



ترکیب روش اویلری-لاگرانژی و اویلری برای مدل سازی عددی جریان چگال حاوی ذره

حمید یوسفی¹، احسان خواصی^{2*}، صبا تیموری³، پارسا نظمی⁴، زهرا مشهدی³

- 1- دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران
 2- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه زنجان، زنجان
 3- دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه زنجان، زنجان
 4- دانشجوی کارشناسی، مهندسی مکانیک، دانشگاه زنجان، زنجان
 *زنجان، صندوق پستی 45371-38791، khavasi@znu.ac.ir

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل
 دریافت: 22 آبان 1396
 پذیرش: 08 دی 1396
 ارائه در سایت: 29 دی 1396
 کلید واژگان:
 سیال چگال پیوسته
 روش اویلری-اویلری
 روش اویلری-لاگرانژی
 شبیه سازی گردابه های بزرگ
 ذره

چکیده

جریان های چگال، به دلیل تفاوت چگالی بین جریان و محیط اطراف، جریان می یابند. دسته مهمی از سیال های چگال، جریان های گل آلود نامیده می شوند که اختلاف چگالی، به خاطر حضور ذرات جامد معلق در سیال ایجاد می شود. در کار حاضر، تلاش گردید تا با کنار هم گذاردن دو روش اویلری و لاگرانژی، از مزیت هر یک استفاده نمود، به این صورت که ذرات بزرگ تر که به علت سرعت سقوط بیشتر، نقش موثرتری را در مکانیزم رسوب دارند، به صورت لاگرانژی و ذرات کوچک تر با روش اویلری محاسبه می شوند. برای به دست آمدن معیاری برای این دسته بندی ذرات، داخل یک کانال ساده، هفت جریان با ابعاد ذرات متفاوت به صورت اویلری-اویلری، شبیه سازی عددی گردید و با حالت بدون ذره مقایسه شد و هم چنین روش اویلری-اویلری با نتایج آزمایشگاهی صحت سنجی شده است و مشخص گردید زمانی که ابعاد ذرات کوچک تر از 12 میکرون باشد، فرآیند رسوب گذاری، محسوس نمی باشد و می توان از اثر حضور این نوع از ذرات چشم پوشی نمود؛ بنابراین روش اویلری-اویلری برای ذرات کمتر از 12 میکرون روش مناسبی محسوب می شود. اعتبارسنجی روش اویلری-لاگرانژی با نتایج آزمایشگاهی صورت گرفته است و در نهایت جریان داخل کانال با طیفی از ابعاد ذرات با روش پیشنهاد شده در این پژوهش (ترکیب دو دیدگاه) شبیه سازی شده و به تشریح نتایج به دست آمده پرداخته شده است. برای انجام شبیه سازی های عددی از توسعه کدهای متن باز این قوم برای لحاظ کردن اثر ذرات استفاده شده است. باتوجه به آشفته بودن جریان از روش شبیه سازی گردابه های بزرگ برای مدل سازی آشفته استفاده شده است.

The Eulerian-Lagrangian and Eulerian-Eulerian methods combination for numerical modeling of the particle laden density current

Hamid Yousefi¹, Ehsan Khavasi^{2*}, Saba Teymouri², Parsa Nazmi², Zahra Mashhadi²

- 1- Department of Mechanical Engineering, Amirkabir University Of Technology, Tehran, Iran
 2- Department of Mechanical Engineering, University Of Zanjan, Zanjan, Iran
 * P.O.B. 45371-38791, Zanjan, Iran, khavasi@znu.ac.ir

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper
 Received 13 November 2017
 Accepted 29 December 2017
 Available Online 19 January 2018

Keywords:

Continuous gravity current
 Eulerian-Eulerian method
 Eulerian-Lagrangian method
 Large Eddy Simulation
 particle

ABSTRACT

Density currents flow due to the density difference between the current and surrounding environment. An important category of density currents is called turbidity currents, which density difference created as a result of suspended solid particle presence in fluid. In the present study, it is tried to use both Eulerian-Eulerian and Eulerian-Lagrangian methods, to take advantage of each one. In this way, the larger particle that have a more effective role in sedimentation mechanism due to the more falling velocity are calculated as Lagrangian and smaller particles by the Eulerian method. In order to obtain a criterion for particle assortment, seven currents with different particle sizes in the Eulerian-Eulerian model have been numerically simulated in a simple channel and it is compared with no particle case, and also the Eulerian-Eulerian method has been verified with experimental results and identified when the particle sizes is less than 12 micron, the sedimentation process is not appreciable, and the presence effect of these kind of particle can be ignored. Therefore, the Eulerian-Eulerian method is a suitable method for this case. The Eulerian-Lagrangian method validation has been performed with experimental results. Finally, the current inside the channel with a spectrum of particle dimensions is simulated and described the results by the proposed method (the combination of two methods). To perform numerical simulations, the development of open-source OpenFOAM codes has been used to take into account the effect of particle. Due to the current's turbulence, a Large Eddy Simulation method has been used for turbulent modeling.

1- مقدمه

جریان های پدیدهای مهمی هستند. براساس شرایط جریان، شبیه سازی جریان چگال را می توان به دو نوع اصلی تقسیم کرد: منبع پیوسته مایعات چگال و راهایی ناگهانی مایعات حجم محدود [1].
 جریان های گرانشی، که جریان های چگال یا جریان های بویانسی هم نام دارد، به وسیله تفاوت چگالی بین جریان و محیط اطراف، جریان می یابند. این

Please cite this article using:

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, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 18, No. 01, pp. 441-451, 2018 (in Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

جنبه، مانند انتشار ذرات در جریان‌های همگن، می‌تواند به‌صورت تحلیلی مورد بررسی قرار گیرد. جریان‌های واقعی ذرات سنگین، معمولاً غیرهمگن و غیرایزوتروپیک هستند و اغلب شامل واکنش با دیواره یا جدایش جریان و در نتیجه در معرض ناپایداری قرار دارند که این جریان‌ها دارای ساختار اندازه بزرگ هستند که به شدت از جریانی به جریان دیگر متفاوت است. یکی از مسائل رایج که مانع پیش‌بینی‌های دقیق جریان‌های پیچیده ذرات چگال می‌شود، تغییر آشفتگی فاز گاز توسط ذرات است. این اثر را در یک جریان یک طرفه، سطح مسطح، هندسه ساده که شامل بسیاری از ویژگی‌های مهم جریان‌های پیچیده صنعتی و طبیعی است را بررسی می‌کند [14]. نتایج اویلری-لاگرانژی کار حاضر با نتایج همین کار، فسفر و همکاران، انجام شده است [14].

