S_{lk} برابر تانسور نرخ کرنش، می‌باشند.

در حالت اول سیال داخل کانال دارای چگالی ثابتی می‌باشد و چگالی آن با مکان تغییر نمی‌کند در نتیجه شرایط اولیه مسأله همگن خواهد بود. در حالت دوم مسأله، چگالی سیال محیط کانال توسط یک رابطه خطی با مکان تغییر می‌کند و محیط کانال را با چگالی‌های متفاوت لایه‌بندی می‌کند، بنابراین در این حالت چگالی مسأله دارای شرایط اولیه غیرهمگن می‌باشد، در حالی که شرایط اولیه برای پارامترهای سرعت و فشار همگن بوده و با تغییر مختصات مکانی ثابت هستند.

در مرحله بعدی مسأله محیط لایه‌بندی‌شده، ذرات به آن اضافه می‌شوند. برای جریان‌های حاوی ذره، فرض شده که همه ذرات دارای قطر یکسان و از جنس کائولن با چگالی $\rho_p = 2650 \text{ kg/m}^3$ هستند. برای همه شبیه‌سازی‌ها غلظت ورودی برابر $c = (\rho_m - \rho_w) / (\rho_{\max} - \rho_w) = 0.78$ است که در آن ρ_m چگالی متوسط مخلوط آب و ذرات در ورودی، ρ_w چگالی آب تمیز و ρ_{\max} حداکثر چگالی جریان است.

در همه شبیه‌سازی‌های عددی، عدد رینولدز، $Re = \sqrt{g'_0 h_1} \cdot h_1 / \nu$ ، g'_0 = جاذبه کاهش یافته اولیه، h_1 = ارتفاع بالا آمدن بلوک، ν = ویسکوزیته سینماتیک (آب) بزرگ‌تر از ۳۰۰۰ است که تضمین‌کننده آشفتگی بودن جریان می‌باشد [۱] و همچنین y^+ این مقاله در حدود یک می‌باشد.

۳- معادلات حاکم

روش شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ، توصیف دقیقی از حرکات جریان آشفتگی که دارای قسمت اعظم انرژی جریان می‌باشند (حرکات در مقیاس‌های طولی بزرگ‌تر)، ارائه می‌دهد. روش شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ، قادر به محاسبه کمیت‌های سه‌بعدی و ناپایا به طور لحظه‌ای می‌باشد که روش‌های میانگین‌گیری رینولدز معادلات ناویر استوکس^۱، قادر به چنین محاسباتی نیست [۳۲].

در این تحقیق از فیلتر جعبه‌ای سه‌بعدی یا فیلتر ریشه سوم حجم سلول (که معادل است با میانگین‌گیری روی حجم) استفاده شده‌است و همچنین برای تضمین جواب‌های بهتر کنار دیواره از تابع میرایی وندریست استفاده شده‌است [۳۳]. با توجه به معادله

1 Reynolds Averaged Navier-Stokes (RANS)

سقوط یکی از مهم‌ترین پارامترها در مدل‌سازی عددی است که انتخاب صحیح آن تأثیر زیادی بر مقدار به‌دست آمده برای بازده دارد. روابط زیادی برای به‌دست آوردن سرعت سقوط وجود دارند که مهم‌ترین آن‌ها رابطه استوکس است [۳۸]:

$$v_s = gd_p^2 \frac{\rho_p - \rho_w}{18\mu} \quad (10)$$

در این رابطه μ لزجت سیال است که تقریباً برابر لزجت آب در نظر گرفته و اثر ذرات بر آن نادیده گرفته می‌شود. d_p نیز قطر متوسط ذرات می‌باشد. با افزایش غلظت، بر هم کنش و برخورد ذرات افزایش می‌یابد و سرعت سقوط کاهش می‌یابد. بر این اساس رابطه متداولی که برخی منابع همچون لیو و گارسیا [۳۹] و تمایل و همکاران [۴۰] از آن استفاده کرده‌اند، رابطه نمایی دوگانه سرعت سقوط به صورت زیر می‌باشد:

$$v_s = V_0 [e^{-k_1(c-c_{min})} - e^{-k_2(c-c_{min})}] \quad (11)$$

در این تحقیق از این رابطه به منظور داشتن سرعت متغیر استفاده شده‌است. در این رابطه $C_{min} = 1.02$ ، $k_1 = 0.10565$ و $k_2 = 0.102$ و V_0 در اینجا برابر سرعت سقوط استوکس در نظر گرفته شده تا اثر قطر ذرات نیز در آن لحاظ شود. مزیت رابطه نمایی دوگانه این است که برخورد و بر هم کنش ذرات در غلظت‌های زیاد را در نظر می‌گیرد. ثوابت این رابطه با ذرات کائولن کالیبره شده‌اند [۳۸]. در این تحقیق چگالی به صورت خطی و با توجه به رابطه (۱۲) با غلظت تغییر می‌کند:

$$\rho = \rho_0 + \beta(c + c_2) \quad (12)$$

در این رابطه c ، c_2 و ρ_0 به ترتیب غلظت جریان چگال ورودی، غلظت محیط لایه‌بندی شده و چگالی اولیه سیال محیطی می‌باشند. در محیط‌های لایه‌ای خطی، اندازه نسبی لایه‌بندی برای جریان گرانشی رهاسازی توده را می‌توان با رابطه (۱۳) معرفی کرد [۲۳]:

$$S = \frac{\rho_B - \rho_{h0}}{\rho_{c0} - \rho_{h0}} \quad (13)$$

که در آن ρ_B = چگالی سیال در پایین مخزن، ρ_{c0} = چگالی اولیه جریان چگال و ρ_{h0} = چگالی سیال محیط در بالای سطح

همچنین جهت جاذبه در خلاف جهت y یا $z = 2$ می‌باشد. تفاوت چگالی بین دو مایع دلیل اصلی تحریک جریان‌های گرانشی می‌باشد. گرانش کاهش‌یافته اولیه g' برای توصیف این تفاوت می‌باشد که برابر $g' = \beta g$ است که در آن $\beta = (\rho - \rho_w) / \rho_w$ و همچنین $c = (\rho - \rho_w) / (\rho_{max} - \rho_w)$ و ρ چگالی جریان است. توجه کنید که در معادلات بالا از تقریب بوزینیسک برای غلظت استفاده شده‌است، چرا که در تمامی شبیه‌سازی‌های این تحقیق، سیال‌های سبک و سنگین به ترتیب آب، آب نمک و سیال حاوی ذرات هستند و اختلاف چگالی در آن‌ها کم هست. محققان دیگری نیز بارها این تقریب را در محاسبات خود به کار برده‌اند [۳۶-۳۴].

برای معادله مومنتوم (۳)، U_{SGS} از روش اسماگورینسکی دینامیک ارائه شده توسط روش لیلی [۳۷] محاسبه می‌شود. تنها معادله باقی‌مانده معادله غلظت (۴) و (۵) می‌باشد. مقدار عدد اشمیت مولکولی $Sc = \nu / \alpha$ برای آب نمک برابر ۷۰۰ می‌باشد، ولی بر اساس نتایج اوی و همکاران [۳۴] مقدار این پارامتر در صورتی که از مرتبه یک یا بالاتر انتخاب شود، تأثیر چندانی بر نتایج شبیه‌سازی ندارد (چون نفوذ آشفتگی حتی در عدد اشمیت برابر ۱ بسیار بیش‌تر از نفوذ مولکولی است) بنابراین در این معادله عدد اشمیت برابر ۱ در نظر گرفته می‌شود. تنها کمیت باقی‌مانده برای حل دستگاه معادلات، α_{SGS} است. از آنجا که قبلاً کمیت زیرشبکه α_{SGS} از طریق مدل اسماگورینسکی دینامیک محاسبه شده‌است، برای محاسبه α_{SGS} از تعریف عدد اشمیت زیرشبکه Sc_{SGS} ، به شکل زیر استفاده می‌شود [۳۲]:

$$\alpha_{SGS} = U_{SGS} / Sc_{SGS} \quad (6)$$

در اینجا برای دقت بیش‌تر در نتایج حل، از الگوریتم دینامیک رابطه (۷) برای یافتن عدد اشمیت زیرشبکه استفاده شده‌است [۲]:

$$Sc_{SGS} = 0.4 \exp(-2.5F_k) + 1 \quad (7)$$

که در آن‌ها مقادیر عدد فرود آشفتگی F_k و شناوری N از روابط زیر بدست می‌آیند [۲]:

$$F_k = \varepsilon / Nk \quad (8)$$

$$N = \sqrt{-g / \rho (\partial \rho / \partial z)^{1/2}} \quad (9)$$

که در آن k و ε به ترتیب انرژی و اتلاف آشفتگی می‌باشند. سرعت

جدول ۱: جزئیات تقسیم‌بندی و تعداد سلول‌ها در هر یک از شبکه‌بندی
Table 1. Grid details and the number of cells in each grid

تعداد کل سلول‌ها	تقسیم‌بندی در راستای z	تقسیم‌بندی در راستای y	تقسیم‌بندی در راستای x	
۱,۹۷۳,۶۷۶	۲۳	۷۸	۱۱۰۴	شبکه‌بندی ۱
۲,۳۹۵,۲۷۲	۲۴	۸۴	۱۱۹۲	شبکه‌بندی ۲
۳,۳۵۱,۰۲۴	۲۷	۹۴	۱۳۲۵	شبکه‌بندی ۳

آن در حال حرکت است تراکم بیش‌تری نسبت به سایر نواحی دورتر از کف کانال دارند. این توزیع ابعادی شبکه باعث افزایش دقت حل مسأله، افزایش سرعت محاسبات و کاهش زمان لازم برای شبیه‌سازی می‌شود. شبیه‌سازی عددی توسط نرم‌افزار به کمک سه شبکه با تراکم‌های متفاوت، به منظور بررسی میدان جریان و مراحل اختلاط به کار گرفته شده‌است.