امروزه به خوبی شناخته شده است که بارگذاری مناسب جرم توسط ذرات ریز می‌تواند تغییرات بسیار زیادی را در سطح آشفتگی جریان ایجاد کند. بررسی‌های هتسرونی [15] و گور و کراو [16] نشان داد که به‌طور کلی، ذرات کوچک می‌توانند آشفتگی مایع را تضعیف کنند، در حالی که ذرات بزرگ می‌توانند آن را تقویت کنند. گور و کراو [16] نسبت قطر ذرات به اندازه طول موج را به عنوان پارامتر تعیین‌کننده تاثیر ذرات بر روی آشفتگی مایع، شناسایی کردند، در حالی که هتسرونی [15] عدد رینولدز ذرات را به عنوان پارامتر مناسب برای تعیین تاثیر ذرات بر آشفتگی مایع، اعلام کرد.

یانگ و همکاران [17] به طور تحلیلی نشان دادند که آشفتگی‌های کلوی-هلموتز در جریان ذرات سنگین به‌صورت آهسته‌تری تشکیل می‌شوند. مصطفی و همکاران [18] به این نتیجه رسیدند که آشفتگی در لایه‌های برشی برای بارگذاری جرم ذرات بزرگ‌تر از 20% کاهش می‌یابد.

با توجه به مطالعات پیشین، اغلب برای شبیه‌سازی جریان چگال از روش اویلری-اویلری استفاده می‌شود، مهم‌ترین دلیل آن، کاهش محسوس زمان پردازش و دقت قابل قبول این روش است، در مواردی که اختلاف غلظت، ناشی از وجود تعداد زیادی از ذرات می‌باشد، می‌توان با دیدگاه لاگرانژی هم شبیه‌سازی نمود، که مهم‌ترین محدودیت این دیدگاه در زمان پردازش بالای آن است.

به‌علت تعداد زیاد ذرات معلق، غالباً از روش اویلری-اویلری و با حل معادله غلظت این نوع جریان شبیه‌سازی می‌شود و با در نظر گرفتن ترم سقوط ذرات در معادله غلظت، در شبیه‌سازی عددی نیز شاهد استهلاک این نوع از جریان‌ها هستیم. از طرفی، در روش اویلری-اویلری از برهم کنش ذرات صرف‌نظر می‌گردد. بنابراین این روش برای مسائلی با تنوع بالای خواص فیزیکی ذرات و زمانی که سرعت سقوط ذرات و فرآیندها ته نشینی محسوس باشد، روش مطلوبی نمی‌باشد. جهت کسب نتایج دقیق‌تر، می‌توان ذرات را با دیدگاه اویلری-لاگرانژی شبیه‌سازی نمود، بدین منظور باید تمام ذرات را در مسئله وارد نمود.

در کار حاضر، تلاش گردید تا با کنار هم گذاردن این دو دیدگاه، از مزیت هر یک استفاده نمود. ذرات بزرگ‌تر به‌صورت اویلری-لاگرانژی و ذرات کوچک‌تر با روش اویلری-اویلری شبیه‌سازی می‌شوند. در ابتدا برای به‌دست آوردن معیار دسته‌بندی ذرات، هفت جریان با ابعاد ذرات متفاوت به‌صورت اویلری-اویلری داخل یک کانال ساده، شبیه‌سازی عددی شده و با حالت بدون ذره مقایسه گردید. اعتبارسنجی روش اویلری-اویلری و اویلری-لاگرانژی با نتایج آزمایشگاهی صورت گرفته است و در نهایت جریان داخل کانال ساده با روش پیشنهاد شده در این پژوهش (ترکیب دو دیدگاه اویلری-لاگرانژی و

جریان‌های گل‌آلود زیر مجموعه‌ای از مجموعه گسترده‌تر جریان‌های چگال هستند. نیروی محرکه جریان‌های چگال، اختلاف چگالی در یک سیال یا بین دو یا چند سیال است. در جریان‌های گل‌آلود، حضور ذرات معلق عامل ایجاد اختلاف چگالی با آب تمیز محیط هستند. یک جریان گل‌آلود از سه جزء متوالی تشکیل شده است: پیشانی، بدنه و دنباله. پیشانی جریان به واسطه اختلاف چگالی در حرکت باقی‌می‌ماند (که باعث گرادیان فشار می‌شود) در حالی که حرکت بدنه و دنباله به واسطه نیروی جاذبه است. در این مرحله، باید توجه داشت که اختلاف دما بین آب درون مخزن سد و جریان حاوی ذرات، بر روی محل مغروق شدن جریان گل‌آلود تأثیرگذار است [2].

مطالعات اخیر نشان می‌دهد روش‌های دی ان اس¹ و ال ئی اس² روش‌هایی قابل اعتماد و دقیق برای تحلیل فیزیک جریان‌های گرانشی هستند. از نمونه کارهایی که جهت شبیه‌سازی جریان چگال روی بستر مسطح و بدون مانع توسط مدل ال ئی اس صورت گرفته است، می‌توان به هارتل و همکاران [3-5] و نگ و اسکویز [6]، پترسون و همکارانش [7]، اویی و همکارانش [8-10] و مهدی‌نیا [11] و همکارانش اشاره نمود. هارتل و همکاران تحقیق در زمینه حرکت جریان چگال ارائه داده‌اند [3]، در این تحقیق آن‌ها از دو روش شبیه‌سازی مستقیم عددی و شبیه‌سازی دینامیک گردابه‌ای، با فرض بوزینسک استفاده کرده و جریان چگال دوبعدی از نوع رهاسازی توده با حجم زیاد و حجم کم را در طول فاز راه‌اندازی روی بستر لغزشی و غیرلغزشی به‌صورت عددی بررسی کرده‌اند.

پترسون و همکاران [7]، جریان چگال دو بعدی از نوع رهاسازی توده با حجم زیاد و جریان چگال سه بعدی از نوع رهاسازی توده متقارن با حجم کم را به روش عددی ال ئی اس³ شبیه‌سازی کردند و نتایج به‌دست آمده را با نتایج آزمایشگاهی خود مقایسه نمودند. مقایسه نتایج دوبعدی نشان می‌دهد که با وجود عدم شکستن امواج کلوی-هلمهولتز، روش شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ دو بعدی، انتشار جریان و ساختارهای با مقیاس بزرگ را به خوبی مدل می‌کند.

نصرآزادانی و همکاران [12] جریان گل‌آلود دودزه در برخورد با بستر صاف و مانع گاوسی با تمرکز بر روی پروفیل رسوب ذرات ریز و درشت مطالعه کردند. آن‌ها مناطقی را با رسوب ضعیف و قوی به‌خاطر حضور مانع مشاهده کردند. آن‌ها علاوه بر این با استفاده از نشانگرهای لاگرانژی برای دنبال کردن ذرات ریز و درشت در جریان و هم‌چنین محل رسوب آن‌ها با توجه به موقعیت اولیه‌شان بررسی کردند. با استفاده از نقشه‌نمایی رسوب، مشخص شد که مانع قوی‌ترین تأثیر را بر روی ذراتی که در موقعیت میانی هستند، دارد.

اوتولنگی و همکاران [13]، نیز به بررسی درون‌آمیختگی و اختلاط جریان چگال رهاسازی توده برای اختلاف چگالی‌ها و نسبت ابعاد⁴ ذرات مختلف با استفاده از ال ئی اس پرداخته‌اند. نتایج ایشان نشان داد که با افزایش اختلاف چگالی ورودی و کاهش نسبت ابعاد نرخ اختلاط افزایش می‌یابد.

عکس‌العمل بین ذرات کوچک، چگال و آشفتگی فاز گاز بسیار پیچیده است و علی‌رغم اهمیت جریان‌های صنعتی و طبیعی ذرات سنگین⁵، بسیاری از بررسی‌ها هنوز دارای درک مشخصی از این موضوع نیستند. فقط چند

¹ Direct Numerical Simulation

² Large Eddy Simulation

³ Implicit Large Eddy Simulation

⁴ Aspect ratio

⁵ Particle-laden

جدول 1 مشخصات شبیه سازی عددی

شماره اجرا	d_p (μm)
1	بدون ذره
2	5
3	12
4	20
5	30
6	40
7	50
8	100

1، در راستای x ، y و z به ترتیب برابر 65 و 31، شبکه بندی 2، در راستای x ، y و z به ترتیب برابر 1200، 65 و 30، شبکه بندی 3، در راستای x ، y و z به ترتیب برابر 1211، 75 و 31 می باشد. "شکل 2" نشان می دهد که نتایج پروفیل های سرعت در شبکه بندی دوم و سوم به یکدیگر بسیار نزدیک هستند و احتمالاً با افزایش بیشتر تراکم شبکه بندی، نتایج تغییر چندانی نمی کند. بنابراین شبکه بندی سوم می تواند انتخاب مناسبی برای این شبیه سازی ها باشد.

2-2- روش حل عددی

در این تحقیق از روش شبیه سازی گردابه های بزرگ استفاده شده است. در روش شبیه سازی گردابه های بزرگ، تنها گردابه های بزرگ تر به صورت مستقیم حل می شوند و گردابه های کوچک تر مدل می شوند. این باعث کاهش هزینه محاسباتی و ایجاد دقت کافی در مقیاس گردابه های بزرگ می گردد. در این تحقیق از فیلتر جعبه ای سه بعدی یا فیلتر "ریشه سوم حجم سلول" (که معادل است با میانگین گیری روی حجم) استفاده شده است و برای تضمین جواب های بهتر کنار دیواره از تابع میرایی و ندریست پیشنهاد شده توسط معین و کیم [21] استفاده گردیده است. با توجه به معادله پیوستگی می توان نوشت:

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

در رابطه (1) S_{lk} نرخ کرنش فیلتر شده می باشد. با استفاده از رابطه (1) در معادله مومنتوم، معادلات پیوستگی، مومنتوم و غلظت (برای جریان حاوی یک نوع ذره) به ترتیب به شکل نهایی زیر درمی آیند:

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

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

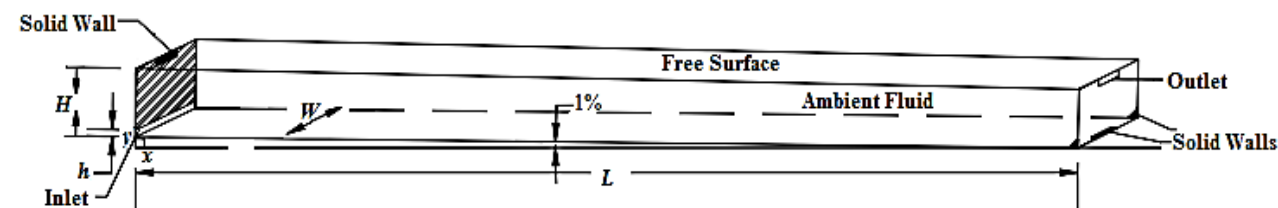


Fig. 1 The general form of the channel geometry of Eulerian-Eulerian problem

اویلری- اویلری) شبیه سازی و به تشریح نتایج به دست آمده پرداخته شده است. ضمناً همه شبیه سازی های عددی در نرم افزار متن باز این فوم¹ صورت گرفته است.

2- مسئله اویلری-اویلری

1-2- مسئله ی مورد بررسی

برای بررسی تاثیر ابعاد ذرات بر رفتار جریان چگال، هفت جریان چگال حاوی ذره با ابعاد مختلف با یکدیگر و با حالت بدون ذره مقایسه گردید. ابعاد هندسه مورد بررسی برابر طول $L = 4.29$ (m)، عرض $W = 0.3$ (m)، ارتفاع $H = 0.3$ (m)، ارتفاع ورودی $h = 0.03$ (m) و شیب بستر 1% می باشد. این هندسه به طور شماتیک در "شکل 1" نشان داده شده است. صفحه پایینی و صفحات جانبی دیوار در نظر گرفته شده اند. برای صفحه بالایی به منظور شبیه شدن به سطح آزاد، شرط تقارن لحاظ شده اند. شرط مرزی ورودی سرعت ثابت، صفحه بالای ورودی دیواره، و سمت راست از شرط مرزی همرفتی به عنوان شرط مرزی خروجی استفاده شده است [20,19].

در این تحقیق 8 مسأله مختلف شبیه سازی شده است. مشخصات این 8 مسأله در جدول 1 آمده است. برای جریان های حاوی ذره، فرض شده که همه ذرات دارای قطر یکسان و از جنس کائولن با چگالی $\rho_p = 2650$ (kg/m³) هستند. برای همه شبیه سازی ها سرعت ورودی $u_0 = 0.11$ (m/s) و غلظت ورود $c_0 = (\rho_m - \rho_w) / (\rho_{max} - \rho_w) = 0.9$ 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. رینولدز ورودی با توجه به ارتفاع ورودی جریان، 3300 است که تضمین کننده آشفته بودن جریان است.

برای شبکه بندی فضای هندسی از یک شبکه سازمان یافته، مطابق هندسه "شکل 1"، استفاده شده است. در راستای عمق کانال (z) تقسیم بندی ها یکنواخت و در راستای موازی با حرکت جریان (x) مش ریزتر انتخاب شده است. در راستای عمود بر جریان (y)، سلول ها در نزدیکی کف کانال و همچنین در محدوده ای که جریان چگال غالباً در آن در حال حرکت است تراکم بیشتری نسبت به سایر نواحی دورتر از کف کانال دارند. برای این منظور در فواصل معین از مش لایه مرزی با ضرایب انبساطی مناسب استفاده شده است. این توزیع ابعادی شبکه باعث می شود در عین حال که دقت حل مسئله حفظ می شود، سرعت محاسبات افزایش یافته و زمان لازم برای کامل شدن شبیه سازی کاهش یابد.