برای رسیدن به شبکه‌بندی‌های یکنواخت در شبیه‌سازی مسأله، هندسه را به ۱۲ بلوک تقسیم کرده تا تغییر شیب بستر در یکنواختی مش‌بندی تأثیری نداشته باشد. تعداد کل سلول‌ها در جدول ۱ آمده است و همچنین در شکل ۲ می‌توان نمای نزدیک شبکه‌بندی هندسه کانال را به‌طور دقیق‌تر مشاهده کرد. به منظور بررسی استقلال از شبکه حل، نتایج شبیه‌سازی منحنی‌های سرعت بی‌بعد شده جریان چگال در محیط بدون لایه‌بندی دارای شیب بستر ۹ درجه، برای سه شبکه با تراکم‌های مختلف در شکل ۳ نشان داده شده‌است. به‌منظور بی‌بعدسازی منحنی‌ها، مقادیر سرعت و ارتفاع جریان را می‌توان با استفاده از سرعت و ارتفاع متوسط عمقی (به‌ترتیب $H = \left(\int_0^{\infty} u(y) dy \right)^2 / \int_0^{\infty} u(y)^2 dy$ و $U = \int_0^{\infty} u(y) dy / \int_0^{\infty} u(y) dy$) بی‌بعد کرد. در جدول ۲ خطای نتایج شبیه‌سازی منحنی سرعت بی‌بعد با شیب ۹ درجه در محیط بدون لایه‌بندی در مقایسه با داده‌های تجربی [۴۱] آورده شده‌است.

شکل ۳ نشان می‌دهد که نتایج منحنی‌های سرعت بی‌بعد در این سه شبکه‌بندی به یکدیگر بسیار نزدیک هستند و احتمالاً با افزایش بیش‌تر تراکم شبکه‌بندی، نتایج تغییر چندانی نمی‌کند. با توجه به این نکته که در محاسبات پایا در روش ال. ای. اس، با توجه به ماهیت ناپایایی کلی این روش، زمان لازم برای رسیدن جریان به

شیب‌دار می‌باشد. K پارامتر مهمی است برای تعیین بوجود آمدن یک نفوذ افقی در جریان گرانشی، $K > 1$ نشان می‌دهد که جریان از سطح شیب‌دار جدا و سپس به صورت افقی وارد سیال محیطی می‌شود، در حالی که $K < 1$ به معنای این است که جریان در امتداد سطح شیب‌دار به سمت پایان حرکت می‌کند [۱].

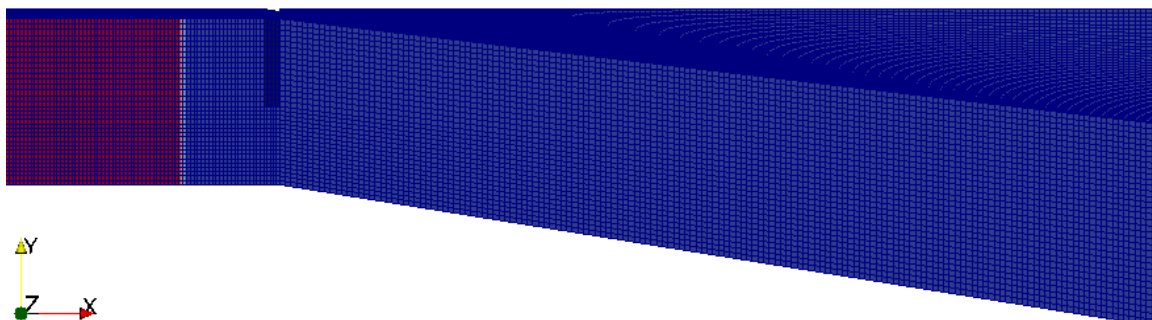
به منظور بررسی رسوب‌گذاری در جریان گل‌آلود، منحنی رسوب ذرات رسم می‌شود. منحنی رسوب معیاری است برای رفتار رسوب‌گذاری جریان حاوی ذره، زیرا با توجه به اینکه در جریان ورودی همه ذرات معلق هستند، روند کاهشی این منحنی در مقاطع مختلف کانال و در محیط لایه‌بندی شده به معنی کاهش رسوب ذرات در طی بستر است، بدین ترتیب می‌توان با محاسبه منحنی رسوب در هر مقطع کانال و مقایسه با مقدار آن در ورودی، به بررسی رفتار رسوب‌گذاری جریان پرداخت. برای بررسی منحنی رسوب ذرات در جریان از فرمول (۱۴) استفاده شده‌است [۲]:

$$Q_s(x) = \int_0^{\infty} C_w(x, t) v_s dt \quad (14)$$

در این رابطه C_w غلظت جریان چگال بر روی دیواره است.

۴- بررسی استقلال از شبکه حل

برای شبکه‌بندی فضای هندسی از یک شبکه سازمان یافته استفاده شده‌است. حرکت جریان در راستای (x) ، عمق کانال در راستای (z) و راستای (y) عمود بر جریان می‌باشد. تقسیم‌بندی‌ها در راستای این سه محور مختصات طوری انتخاب شده‌است که شبکه‌بندی به صورت یکنواختی صورت بگیرد. در راستای عمود بر جریان (y) ، سلول‌ها در نزدیکی کف کانال و همچنین در محدوده‌ای که جریان چگال غالباً در



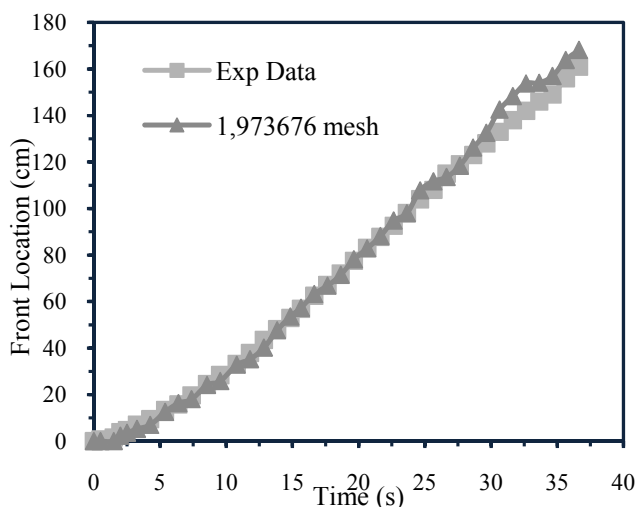
شکل ۲: نمای نزدیک شبکه بندی ۱ در هندسه کانال

Fig. 2. Close view of the grid 1

جدول ۲: خطای نتایج شبیه سازی منحنی سرعت بی بعد با شیب ۹ درجه در محیط بدون لایه بندی

Table 2. Error of the numerical simulations for velocity profiles for the flow in non-stratified environment in 9° slope

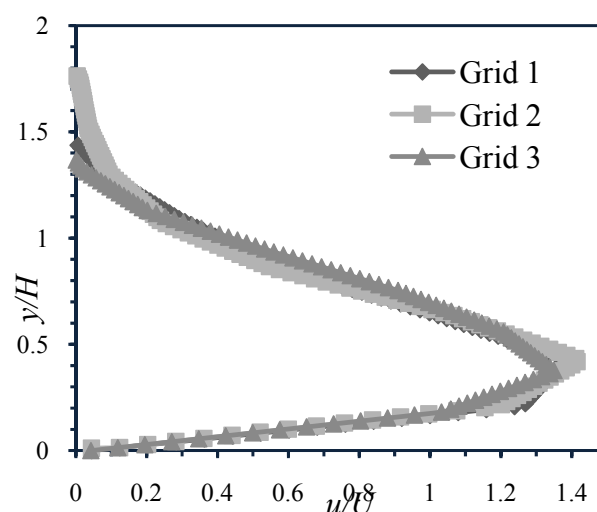
شبکه بندی ۳	شبکه بندی ۲	شبکه بندی ۱	خطای بیشینه سرعت
٪ ۰/۳۳	٪ ۲/۸۹	٪ ۱/۸۹	



شکل ۴: مقایسه نتایج شبیه سازی عددی و داده های تجربی برای مکان پیشانی جریان چگال روی کانال با شیب بستر ۹ درجه در محیط بدون لایه بندی

Fig. 4. The comparison of the numerical simulations and the experimental results for the head position of density current flowing over the 9 degree bed slope in non-stratified environment

عددی تطابق خوبی با داده های تجربی هی و همکاران [۱] دارد و خطای متوسط ایجاد شده در زمان شبیه سازی برای نمودار مکان پیشانی جریان در شبکه بندی اول با تعداد مش ۱,۹۷۳,۶۷۶ برابر ۴/۵۶۸ درصد می باشند. این بدان معناست که هندسه و اطلاعات



شکل ۳: منحنی های سرعت برای سه شبکه بندی در جریان بدون لایه بندی با شیب ۹ درجه.

Fig. 3. Velocity profiles for three different grids for the flow in non-stratified environment in 9° slope

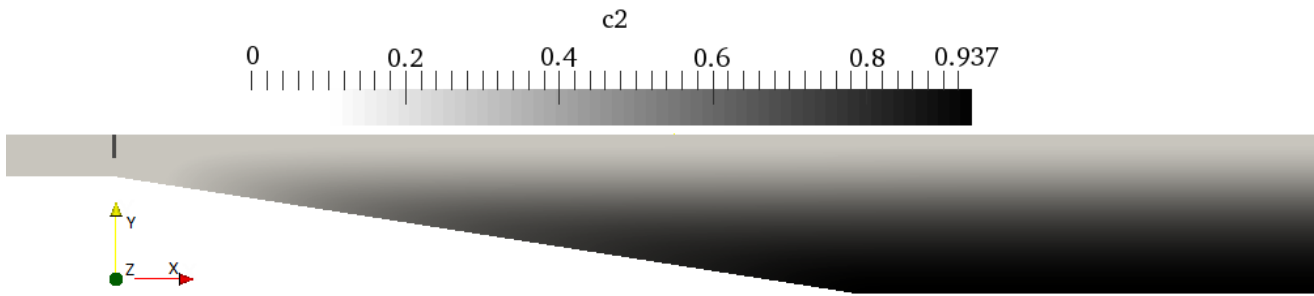
حالت شبه پایا خیلی بالاست [۱]. بنابراین شبکه بندی اول، به دلیل صرفه جویی در زمان محاسباتی، می تواند انتخاب مناسبی برای این شبیه سازی باشد.

۵- اعتبارسنجی مدل عددی

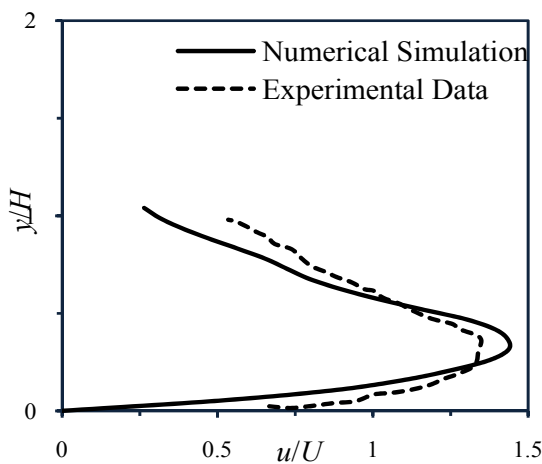
۵-۱- بررسی اعتبارسنجی نتایج محیط بدون لایه بندی

برای اعتبارسنجی نتایج این مدل عددی، ابتدا مسأله برای جریان چگال داخل کانال دارای سطح شیب دار با شیب ۹ درجه و جریان بدون لایه بندی چگالی حل شده و منحنی مکان پیشانی جریان چگال شبیه سازی شده با نتایج آزمایش های هی و همکاران [۱] مقایسه شده است (مطابق شکل ۴).

همان طور که در شکل ۴ مشخص است نتایج حاصل از شبیه سازی

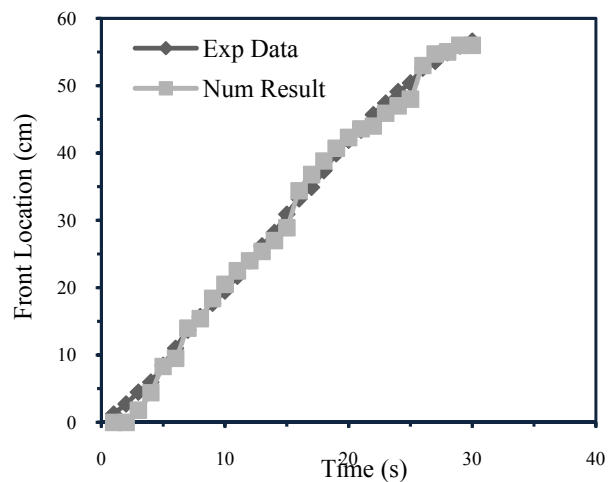


شکل ۵: کانال شبیه‌سازی شده در محیط لایه‌بندی شده با چگالی‌های متفاوت
 Fig. 5. The channel used for the simulation in stratified environment



شکل ۷: مقایسه نتایج شبیه‌سازی عددی و داده‌های تجربی [۴۱] برای منحنی‌های بی‌بعد سرعت در شیب ۹ درجه و محیط بدون لایه‌بندی

Fig. 7. Comparison of the non-dimensional velocity profiles in the experimental results [41] and the numerical simulations for the flow on 9 degree bed slope and stratified environment



شکل ۶: مقایسه مکان پیشانی جریان در داده‌های آزمایشگاهی هی و همکاران [۱] و نتایج حاصل از شبیه‌سازی عددی سطح دارای شیب ۹ درجه و محیط لایه‌بندی شده

Fig. 6. Comparison of the head position in the experimental results [1] and the numerical simulations for the flow on 9 degree bed slope and stratified environment

وروردی در شبیه‌سازی عددی در حد قابل قبولی صحیح بوده است.

۲-۵- بررسی اعتبارسنجی نتایج محیط لایه‌بندی شده

در ادامه برای اعتبارسنجی نتایج به‌دست آمده در محیط دارای لایه‌بندی چگالی داخل کانال با شیب ۹ درجه، منحنی مکان پیشانی جریان چگال شبیه‌سازی شده با نتایج آزمایش‌های هی و همکاران [۱] مقایسه شده‌است. به منظور ایجاد محیط لایه‌بندی شده توسط غلظت‌های متفاوت، چگالی سیال محیطی به صورت خطی و توسط رابطه (۱۲) تغییر داده شده‌است. به طوری که چگالی لایه‌ها از بالا به سمت کف کانال افزایش می‌یابد (مطابق شکل ۵). در شکل ۶ مقایسه‌ای بین نتایج تجربی هی و همکاران [۱] و عددی مکان

پیشانی جریان در محیط لایه‌بندی شده انجام شده‌است. در شکل ۶ خطای متوسط ایجاد شده برای مکان پیشانی جریان در شبیه‌سازی عددی و داده‌های تجربی برابر ۳/۲۳ درصد می‌باشد. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که اطلاعات وارده در شبیه‌سازی عددی تطابق قابل قبولی با نتایج تجربی هی و همکاران [۱] دارند. با توجه به شکل ۶، می‌توان مشاهده کرد، جدایش جریان چگال از سطح کانال در شبیه‌سازی عددی در ثانیه ۲۹ و در نتایج تجربی هی و همکاران [۱] در ثانیه ۳۰ شروع شده‌است، که مبنی بر اعتبار شبیه‌سازی می‌باشد در ادامه برای اعتبارسنجی نتایج این مدل عددی، مسأله برای جریان چگال حاوی ذره و برای کانال با شیب ۹ درجه حل شده و منحنی‌های بی‌بعد سرعت شبیه‌سازی شده با نتایج آزمایش‌های گارسیا [۴۱] مقایسه شده‌است. شکل ۷ نتایج منحنی سرعت حل