برای بررسی استقلال از شبکه حل، نتایج شبیه سازی جریان چگال روی کانال برای سه شبکه با تراکم های مختلف در "شکل 2" نشان داده شده است. جزئیات هریک از شبکه بندی ها و تعداد تقسیمات سلول ها، برای شبکه بندی

شکل 1 شمای کلی هندسه کانال مسئله اویلری- اویلری

¹ Open FOAM

کوچک تقریب‌های مناسبی هستند، در حالی که در دیدگاه لاگرانژی امکان محاسبه دقیق تر نیروی درگ فراهم می‌شود. از مهم ترین روابط برای سرعت سقوط رابطه استوکس است. این رابطه به صورت زیر می‌باشد.

$$V_s = g d_p^2 \frac{\rho_p - \rho_w}{18\mu} \quad (8)$$

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. برای به دست آوردن رابطه استوکس فرض می‌شود که تک ذره‌ای کروی بدون شتاب و با عدد رینولدز زیر یک در حال سقوط است و مقدار سرعت سقوط از برابری نیروهای وزن و پسا به دست می‌آید. این رابطه بر هم کنش بین ذرات را در نظر نمی‌گیرد. برای گسسته سازی ترم‌های دیورژانس و لاپلاسیس در معادلات از روش کوئیک استفاده شده است که یک روش درجه چهار می‌باشد. برای ترم گرادیان نیز از روش درجه چهار که توسط پیر و همکارانش [22] ارائه شده، بهره گرفته شده است. برای گسسته سازی زمانی از یک روش درجه دو پسرو استفاده شده است [23]. تمامی معادلات تا رسیدن به خطای نسبی 10^{-6} حل شده‌اند. برای حل مساله حاضر از توسعه کد این فوم (که کدی با منبع باز، مخصوص محیط لینوکس و به زبان C + نوع شی‌گرا می‌باشد) برای در نظر گرفتن حضور ذرات استفاده شده است.

3-2- بررسی نتایج مسئله اویلری-اویلری

با وجود تغییرات پروفیل‌های سرعت در شرایط مختلف جریان‌های چگال، این امکان وجود دارد که با بی‌بعد کردن پروفیل‌های سرعت به کمک پارامترهای متوسط عمقی¹ جریان چگال، پروفیل‌های بی‌بعد شده بر روی یکدیگر قرار گیرند. محققین زیادی مانند الیسون و ترنر [24]، گارسیا و پارکر [25] نیز کار مشابهی را صورت دادند.

برای صحت‌سنجی نتایج این مدل عددی، ابتدا مسئله برای جریان چگال حاوی ذرات با ابعاد 12 میکرون و برای کانال صاف حل شده و پروفیل‌های بی‌بعد سرعت و غلظت جریان چگال شبیه‌سازی شده و با نتایج آزمایشات مقایسه شده است [25]. "شکل 3" نتایج پروفیل سرعت و غلظت حل عددی را در کنار نتایج تجربی نشان می‌دهد. همان‌طور که مشخص است، تطابق خوبی بین نتایج این مدل سازی و داده‌های تجربی وجود دارد. در ادامه "شکل 4" مکان هد جریان‌های حاوی ذرات با قطرهای متفاوت و بدون ذره را بررسی کرده است.

همان‌گونه که از نتایج "شکل 4" مشخص می‌شود جریان حاوی ذرات کوچک‌تر از 12 میکرون تفاوت معناداری با حالت بدون ذره ندارد، علت این امر این است که در این موارد این ذرات، به علت ابعاد کوچک، وزن و سرعت سقوط قابل توجهی ندارند و تعداد ذراتی که ته‌نشین می‌شوند، حدوداً با ذراتی که از کف به جریان باز می‌گردند، برابر است. در این موارد استهلاک جریان بر اثر ته‌نشینی ذرات، در ابعاد هندسه مورد بررسی، ناچیز است و فرآیند رسوب گذاری عامل غالبی به نظر نمی‌رسد. در نمودار محل هد، در جریان بدون ذرات، هد به صورت خطی و با سرعت ثابت حرکت می‌کند، جریان‌های حاوی ذرات کوچک‌تر از 12 میکرون نیز رفتاری مشابه با حالت بی‌ذره دارند ولی جریان‌های حاوی ذرات بزرگ‌تر با گذشت زمان و کاهش غلظت، از حالت خطی فاصله گرفته و سرعت آن‌ها کاهش می‌یابد تا جایی که جریان حاوی ذرات 100 میکرون به سرعت صفر می‌رسند و جریان کاملاً مستهلک شده و ادامه پیدا نمی‌کند. در "شکل 5" نمای کلی جریان‌های حاوی ذرات با

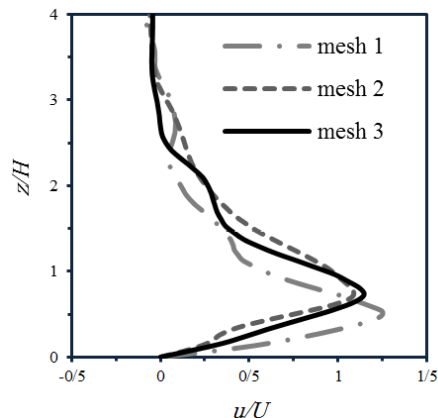


Fig. 2 The results of gravity current simulation on the channel for three mesh with different compression at $x = 50h$

شکل 2 نتایج شبیه‌سازی جریان چگال روی کانال برای سه شبکه با تراکم‌های مختلف در $x=50h$

$$\frac{\partial c}{\partial t} + u_k \frac{\partial c}{\partial x_k} = \alpha \frac{\partial^2 c}{\partial x_k \partial x_k} + \frac{\partial}{\partial x_k} \left(\alpha_{SGS} \frac{\partial c}{\partial x_k} \right) + v_f \frac{\partial c}{\partial x_k} \delta_{21} \quad (4)$$

برای سادگی معادلات، علامت خط روی کمیت‌های فیلتر شده حذف شده است و تمامی کمیت‌های موجود از نوع فیلتر شده می‌باشند. ρ_w و ρ_w چگالی و ویسکوزیته سیال محیطی (آب) می‌باشند. همچنین جهت جاذبه در خلاف جهت y یا $i = 2$ می‌باشد. $\dot{g} = \beta g$ هم شتاب گرانش کاهش یافته 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. در معادلات بالا از تقریب بوزینیسک برای غلظت استفاده شده است. مقدار عدد اشمیت مولکولی $Sc = \nu / \alpha$ برای آب نمک برابر 700 می‌باشد. در این معادله با توجه به نتایج اوی و همکارانش [19]، برابر 1 در نظر گرفته می‌شود. برای محاسبه α_{SGS} از تعریف عدد اشمیت زیرشبکه Sc_{SGS} ، به شکل زیر استفاده می‌نماییم:

$$\alpha_{SGS} = \nu_{SGS} / Sc_{SGS} \quad (5)$$

در این جا برای دقت بیشتر در نتایج حل، از یک الگوریتم دینامیک برای یافتن عدد اشمیت استفاده می‌شود. با استفاده از انجام شبیه‌سازی‌های مختلف مقدار عدد اشمیت آشفته به شکل زیر پیشنهاد شده است:

$$Sc_{SGS} = 0.4 \exp(-2.5F_k) + 1 \quad (6)$$

که در آن‌ها مقادیر عدد فرود آشفته F_k و شناوری N به دست می‌آیند:

$$F_k = \varepsilon / Nk \quad (7-f)$$

$$N = \sqrt{-g/\rho} (\partial\rho/\partial z)^{1/2} \quad (7-b)$$

که در آن k و ε به ترتیب انرژی و اتلاف آشفته می‌باشند. به این ترتیب معادله (4) نیز بسته و قابل حل خواهد بود. باید توجه داشت که معادله غلظت عادی قادر به شبیه‌سازی درست ته‌نشینی و استهلاک ذرات نمی‌باشد. برای اصلاح این معادله، ترم سقوط به معادله غلظت افزوده می‌شود. این ترم برای ذرات با ابعاد مشابه کارایی دارد و با بیشتر شدن تنوع ذرات، تعداد معادلات بسیار افزایش می‌یابد و زمان پردازش دیدگاه اویلری-اویلری، بسیار افزایش می‌یابد. به دلیل عدم محاسبه سرعت تک تک ذرات، در این دیدگاه روش‌های متوسط‌گیری و تقریب‌هایی مانند نیروی درگ استوکس برای محاسبه ترم سقوط مورد استفاده قرار می‌گیرند، که در رینولدزهای بسیار

¹ Depth Average parameters

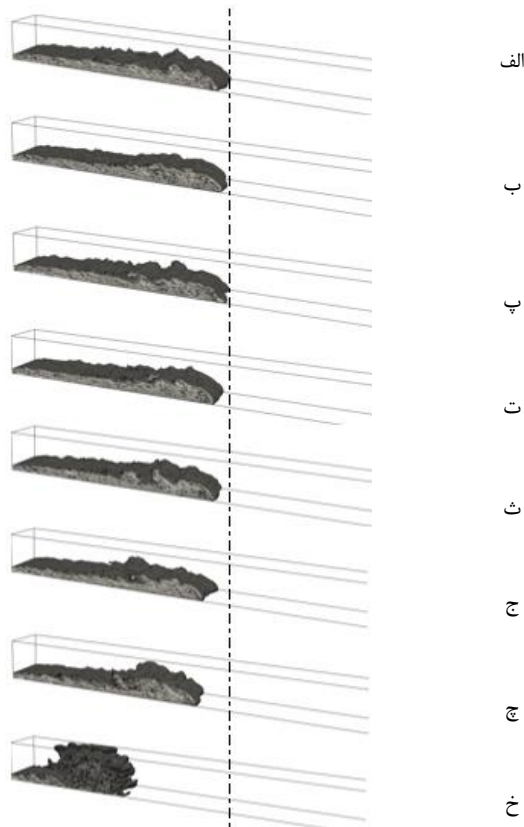


Fig. 5 The general figure of streams containing particles with different diameters and no particle is simulated in 20 seconds using the Eulerian-Eulerian method. (a) no particle (b) 5 micron diameter (c) 12 micron diameter (d) 20 micron diameter (e) 30 micron diameter (f) 40 micron diameter (g) 50 micron diameter (h) 100 micron diameter

شکل 5 نمای کلی جریان های حاوی ذرات با قطرهای متفاوت و بدون ذره، در زمان 20 ثانیه که به روش اویلری-اویلری شبیه سازی شده اند. (الف) بدون ذره (ب) قطر 5 میکرون (پ) قطر 12 میکرون (ت) قطر 20 میکرون (ث) قطر 30 میکرون (ج) قطر 40 میکرون (چ) قطر 50 میکرون (خ) قطر 100 میکرون

اویلری-اویلری با دقت و به صورت ملموس قادر به نمایش آن نمی باشد، اما این مورد نقش مهمی را در جریان های حاوی ذرات ایفا می کند و به شدت وابسته به ابعاد این ذرات می باشد. بار ذرات معلق از رابطه (9) محاسبه می شود:

$$Q_s = \int_0^{\infty} cu \, dz \quad (9)$$

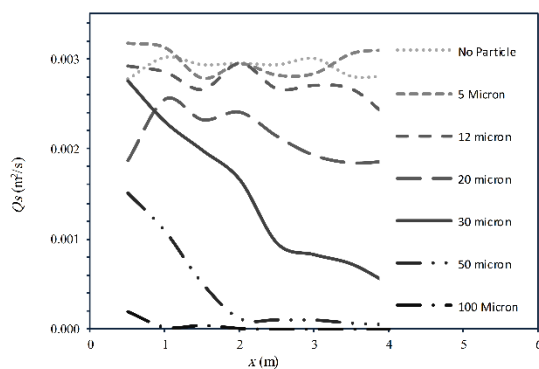


Fig. 6 Suspended particles load in currents containing particles with different diameters and no particle

شکل 6 بار ذرات معلق در جریان های حاوی ذرات با قطرهای متفاوت و بدون ذره

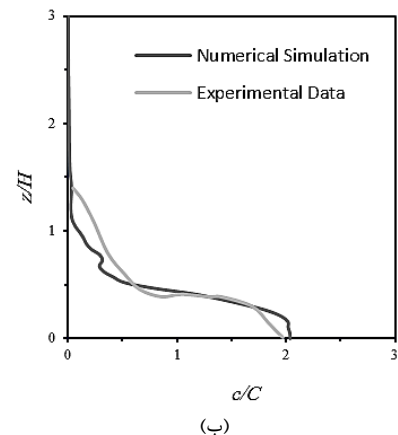
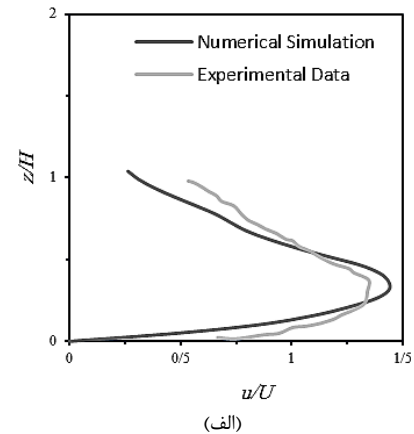