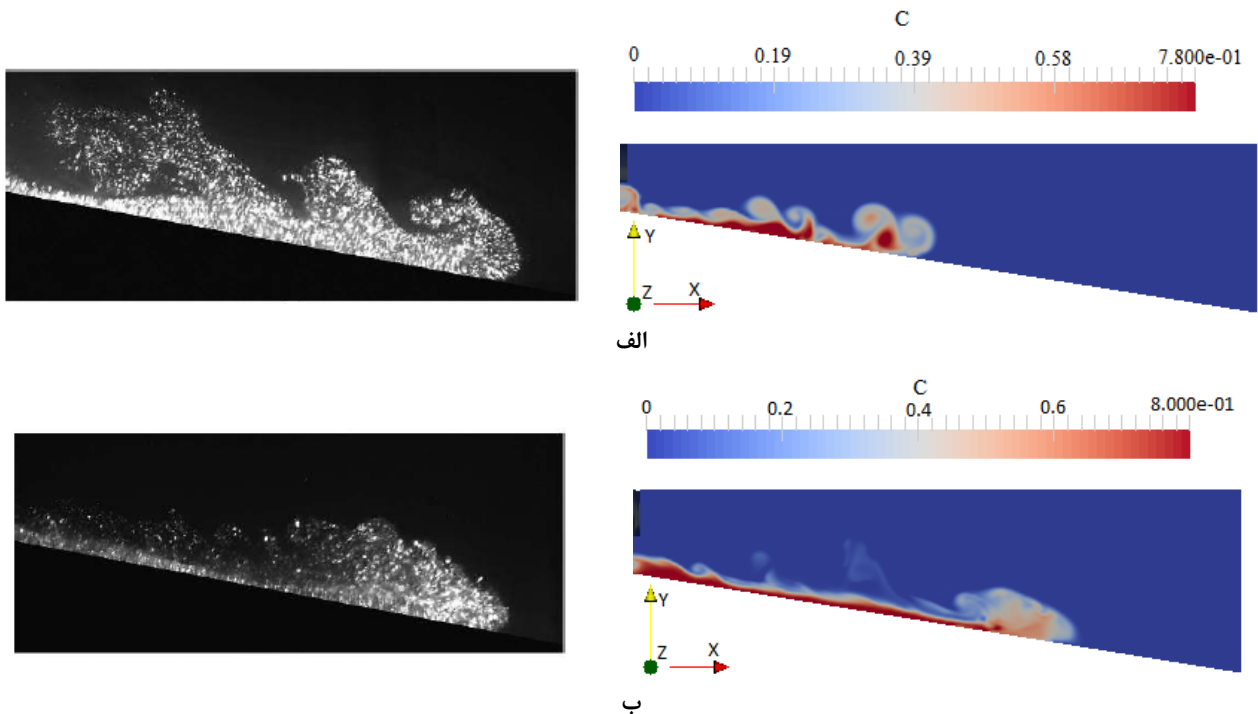
سرعت در سطح جریان دو محیط ایجاد می‌شود. تفاوت موارد (الف) و (ب) در شکل ۸ این است که جریان در محیط لایه‌بندی شده دارای سه گردابه اصلی است که اندازه آن‌ها، بسیار بزرگ‌تر از اندازه آن‌ها در محیط یکنواخت است.

در محیط‌های لایه‌بندی شده، هنگامی که جریان گرانشی شکل می‌گیرد، ناپایداری کلون-هلمولتز ظاهر شده و توسعه می‌یابد. سپس به یک ساختار آشفته تبدیل می‌شود، که به این معنی می‌باشد که تنش برشی ناشی از تغییر سرعت به اندازه کافی بزرگ است که بتواند لایه‌بندی مایع محیطی را از بین ببرد. این فرایند در پایین آمدن جریان گرانشی روی سطح شیب‌دار هم اتفاق می‌افتد. ناپایداری کلون-هلمولتز و ساختارهای آشفتگی گسترش می‌یابند، در نتیجه اختلاط اصلی میان جریان و مایع محیط افزایش می‌یابد. برای جریان‌های گرانشی در محیط یکنواخت، ناپایداری‌ها به دلیل سرعت بیشتر، بزرگ‌تر هستند. در نتیجه، ساختار آشفتگی به سرعت شکل گرفته و هیچ گردابه‌ای با اندازه بزرگ در آن مشاهده نمی‌شود. در مقایسه با جریان‌های گرانشی در محیط یکنواخت، اختلاط آشفتگی جریان‌های گرانشی در محیط‌های لایه‌بندی شده به‌طور کلی کاهش می‌یابد.

عددی را در کنار نتایج تجربی نشان می‌دهد.

همانطور که از شکل ۷ مشخص است، تطابق خوبی بین نتایج این مدل‌سازی و داده‌های تجربی وجود دارد. در این شکل اختلاف بیشینه سرعت بی‌بعد در شبیه‌سازی عددی و داده‌های تجربی برابر $6/2\%$ است. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که داده‌های بی‌بعد شده سرعت تطابق مطلوبی دارند. در جریان چگال، سرعت بر روی بستر بر اساس اصل عدم لغزش روی دیواره، صفر است که با شیب تند 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.

در شکل ۸ مقایسه‌ای بین شکل پیشانی جریان در پژوهش حاضر و نتایج آزمایشگاهی هی و همکاران [۱] (قسمت الف) برای محیط لایه‌بندی و قسمت (ب) بدون لایه‌بندی انجام شده است. همانطور که مشاهده می‌شود شبیه‌سازی عددی پژوهش حاضر، گردابه‌های کلون-هلمولتز تشکیل شده در پیشانی و پشت پیشانی را به خوبی نمایش می‌دهد؛ که تا حد زیادی مشابه نتایج آزمایشگاهی است. با توجه به اینکه، ناپایداری‌های کلون-هلمولتز توسط تنش برشی ناشی از تغییر



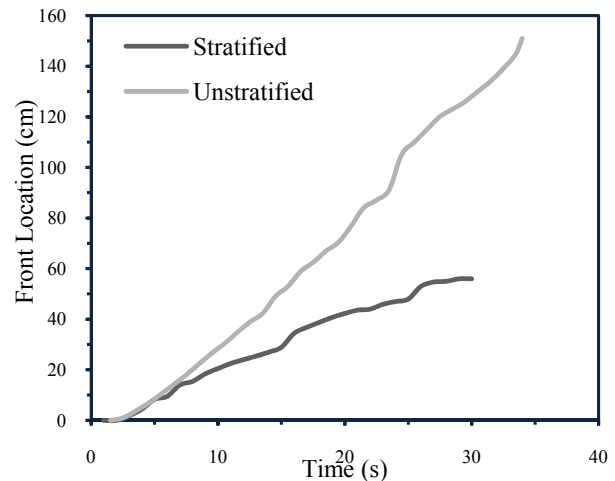
شکل ۸: نمونه‌ای از تصاویر جریان چگال با شیب سطح ۹ درجه در ثانیه ۱۴. الف) محیط لایه‌بندی شده، ب) محیط بدون لایه‌بندی. تصاویر شبیه‌سازی عددی در سمت راست و تصاویر حاصل از آزمایش‌های تجربی [۱] در سمت چپ

Fig. 8. Samples of density current moving on the 9 degree bed at 14s. a) Stratified environment, b) Non-stratified environment. Right pictures are numerical results and the left ones are the experimental results [1]

نیروی شناوری و وزن است، زمانی که جریان چگال به لایه‌هایی وارد می‌گردد که هم چگالی با خود جریان است، این ترم به صفر میل می‌کند و جریان به دلیل مومنتوم و سرعت خود، مقداری به لایه‌هایی با چگالی بیش‌تر فرو می‌رود تا جایی که ترم $(-\beta Cg)$ تغییر علامت داده و به جریان چگال نیروی شناوری و به سمت بالا وارد می‌کند تا جایی که جریان از سطح شیب‌دار جدا شده و در خط افقی و همتراز چگالی حرکت می‌کند. ضمناً به علت غلظت یکسان امکان نمایش و تفکیک پیشانی جریان با سیال مجاور و جدایش، در شبیه‌سازی عددی به صورت واضح و دقیق وجود ندارد. برای بر طرف نمودن این مشکل و نمایش دقیق پیشانی جریان چگال و نحوه جدایش آن، در مطالعه حاضر دو معادله غلظت حل شده‌است. که یک معادله غلظت ناشی از ورود جریان اصلی است و دیگری به علت حضور لایه‌بندی محیط. با این روش در پس‌پردازش نتایج می‌توان غلظت ناشی از جریان ورودی و لایه‌بندی موجود در مسأله را جداگانه مشاهده کرد و تأثیر متقابل آن‌ها را بررسی نمود.

در ادامه برای بدست آوردن منحنی رسوب، ۱۲ مقطع در راستای طول سطح شیب‌دار ۹ درجه در نظر گرفته شده‌است و مقدار غلظت جریان چگال در فاصله ۰/۵ سانتی‌متر از کف و در تمام زمان‌های شبیه‌سازی شده عددی بدست آمده‌است. با توجه به رابطه (۱۴) نمودارهای شکل ۱۱ حاصل می‌گردد. در شکل ۱۱ تأثیر محیط لایه‌بندی‌شده بر روی رسوب‌گذاری ذرات بررسی شده‌است. با مشاهده نمودار می‌توان دریافت، محیط لایه‌بندی در رسوب ذرات تأثیر به‌سزایی نداشته‌است. ایجاد محیط لایه‌بندی شده باعث افزایش نیروی شناوری شده و در نتیجه این امر کاهش رسوب‌گذاری را به دنبال دارد در صورتی که با توجه به نتایج به‌دست آمده، وجود لایه‌بندی در محیط موجب کاهش سرعت پیشانی جریان شده، بنابراین ذرات فرصت بیشتری برای رسوب‌گذاری خواهند داشت. تقابل این دو روند باعث ایجاد رفتار نامنظم نمودارها شده‌است. اما با توجه به اینکه در محیط لایه‌بندی جدایش جریان رخ می‌دهد (در محدوده $X \leq 0.54 \text{ m}$) رسوب و ته‌نشینی ذرات بعد از جدایش کاهش می‌یابد.