Fig. 3 Comparison of numerical simulation results and experimental data [32] for dimensionless profiles (a) Speed (b) concentrations on a smooth channel

شکل 3 مقایسه نتایج شبیه سازی عددی و داده های تجربی [32] برای پروفیل های بی بعد (الف) سرعت (ب) غلظت روی کانال صاف

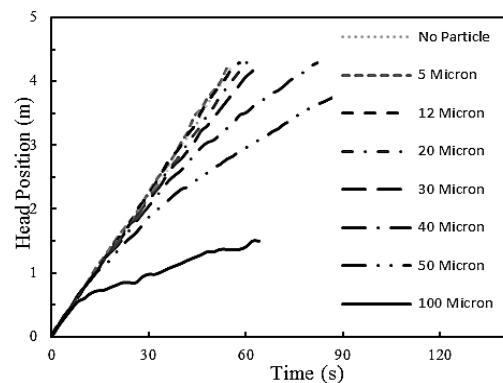


Fig. 4 The location of the currents head containing particles with different diameters and no particle

شکل 4 مکان هد جریان های حاوی ذرات با قطرهای متفاوت و بدون ذره

قطرهای متفاوت و بدون ذره، در زمان 20 ثانیه که به روش اویلری-اویلری شبیه سازی شده اند، نشان داده شده است.

نمودار بار ذرات معلق، که در "شکل 6" آورده شده است، نیز تکمیل کننده این مقایسه است. در جریان بدون ذره و یا حاوی ذرات ریز، بار ذرات معلق در مسیر حرکت تقریباً ثابت می ماند و تفاوت معناداری در آن ها دیده نمی شود، اما در جریان حاوی ذرات درشت تر با افت قابل ملاحظه بار ذرات معلق مواجه می شویم. الگو رسوب ذرات، مورد مهم دیگری است که دیدگاه

می یابد و نیاز به دقت بیشتری برای محاسبه نیروی درگ اصطکاکی و فشاری هست و برخورد ذرات با یکدیگر موثر واقع می شود، روش اویلری-لاگرانژی می تواند نتایج دقیق تری در دسترس ما قرار دهد، در این روش سیال پیوسته به صورت اویلری شبیه سازی می شوند و ذرات به روش لاگرانژی به صورت کوپل چهارجانبه¹ حل می شوند.

3- مسئله اویلری-لاگرانژی

3-1- مسئلهی مورد بررسی

هندسه این مسئله، یکسان با مسئله اویلری-اویلری می باشد، شرایط اولیه و مرزی نیز شبیه با مسئله قبل می باشد. با این تفاوت که در این مورد برای ذرات کوچک معادله غلظت حل شده است و ذرات بزرگتر به صورت لاگرانژی به مسئله افزوده می شود. در مسئله حاضر مقادیر متنوعی بین دو مقدار 12 و 200 میکرون با روش روزین رملر² به مسئله افزوده شده است.

3-2- روش حل عددی

در ادامه، معادلات حاکم مورد بررسی قرار گرفته اند. از تکرار معادلات مشترک میان مسئلهی پیش رو و روش اویلری-اویلری اجتناب گردیده است. تاثیر ذره ای بر ذرات دیگر در فاصله دور از آن به وسیله یک موج آشفتگی انتشار می یابد. اگر گام زمانی در محاسبه عددی انتخاب شده به اندازه کافی کوچک باشد، می توان فرض کرد که در طول زمان آشفتگی، ذرات در نقاطی در همسایگی نزدیک خود پخش می شود. به عبارت دیگر، حرکت لحظه ای هر ذره توسط نیروهای تماسی، بین آن ذره و ذرات در تماس با آن ایجاد می شود [26]. براساس این فرض، حرکت هر ذره در محدوده مشخص می تواند با کامل کردن مرحله به مرحله معادلات حرکت به دست آید و نیروهای تماسی بین ذرات و همسایگان نزدیک آن را فراهم کند. ذرات مشخص دارای دو نوع حرکت هستند: حرکات انتقالی و چرخشی. حرکت انتقالی توسط نیروی تماسی، نیروی سیال و نیروی گرانشی ایجاد می شود. در این جا تنها نیروهای تماسی به عنوان نیرویی که باعث حرکت چرخشی هستند، در نظر گرفته می شوند. معادلات حرکت انتقالی و چرخشی به شکل زیر می باشند:

$$\ddot{\vec{r}} = \frac{(\vec{f}_C + \vec{f}_D)}{m} + \vec{g} \quad (10)$$

$$\ddot{\vec{\omega}} = \vec{T}_C / I \quad (11)$$

که \vec{r} نشان دهنده بردار مکان مرکز ثقل ذره، m جرم ذره، \vec{f}_C جمع نیروهای تماسی، \vec{f}_D نیروی درگ سیال، \vec{g} بردار شتاب گرانش، \vec{T}_C جمع گشتاور ناشی از نیروهای تماسی، I مومنتوم ذره، و (\cdot) یک مشتق زمانی را نشان می دهد. سرعت و موقعیت جدید بعد از گام زمانی Δt توسط رابطه زیر به دست می آید:

$$\vec{v}_s = \vec{v}_{s0} + \vec{a}_0 \Delta t \quad (12)$$

$$\vec{r} = \vec{r}_0 + \vec{v}_s \Delta t \quad (13)$$

$$\vec{\omega} = \vec{\omega}_0 + \vec{\alpha}_0 \Delta t \quad (14)$$

که \vec{v} بردار سرعت است و زیرنویس 0 مقدار قبلی را نشان می دهد، و زیرنویس s به ذره اشاره می کند.