برای بررسی تأثیر قطر ذرات بر روی رفتار جریان و ویژگی‌های رسوب‌گذاری، جریان حاوی ذرات با قطرهای ۱۲ میکرون، ۲۰ میکرون و ۳۰ میکرون، مورد بررسی قرار گرفته‌است. در مرحله اول، مکان پیشانی جریان چگال در محیط لایه‌بندی شده و هندسه دارای

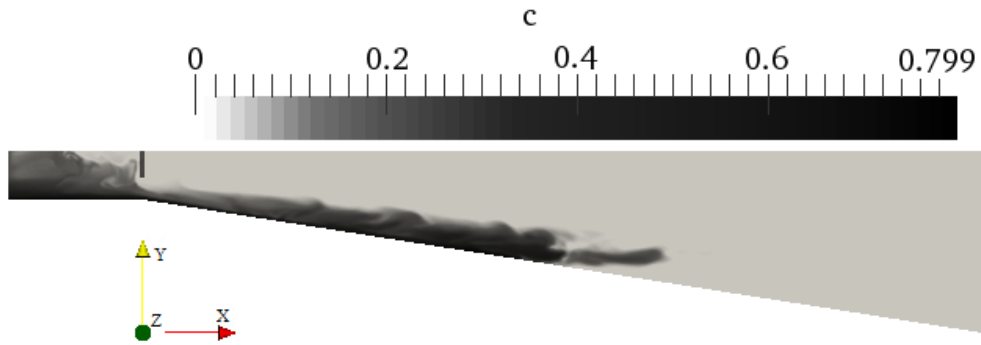


شکل ۹: نمودارهای مکان پیشانی جریان چگال در حالت‌های لایه‌بندی شده و بدون لایه‌بندی در شیب ۹ درجه
Fig. 9. Head position of gravity current in stratified and non-stratified surrounding for 9 degree bed slope

پس از اعتبارسنجی نتایج به‌دست آمده به روش اویلری-اویلری، به بررسی تغییر پارامترهای مورد نظر، مقایسه محیط لایه‌بندی شده و بدون لایه‌بندی، افزودن ذرات به مسأله، تغییر ابعاد و تعیین سرعت سقوط متغیر ذرات با غلظت روی جریان چگال پرداخته خواهد شد.

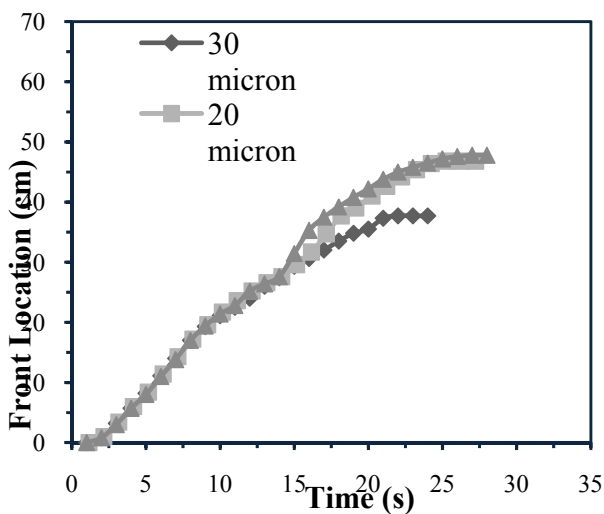
۶- نتایج شبیه‌سازی عددی

در شکل ۹ مقایسه محل پیشانی جریان بین حالت محیط لایه‌بندی شده و محیط بدون لایه‌بندی را نشان می‌دهد. نتایج نشان می‌دهد، در محدوده جدایش جریان (در ثانیه ۳۰) مکان پیشانی جریان در محیط لایه‌بندی شده نسبت به حالت بدون لایه‌بندی ۵۷ درصد کاهش دارد، بنابراین می‌توان دریافت سرعت پیشروی جریان در محیط بدون لایه‌بندی بیش‌تر از جریان در محیط لایه‌بندی شده‌است. حضور لایه‌بندی باعث کم شدن اختلاف چگالی جریان با محیط شده و نیروی محرک جریان را کاهش می‌دهد؛ بنابراین جریان کندتر خواهد شد. شکل ۱۰ جریان چگال شبیه‌سازی شده را در زمان جدایش جریان چگال از کف کانال در ثانیه ۵۰ نشان می‌دهد. جریان چگال زمانی که به لایه‌ای با غلظت برابر با خود، وارد می‌شود، به علت عدم وجود اختلاف چگالی و خنثی شدن نیروی وزن، از سطح شیب‌دار جدا شده و به صورت افقی به حرکت خود ادامه می‌دهد. در واقع جریان چگال، متناسب با ترم $(-\beta Cg)$ که در معادلات مومنتوم ظاهر شده‌است، به علت اختلاف چگالی تحت برهم کنش



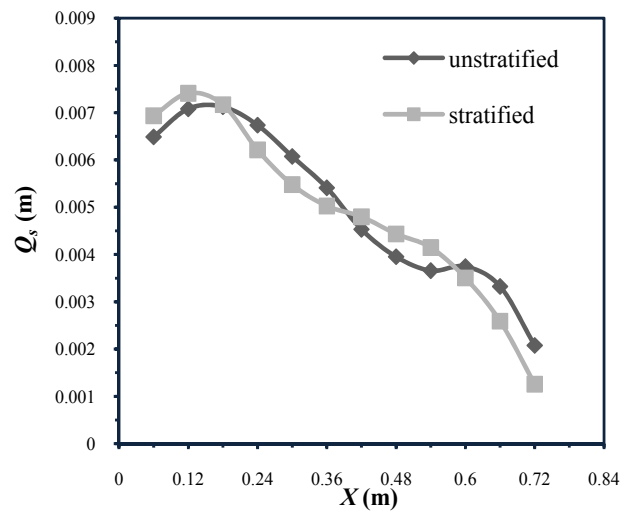
شکل ۱۰: نمای نزدیک جدایش جریان چگال از سطح کانال در محیط لایه‌بندی شده در ثانیه ۵۰

Fig. 10. Close view of the flow separation from channel bed at 50s



شکل ۱۲: مکان پیشانی جریان چگال حاوی ذره با قطر ۱۲ میکرون، ۲۰ میکرون و ۳۰ میکرون، در محیط لایه‌بندی شده در شیب ۹ درجه

Fig. 12. Head position of the particle laden flow for different particle diameters 12, 20 and 30 micron in stratified environment on 9 degree sloping bed



شکل ۱۱: مقایسه منحنی‌های رسوب برای جریان حاوی ذره ۲۰ میکرون، در محیط لایه‌بندی شده و بدون لایه‌بندی

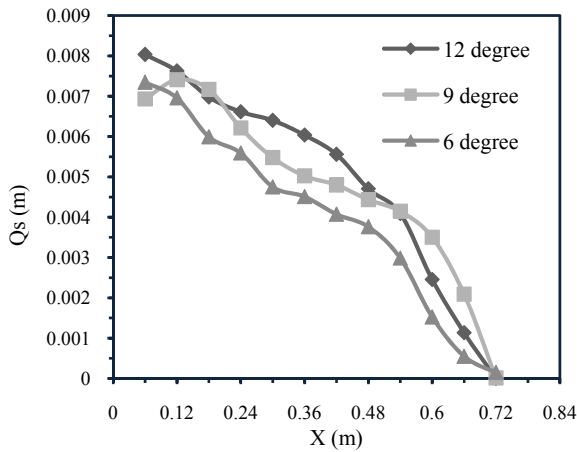
Fig. 11. The comparison of the deposition profile for particle laden flow containing 20 micron particles in stratified and non-stratified environment

چگالی با محیط می‌باشد زودتر از دست داده و در نتیجه هد جریان عقب‌تر مانده و جدایش آن در حدود ۳ ثانیه زودتر از حالات ذرات با قطر ۱۲ و ۲۰ میکرون، اتفاق افتاده‌است. رفتار ذرات با قطر ۱۲ و ۲۰ میکرون به صورتی است که مسیر بیشتری را، به دلیل استهلاک دیرتر نیروی محرکه جریان، در محیط لایه‌بندی طی کرده‌اند.

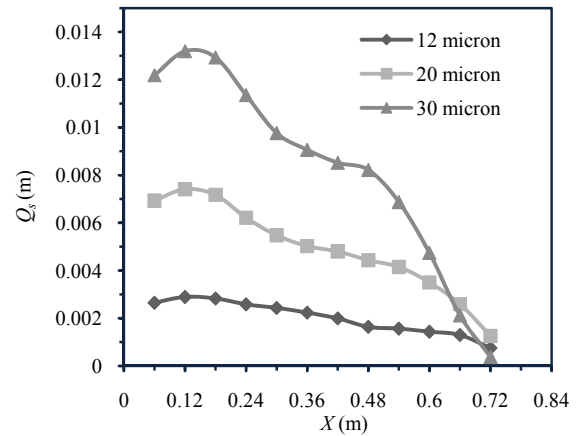
در شکل ۱۳ به تأثیر قطر ذرات، در رفتار رسوب‌گذاری جریان گل‌آلود پرداخته شده‌است. برای بدست آوردن منحنی رسوب ذرات در جریان با توجه به رابطه (۱۴)، در حالت اول مسأله سرعت سقوط ذرات ثابت در نظر گرفته شده‌است و مقدار آن از رابطه (۱۰) به دست می‌آید. مقدار سرعت استوکس در حالتی که جریان، حاوی ذرات با قطر ۱۲ میکرون هستند برابر 0.000129 m/s و در حالت‌هایی که

شیب ثابت برای هر سه نوع توده ذرات مورد مقایسه قرار گرفته‌است (شکل ۱۲).

با توجه به شکل ۱۲، می‌توان دریافت در محیط یکنواخت و قبل از رسیدن به محیط لایه‌بندی شده، نتایج برای هر سه قطر روند مشابهی را دنبال کرده ولی با ورود به ناحیه لایه‌بندی شده این روند تغییر کرده‌است. همان‌طور که در کارهای پیشین دیده شد، سرعت سقوط استوکس برای ذرات ریز (تا ۱۲ میکرون) نتایج قابل قبولی داشته در صورتی که با افزایش قطر ذرات، عدد رینولدز بالا رفته و در نتیجه اختلاف نتایج مدل‌سازی نیز افزایش می‌یابد [۴۲]. همچنین می‌توان مشاهده کرد ذرات با قطر ۳۰ میکرون به علت سنگینی ذرات زودتر در جریان رسوب کرده و نیروی محرکه خود را که ناشی از اختلاف



شکل ۱۴: منحنی رسوب جریان حاوی ذره با قطر ۲۰ میکرون در هندسه‌های با شیب سطح ۶، ۹ و ۱۲ درجه در محیط لایه‌بندی شده
Fig. 14. Deposition profiles for the flow containing 20 micron particles and different bed slopes



شکل ۱۳: منحنی‌های رسوب برای جریان حاوی ذره، برای ذرات با قطر ۱۲ میکرون، ۲۰ میکرون و ۳۰ میکرون
Fig. 13. Deposition profiles for particle laden flow and 12, 20 and 30 micron particle diameter

به شکل ۱۴، روند منظمی را دنبال نمی‌کند، اما به صورت متوسط می‌توان گفت که با افزایش شیب سطح کانال، مؤلفه عمودی نیروی اینرسی جریان ($F \sin \theta$) تقویت شده، بنابراین میزان رسوب‌گذاری افزایش می‌یابد. این حالت زمانی صحت دارد که زاویه سطح کانال کم‌تر از ۴۵ درجه است و مؤلفه عمودی اینرسی، نیروی غالب جریان است. در محدوده قبل جدایش جریان ($X=0/36$)، شیب ۱۲ درجه باعث افزایش رسوب‌گذاری ۱۵ و ۴۰ درصدی نسبت به شیب‌های ۹ و ۶ درجه شده‌است. همچنین می‌توان مشاهده کرد که هرچه زاویه سطح افزایش می‌یابد به دلیل مومنتوم افزایش یافته، جریان چگال سریع‌تر به لایه هم‌چگالی خود می‌رسد، بنابراین جدایش جریان از سطح کانال با افزایش شیب سطح سریع‌تر رخ می‌دهد. با بررسی این نمودار می‌توان دریافت که تا قبل از اینکه جریان تحت تأثیر جدایش قرار بگیرد، یک رابطه مشخص بین میزان رسوب و شیب سطح وجود دارد اما با نزدیک شدن به محدوده جدایش، به علت تغییر در توازن نیروها، روند عادی رسوب که با میزان شیب تغییر معناداری دارد، صادق نیست.

در شکل ۱۵ جریان حاوی ذره ۲۰ میکرون، در محیط لایه‌بندی شده، در حالتی که سرعت سقوط ذرات با غلظت محیط، متغیر است با حالتی که سرعت سقوط ذرات برابر سرعت ثابت استوکس بوده، مقایسه شده است.

با مشاهده شکل ۱۵ مشخص شده‌است که نمودارها در غلظت یکنواخت اولیه کانال، نتایج سرعت سقوط متغیر و سرعت ثابت با هم مطابقت دارند، اما زمانی که جریان بیش‌تر جلو رود و از حالت

جریان، حاوی ذرات با قطر ۲۰ و ۳۰ میکرون هستند، به ترتیب برابر $0/000359$ m/s و $0/000808$ m/s است.

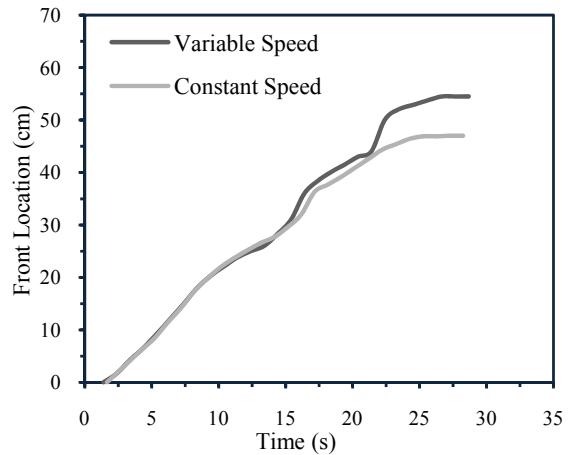
همانگونه که شکل ۱۳ نشان می‌دهد، ذرات معلق متناسب با سرعت سقوط استوکس، که خود حاصل برآیند نیروی وزن (و شناوری) و نیروی پسای ناشی از سیال پیرامون آن است (باید توجه شود که در حالت سرعت سقوط ثابت، اثر متقابل ذرات با یکدیگر در مدل‌سازی وارد نمی‌شود)، با گذشت زمان ته‌نشین می‌شوند. ذرات بزرگ‌تر به علت وزن بیشتر، با سرعت بیشتری سقوط می‌کنند. میزان رسوب در جریان گل‌آلود در محدوده شروع جدایش، که حاوی ذرات با قطر ۳۰ میکرون هستند، نسبت به ذرات ۲۰ و ۱۰ میکرون به ترتیب ۰/۷۵ و ۳/۷ برابر شده‌است. با توجه به افزایش میزان رسوب جریان با افزایش قطر ذرات، نیروی محرک جریان که حاصل از اختلاف چگالی ناشی از حضور ذرات معلق است، کاهش می‌یابد. بنابراین جریان حاوی ذرات بزرگ‌تر در مقایسه با جریان حاوی ذرات کوچک‌تر، سریع‌تر مستهلک می‌شوند. در نتیجه جریان حاوی ذرات با قطر ۳۰ میکرون، زودتر از حالات دیگر از سطح کانال جدا شده و در نتیجه مقدار رسوب ذرات به صفر می‌رسد.

برای بررسی تأثیر شیب کانال در رسوب‌گذاری ذرات، جریان حاوی ذرات با قطر ۲۰ میکرون را در سه شیب ۶، ۹ و ۱۲ درجه در محیط لایه‌بندی شده شبیه‌سازی شده‌است و در شکل ۱۴ مورد مقایسه قرار گرفته‌اند.

با توجه به آشفتگی موجود در جریان، منحنی‌های رسوب، با توجه

و دارای سرعت سقوط متغیر با غلظت محیط، بر روی شیب ۹ درجه در محیط لایه‌بندی شده، از رابطه (۱۱) استفاده شده‌است که در آن سرعت استوکس ذره ۲۰ میکرون، به عنوان سرعت ثابت در این رابطه در نظر گرفته شده‌است (شکل ۱۶). همچنین، به منظور بررسی تأثیر برهم‌کنش ذرات روی هم در روند رسوب‌گذاری جریان، در حالت‌های سرعت سقوط ثابت و متغیر، منحنی‌های رسوب جریان در شکل ۱۶ با یکدیگر مقایسه شده‌اند.

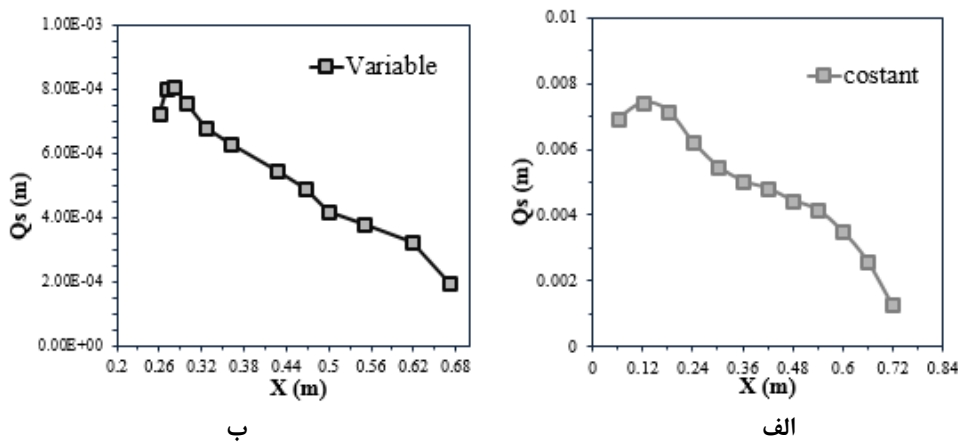
همان‌طور که از شکل ۱۶ مشخص است، با حرکت در مسیر سطح شیب‌دار میزان رسوب‌گذاری ذرات، به دلیل نفوذ ذرات در محیط پیرامون و اختلاط جریان کاهش یافته‌است. با مقایسه الگوی رسوب سرعت سقوط متغیر (شکل ۱۶(ب)) می‌توان مطابقت آن را با الگوی منحنی رسوب در حالت سرعت سقوط ثابت استوکس (شکل ۱۶(الف)) را مشاهده کرد. با توجه به نتایج شکل ۱۶ (ب) مشخص می‌شود، جریان با سرعت سقوط متغیر با غلظت جریان، دارای رسوب بسیار کم‌تری نسبت به حالت جریان دارای سرعت سقوط ثابت استوکس می‌باشد. با متغیر در نظر گرفتن سرعت سقوط ذرات، جریان چگال‌تر شده و شرط برهم‌کنش ذرات روی هم، در جریان اعمال می‌شود و در نتیجه، نیروی محرک جریان چگال افزایش می‌یابد. این نیروی محرک باعث شده تا ذرات بسیار کم‌تری در بستر کانال رسوب کرده (حدود ۹۰ درصد کاهش رسوب‌گذاری) و جریان تا مسافت بیش‌تری پیش‌روی کند. در این حالت جدایش جریان از سطح به تعویق می‌افتد. باید توجه کرد که شبیه‌سازی جریان چگال در حالت سرعت سقوط متغیر و اعمال