3-3- مدل سازی نیروهای تماسی

کاندال و استرک [26] مدل فتر، ضربه گیر و لغزنده و مدل تماس با دیوار را

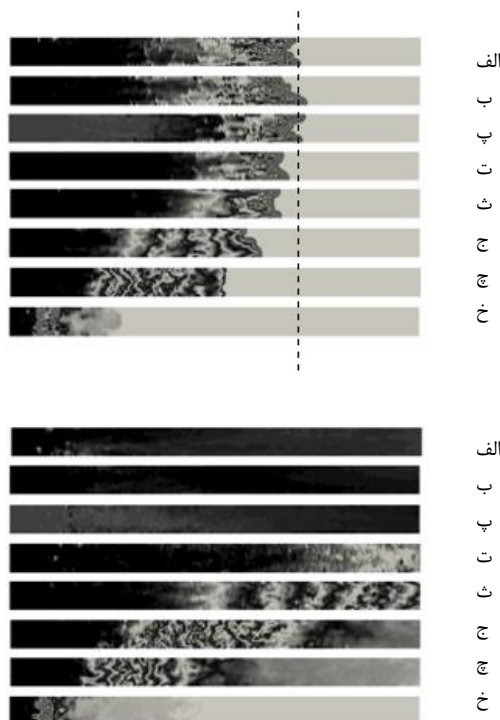


Fig. 7 Flow concentration contours containing particles with different dimensions and without particles in the channel floor. The above figure is 40 seconds and the bottom figure takes 200 seconds. (a) no particle (b) 5 micron diameter (c) 12 micron diameter (d) 20 micron diameter (e) 30 micron diameter (f) 40 micron diameter (g) 50 micron diameter (h) 100 micron diameter

شکل 7 کانتورهای غلظت جریان های حاوی ذره با ابعاد متفاوت و بدون ذره در کف کانال. شکل بالا در زمان 40 ثانیه و شکل پایین در زمان 200 ثانیه. (الف) بدون ذره (ب) قطر 5 میکرون (پ) قطر 12 میکرون (ت) قطر 20 میکرون (ث) قطر 30 میکرون (ج) قطر 40 میکرون (چ) قطر 50 میکرون (خ) قطر 100 میکرون

"شکل 7" کانتورهای غلظت جریان های حاوی ذره در ثانیه 40 و هم چنین پس از رسیدن جریان به شرایط شبه پایا در کف کانال را نشان می دهد. این شکل می تواند معیاری برای نشان دادن رسوب ذرات باشد. همان گونه که از این شکل نیز مشخص است، ذرات با قطر 12 میکرون و کم تر (شکل 7، الف، ب، پ) تغییر چندانی بر روی رفتار جریان و کانتورهای غلظت آن ایجاد نکرده اند.

در روش اویلری-اویلری، معادله انتقالی با ترم های دیفیوژن و کانوکشن به عنوان معادله غلظت در نظر گرفته می شود، گاهی در مواردی از ترم دیفیوژن صرف نظر می شود، چرا که این ترم هم ارز نیروی برونی است و در ابعاد نسبتا بزرگ تر (50 میکرون) نیز تاثیر غالبی بر مسئله ندارد، البته از آن جایی که برای ابعاد کوچک تر از روش اویلری-اویلری استفاده شده است، برای کسب حداکثر دقت ممکن، این ترم کنار گذاشته نشده است، اما معادله غلظت با این خصوصیات در مسائلی که سقوط و ته نشینی ذرات قابل چشم پوشی نیست، دچار خطا می شوند.

با توجه به "شکل 7" قسمت خ، جریان چگال حاوی ذرات 100 میکرون به علت وزن و سرعت سقوط بیشتر با سرعت بالایی ته نشین شده، نیروی محرک جریان تضعیف شده در نتیجه جریان چگال عملا مستهلک و در فاصله مشخصی از ورودی، متوقف می شود.

در مواردی که این ذرات به دلیل ابعاد بزرگ تر، به شدت جریان را تحت تاثیر قرار می دهد و رسوب گذاری، تاثیر متقابل ذرات و سیال چگال اهمیت

¹ Four-way coupling

² Rosin Rammler

$$K_n = \frac{\sqrt{2r_s E_s}}{3(1 - \sigma_s^2)} \quad (24)$$

که E_s برابر مدول یانگ و σ_s نسبت پواسون ذرات می باشند. در مورد برخورد بین یک کره و دیوار، K_n ، توسط رابطه زیر بیان شده است:

$$K_n = \frac{\frac{4\sqrt{r_s}}{3}}{\frac{1-\sigma_s^2}{E_s} + \frac{1-\sigma_w^2}{E_w}} \quad (25)$$

که E_w برابر مدول یانگ و σ_w نسبت پواسون دیوار می باشد. معادله (23) به این معنی است که نیرو به مقدار $3/2$ قدرت جابجایی با آن متفاوت است. بنابراین اگر نتایج فوق به مدل نیروهای تماسی داده شده در قسمت قبل اعمال شود، معادله (15) با معادله زیر جایگزین می شود:

$$\vec{f}_{cnij} = (-K_n \delta_{nij}^{3/2} - \eta_{nj} \vec{v}_{rij} \cdot \vec{n}_{ij}) \vec{n}_{ij} \quad (26)$$

رابطه میان نیروی مماسی P_t و جابجایی δ_t توسط سعیدی و همکاران [27] به دست آمده است. با توجه به نظریه های آن ها، رابطه نیرو-جابجایی به جابجایی نرمال δ_t بستگی دارد. علاوه بر این، اگر سطح تماسی دارای لغزش باشد، رابطه پیچیده می شود. از این رو، نتیجه زیر برای مورد بدون لغزش قابل استفاده است که در ادامه آورده شده است:

$$P_t = \frac{2\sqrt{2r_s G_s}}{2 - \sigma_s} \delta_n^{1/2} \delta_t \quad (27)$$

که G_s مدول برشی است که مربوط به مدول یانگ E_s و نسبت پواسون σ_s می باشد، توسط رابطه (28) بدست می آید:

$$G_s = \frac{E_s}{2(1 + \sigma_s)} \quad (28)$$

معادله (27) نشان می دهد که رابطه جابجایی- نیروی مماسی، خطی است و بنابراین اگر نتیجه فوق به معادله (16) اعمال شود، سختی k_t توسط رابطه زیر به دست می آید:

$$k_t = \frac{2\sqrt{2r_s G_s}}{2 - \sigma_s} \delta_{nij}^{1/2} \quad (29)$$

در مورد برخورد بین کره و دیوار، سختی k_t به شکل زیر به دست می آید:

$$k_t = \frac{8\sqrt{r_s G_s}}{2 - \sigma_s} \delta_{nij}^{1/2} \quad (30)$$

این معادله براساس فرض زیر است. هنگامی که جابه جایی مماسی در برخورد بین یک کره و دیوار اتفاق می افتد، دیوار به عنوان یک جسم سفت و سخت محسوب می شود، زیرا جابه جایی الاستیک دیواره در جهت مماسی بسیار کوچک تر از کره است. بنابراین خواص دیوار در معادله (30) گنجانده نشده است. در جهت نرمال، جابه جایی الاستیک از دیوار را نمی توان نادیده گرفت. برای ضریب میرایی، کاندال و استراک [26] دو اصطلاح را پیشنهاد کردند که در معادلات زیر ارائه شده است:

$$\eta_n = 2\sqrt{mk_n} \quad (31-الف)$$

$$\eta_t = 2\sqrt{mk_t} \quad (31-ب)$$

که از شرایط میرایی بحرانی سیستم با یک درجه آزادی به دست آمده و تنها متشکل از یک جرم، فنر و ضربه گیر است.