شکل ۱۵: نمودار مکان پیشانی جریان چگال حاوی ذره ۲۰ میکرون در حالت سرعت سقوط ثابت و سرعت سقوط متغیر ذرات با غلظت در محیط لایه‌بندی شده چگالی

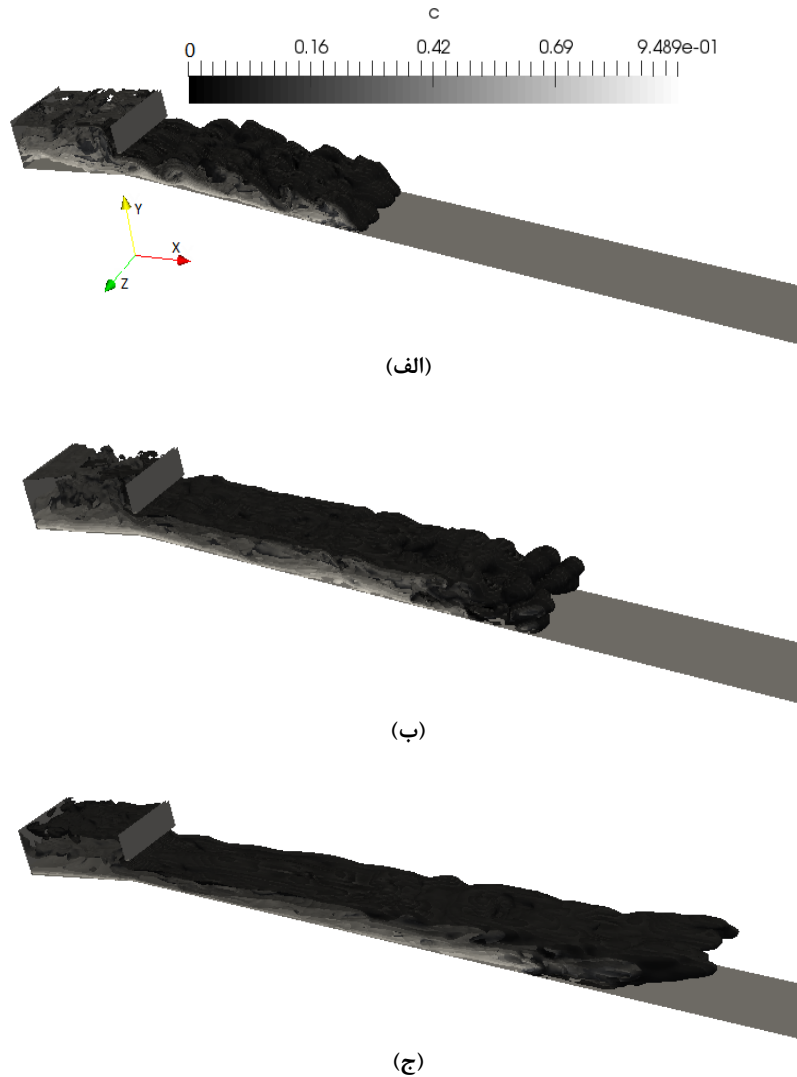
Fig. 15. Head position for turbidity current containing 20 micron particles; constant and variable settling velocity and stratified environment

یکنواخت اولیه فاصله می‌گیرد، نتایج سرعت ثابت و متغیر از یکدیگر فاصله گرفته‌اند. به دلیل متغیر بودن سرعت سقوط ذرات، اثر متقابل ذرات با یکدیگر در مدل‌سازی وارد شده‌است و به همین دلیل سرعت جابه‌جایی مکان پیشانی جریان بیش‌تر از حالتی می‌باشد که سرعت سقوط ثابت است. در حالت سرعت متغیر مکان جدایش جریان ۲۲ درصد افزایش یافته‌است. همچنین در این حالت جدایش جریان از سطح، به میزان ۲/۵ ثانیه دیرتر اتفاق می‌افتد، زیرا جریان نیروی محرک بیش‌تری دارد. برای یافتن الگوی رسوب جریان حاوی ذره با قطر ۲۰ میکرون



شکل ۱۶: منحنی‌های رسوب برای ذرات با قطر ۲۰ میکرون الف) در حالت سرعت سقوط ثابت ب) در حالت سرعت سقوط متغیر

Fig. 16. Deposition profiles for the flow containing 20 micron particles a) constant and b) variable settling velocity



شکل ۱۷: کانتورهای چگالی برای جریان چگال حاوی ذره ۲۰ میکرون در حالت سرعت سقوط متغیر در محیط لایه‌بندی شده در ثانیه‌های (الف) ۲۰ (ب) ۳۰ (ج) ۷۰

Fig. 17. Iso-density contours of the flow containing 20 micron particles and stratified surrounding at a) 20, b) 30 and c) 70 seconds

۱. در قسمت اول به مقایسه جریان لایه‌بندی شده و جریان بدون لایه‌بندی پرداخته شد. نتایج این پژوهش نشان داد که، در محیط لایه‌بندی نشده، جریان‌های چگال سریع‌تر حرکت می‌کنند و سرعت پیشانی سریع‌تر به مقدار بیشینه خود رسیده و سپس کمی کاهش می‌یابد. برای جریان‌های گرانشی در محیط لایه‌بندی شده، g' محیط لایه‌بندی شده می‌تواند کاهش قابل توجهی، یعنی همان کاهش نیروی محرک، را به دنبال داشته باشد.

۲. چندین شبیه‌سازی جریان چگال در محیط لایه‌ای و شیب‌دار انجام شده که نشان می‌دهند: اگر جریان اصلی سبک‌تر از چگالی لایه‌های پایین دست باشد، جریان چگال در امتداد سطح

تأثیر ذرات روی هم، به دلیل بیش‌ترین تطابق با رفتار ذرات در طبیعت، دارای کاربرد زیادی در بررسی‌های جریان چگال خواهد داشت. برای نمایش دقیق‌تر جدایش جریان از سطح در محیط لایه‌بندی شده و مشخصات آشفستگی جریان، از کانتورهای غلظت در حالت سه‌بعدی در نرم‌افزار کمک گرفته شده‌است که در شکل ۱۷ مشاهده می‌شود.

۷- نتیجه‌گیری

هدف از پژوهش حاضر همان‌طور که پیش از این توضیح داده شد، بررسی و پیش‌بینی رفتار رسوب‌گذاری جریان گل‌آلود رهاسازی در کانال شیب‌دار و دارای محیطی لایه‌بندی شده است.

- laden gravity currents in the channel conFig.uration, Applied Mathematical Modelling, 49 (2017) 739-752.
- [5] MM. Nasr-Azadani, E. Meiburg, Influence of seafloor topography on the depositional behavior of bi-disperse turbidity currents: a three-dimensional, depth-resolved numerical investigation, Environmental Fluid Mechanics, 14(2) (2014a) 319–342.
- [6] MM. Nasr-Azadani, E. Meiburg, Turbidity currents interacting with three-dimensional seafloor topography, Journal of Fluid Mechanics, 745 (2014b) 409–443.
- [7] B. Kneller, W. D. McCaffrey, Depositional effects of flow nonuniformity and stratification within turbidity currents approaching a bounding slope; deflection, reflection, and facies variation, Journal of Sediment Research, 69(5) (1999) 980–991.
- [8] E. Meiburg, B. Kneller, Turbidity currents and their deposits, Annual Reviews of Fluid Mechanics, 42(1) (2010) 135–156.
- [9] S. Migeon, B. Savoye, E. Zanella, T. Mulder, J. C. Faugère, O. Weber, Detailed seismic-reflection and sedimentary study of turbidity sediment waves on the Var Sedimentary Ridge (SE France): significance for sediment transport and deposition and for the mechanisms of sediment-wave construction, Marine Petroleum Geology, 18(2) (2001) 179–208.
- [10] T. Nakajima, M. Satoh, The formation of large mudwaves by turbidity currents on the levees of the Toyama deep-sea channel, Japan Seasonal Sedimentology, 48(2) (2001) 435–463.
- [11] J. P. Syvitski, C. R. Alexander, ME. Field, J. V. Gardner, D. L. Orange, J. W. Yun, Continental-slope sedimentation: the view from northern California, Oceanography, 9(3) (1996) 163–167.
- [12] R. B. Wynn, D. A. V. Stow, Classification and characterization of deep-water sediment waves, Marine Geology, 192(1) (2002) 7-22.
- [13] IA. Kane, WD. McCaffrey, J. Peakall, BC. Kneller, Submarine channel levee shape and sediment waves from physical experiments, Sedimentary Geology, 223(1) (2010) 75–85.
- [14] E. Khavasi, B. Firoozabadi, and H. Afshin, "Linear analysis of the stability of particle-laden مشترک دو لایه، داخل سیال محیطی می‌شود، در غیر این صورت، جریان چگال در سطح مشترک شروع به مخلوط شدن با سیال محیطی و در طول امتداد شیب سطح، حرکت می‌کند.
۳. تحقیق بر روی تفاوت‌های جریان حاوی ذره و جریان بدون ذره انجام شد. در جریان حاوی ذره مشاهده شد هر چقدر قطر ذرات افزایش یابد جدایش جریان به دلیل کاهش سریع‌تر اختلاف چگالی جریان چگال و سیال محیط از سطح کانال جدا می‌شود و رسوب گذاری سریع‌تر اتفاق می‌افتد.
۴. در بخش نهایی پژوهش، سرعت سقوط ذرات متغیر با غلظت محیط در نظر گرفته شد. در حالتی که سرعت ذرات جریان چگال دارای سرعت سقوط ثابت هستند اثر متقابلی روی هم نمی‌گذارند ولی در حالتی که سرعت سقوط ذرات با غلظت تغییر می‌کند، جریان نیروی محرکه بیشتری داشته در نتیجه رسوب‌گذاری تا مسافت بیشتری پیش می‌رود.
۵. باید توجه کرد که شبیه‌سازی جریان چگال در حالت سرعت سقوط متغیر ذرات، به دلیل بیشترین تطابق با شرایط آزمایشگاهی و موارد موجود در طبیعت، دارای کاربرد زیادی خواهد بود.
۶. بررسی‌های موجود در پژوهش نشان داد که سرعت پیشانی جریان چگال با ورودی ناپیوسته با هر عاملی که موجب گردد اختلاف چگالی کاهش یابد و یا مستهلک گردد، رابطه معکوس دارد. از جمله این عوامل می‌توان به رسوب و ته‌نشینی ذرات معلق، اشاره نمود.

مراجع

- [1] Z. He, L. Zhao, T. Lin, P. Hu, Y. Iv, H. Ho, Y. Lin, Hydrodynamics of gravity currents down a ramp in linearly stratified environments, Journal Of Hydraulic Engineering, 20(3) (2016) 3-6.
- [2] 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)
- [3] B. L. White, K. R. Helfrich, A general description of a gravity current front propagating in a two-layer stratified fluid, Journal of Fluid Mechanics, 711 (2012).
- [4] Francisco, P. Ezequiel, L. F.R. Espath, J. H. Silvestrini, Direct numerical simulation of bi disperse particle-

- Geosciences, 53 (2013) 141–153.
- [24] T. Tokyay, M. H. García, Effect of initial excess density and discharge on constant flux gravity currents propagating on a slope, *Environmental Fluid Mechanics*, 14(2) (2014) 409-429.
- [25] L. Ottolenghi, C. Adduce, R. Inghilesi, F. Roman, V. Armenio, Mixing in lock-release gravity currents propagating up a slope, *Physics of Fluids*, 28(5) (2016) 400-409.
- [26] P. G. Baines, Mixing in flows down gentle slopes into stratified environments, *Journal of Fluid Mechanics*, 443(2) (2001) 237–270.
- [27] P. Samothrakis, A. J. Cotel, Propagation of a gravity current in a two-layer stratified environment. *Journal of Geophysical Research in Oceans*, 111 (C1) (2006a) 281–291.
- [28] K. Snow, B. R. Sutherland, Particle-laden flow down a slope in uniform stratification, *Journal of Fluid Mechanics*, 755 (2014) 251–273.
- [29] M. Nicholson, M. Flynn, Gravity current flow over sinusoidal topography in a two-layer ambient Gravity current flow over sinusoidal topography in a two-layer ambient, Department of Mechanical Engineering and Institute for Geophysical Research, University of Alberta, Edmonton, Alberta T6G 2G8 (2015).
- [30] E. Biegert, B. Vowinkel, R. Ouillion, E. Meiburg, High-resolution simulations of turbidity currents, *Progress in Earth and Planetary Science*, 4(1) (2017) 33-40.
- [31] M. Mahdinia, B. Firoozabadi, M. Farshchi, A.G. Varnamkhasti, H. Afshin, Large Eddy Simulation of Lock-Exchange Flow in a Curved Channel, *Journal of Hydraulic Engineering*, 138(1) (2011) 57-70.
- [32] P. Moin, J. Kim, Numerical investigation of turbulent channel flow, *Journal of Fluid Mechanics*, 118 (1982) 341-377.
- [33] S.K. Ooi, G. Constantinescu, L. Weber, Numerical simulations of lock exchange compositional gravity current, *Journal of Fluid Mechanics*, 635(2009) 361-388.
- [34] J. Paik, A. Eghbalzadeh, F. Sotiropoulos, stratified shear layers,” *Canadian Journal of Physics*, 91 (2013) 1–13.
- [15] G. V. Middleton, Experiments on density and turbidity currents—I: Motion of the head, *Canadian Journal of Earth Science*, 3(4) (1996a) 523–546.
- [16] G. V. Middleton, Experiments on density and turbidity currents—II: Uniform flow of density currents, *Canadian Journal of Earth Science*, 3(5) (1966b) 627–637.
- [17] M. Nayamatullah, K. Bhaganagar, Turbulent Mixing in 2-D and 3-D Density Currents over a Slope, *Journal of Oceanography & Earth Science*, 1(1) (2017) 1-11.
- [18] P. Beghin, E. J. Hopfinger, R. E. Britter, Gravitational convection from instantaneous sources on inclined boundaries, *Journal of Fluid Mechanics*, 107 (1981) 407–422.
- [19] T. Maxworthy, R. I. Nokes, Experiments on gravity currents propagating down slopes—Part 1: The release of a fixed volume of heavy fluid from an enclosed lock into an open channel, *Journal of Fluid Mechanics*, 584 (2007) 433–453.
- [20] T. Maxworthy, Experiments on gravity currents propagating down slopes—Part 2: The evolution of a fixed volume of fluid released from closed locks into a long, open channel, *Journal of Fluid Mechanics*, 647 (2010) 27–51.
- A. Dai, Experiments on gravity currents propagating on different bottom slopes, *Journal of Fluid Mechanics*, 731 (2013a) 117–141.
- [21] Dai, Non-Boussinesq gravity currents propagating on different bottom slopes, *Journal of Fluid Mechanics*, 741 (2014) 658–680.
- [22] Cortés, F. J. Rueda, M. G. Wells, Experimental observations of the splitting of a gravity current at a density step in a stratified water body, *Journal Geophysical Research in Oceans*, 119(2) (2014) 1038–1053.
- [23] M. M. Nasr-Azadani, B. Hall, E. Meiburg, Polydisperse turbidity currents propagating over complex topography: comparison of experimental and depth-resolved simulation results, *Computer &*

- dynamics modeling for the design of large primary settling tanks, *Journal of Hydraulic Engineering*, 137(3) (2010) 343-355.
- [39] Tamayol, B. Firoozabadi, M. Ashjari, Hydrodynamics of secondary settling tanks and increasing their performance using baffles, *Journal of Environmental Engineering*, 136(1) (2010) 32-39.
- [40] M. Garcia, Hydraulic jumps in sediment-driven bottom currents, *Journal of Hydraulic Engineering*, 119(10) (1993) 1094-1117.
- [41] H. Yousefi, E. Khavasi, S. Teymouri, P. Nazmi, Z. Mashhadi, The Eulerian-Lagrangian and Eulerian-Eulerian methods combination for numerical modeling of the particle laden density current, *Modarres Mechanical Engineering*, 18(1) (2018) 441-451. (in Persian)
- Three-Dimensional Unsteady RANS Modeling of Discontinuous Gravity Currents in Rectangular Domains, *Journal of Hydraulic Engineering*, 135(6) (2009) 505-521.
- [35] J. O. Shin, S. B. Dalziel, P. F. Linden, Gravity currents produced by lock exchange, *Journal of Fluid Mechanics*, 521 (2004) 1-34.
- [36] D. Lilly, A proposed modification of the Germano subgrid-scale closure method, *Physics of Fluids*, 4(3) (1992) 633-635.
- [37] Lack, Numerical simulation of containing particle in secondary sediment basins to increase productivity, PhD Thesis, Department of Mechanical Engineering, Sharif University of Technology, Tehran, (2016). (in Persian)
- [38] X. Liu, M. H. García, Computational fluid