3-4- تأثیر نیروی سیال بر ذرات

در نظر گرفتن نیروهای مایع، برای تقسیم فضای داخل کانال به دو بخش مناسب است، یک بستر دارای ذره است که ثابت یا در حال حرکت می باشد، دیگری بدون ذرات، به جز چند عدد ذره معلق، می باشد. با توجه به این دو قسمت مختلف، دو نوع نیروی مایع در نظر گرفته می شود: یکی نیرویی است که بر روی ذرات داخل بستر ذره ای عمل می کند و دیگری نیرویی است که بر

برای فرمول بندی نیروهای تماسی بین دو ذره کروی ارائه دادند. اثرات این المان های مکانیکی بر حرکت ذرات از طریق پارامترهای سختی (k)، ضریب دمپ (η) و ضریب اصطکاک (μ_f) ظاهر می شود. به صورتی که ذره i در تماس با ذره j است، مولفه نرمال نیروی تماسی، بر روی ذره i با مجموع نیروهای فنر و ضربه گیر به شکل زیر تعریف می شود:

$$\vec{f}_{cnij} = (-k_n \delta_{nij} - \eta_n \vec{v}_{rij} \cdot \vec{n}_{ij}) \vec{n}_{ij} \quad (15)$$

که δ_{nij} جابجایی ناشی از نیروی نرمال، \vec{v}_{rij} بردار سرعت ذره i نسبت به ذره j و \vec{n}_{ij} بردار واحد مرکز ذره i به ذره j . جزء مماس نیروی تماسی، \vec{f}_{cnij} به صورت زیر به دست می آید:

$$\vec{f}_{cnij} = -k_t \delta_{tij} - \eta_{tj} \vec{v}_{sij} \quad (16)$$

که k_t و δ_{tij} به ترتیب، سختی و جابجایی در جهت مماسی هستند. در معادلات فوق، پسوند های n و t به ترتیب اجزای مربوط به جهت های نرمال و مماسی هستند. \vec{v}_{sij} سرعت لغزش نقطه تماس است. که مطابق رابطه زیر است:

$$\vec{v}_{sij} = \vec{v}_{rij} - (\vec{v}_{rij} \cdot \vec{n}) \vec{n} + r_s (\vec{\omega}_i + \vec{\omega}_j) \times \vec{n} \quad (17)$$

که شعاع کره است. زمانی که ذره j توسط دیوار جابجا شده است، $|\vec{v}_j| = |\vec{v}_i| = 0$ ، اگر رابطه زیر صادق باشد:

$$f_{ctij} > \mu_f |f_{cnij}| \quad (18)$$

سپس ذره i لغزش می کند و نیروی مماسی توسط رابطه زیر محاسبه می شود:

$$f_{ctij} = -\mu_f |f_{cnij}| \vec{t}_{ij} \quad (19)$$

به جای معادله (16) معادله (19) قانون اصطکاک از نوع کولون است. جابجایی توسط رابطه زیر داده شده است:

$$\vec{t}_{ij} = \vec{v}_{sij} / |\vec{v}_{sij}| \quad (20)$$

اگر ذره j با دیوار جابجا شود، رابطه های مشابهی با معادلات فوق برای برخورد با دیوار پیدا می شود. به طور کلی، ذرات کمی در یک زمان مشخص با ذرات i در تماس هستند. بنابراین نیروی کل بر روی ذره i با جمع شدن نیروهای بالا با توجه به j به دست می آید:

$$\vec{F}_{ci} = \sum_j (\vec{f}_{cnij} + \vec{f}_{ctij}) \quad (21)$$

$$T_{ci} = \sum_j (r_s \vec{n}_{ij} \times \vec{f}_{ctij}) \quad (22)$$

مرحله بعدی، بعد از مدل سازی نیروهای تماسی، تعیین مقادیر سختی k ، ضریب میرایی η و ضریب اصطکاک μ_f می باشد. در میان این پارامترها، ضریب اصطکاک μ_f قابل اندازه گیری است و به عنوان یک پارامتر تجربی داده می شود. ضریب میرایی η از سختی گرفته شده است که در بخش بعد به شرح آن پرداخته شده است. بنابراین سختی پارامتری است که باید ابتدا تعیین شود. سختی را می توان با نظریه برخورد هرتز، وقتی که خواص فیزیکی مانند مدول یانگ و نسبت پواسون مشخص است، محاسبه کرد. به استثنای سختی محاسبه شده توسط تئوری هرتز، یک روش مبتنی بر سختی تجربی در بعضی شرایط که در زیر توضیح داده شده اجتناب ناپذیر است. انتظار می رود که سختی ذرات تقریبی، کوچک تر از ذرات واقعی باشد. بنابراین باید مقدار سختی مشخصی را فرض کرد. با توجه به نظریه برخورد هرتز، رابطه بین نیروی نرمال δ_n و جابه جایی P_n ، توسط رابطه زیر داده شده است:

$$P_n = K_n \delta_n^{3/2} \quad (23)$$

در مورد دو ذره کره یک اندازه (شعاع r_s)، K_n توسط رابطه زیر بیان شده است:

روی ذرات آزاد شده در مایع تاثیر دارد. نیروی اولیه عمدتاً به دلیل گرادیان فشار ناشی از عبور مایع از بستر می باشد. نیروی دوم کشش (درگ) مایع است که می تواند با روش استاندارد براساس ضریب درگ محاسبه شود. برای فرمول بندی، همان طور که در "شکل 8" نشان داده شده است، میدان جریان به قسمتهایی به طول Δz تقسیم می شود.

در صورت تشکیل پلاگین، قسمت مقطع برش پر از ذره است. به طور کلی، دو قسمت فوق در مقطع برش وجود دارند. باید قسمت های بدون ذره و دارای ذره را به صورت A_e و A_d قسمت بندی کرد. نیروی مایع وارد بر روی یک ذره درون بستر به وسیله رابطه زیر داده می شود:

$$F_D = (dp/dz)\Delta z A_d / N \quad (32)$$

که dp/dz برابر گرادیان فشار و N تعداد ذرات در بستر فرض شده می باشد. گرادیان فشار به صورت زیر بیان می شود:

$$\frac{dp}{dz} = \frac{4\zeta}{d_s} \frac{1}{2} \rho (U_d - V_s)^2 \quad (33)$$

که ζ ضریب افت فشار، U_d سرعت ظاهری مایع در بستر و V_s سرعت متوسط ذرات در قطعه است. ضریب ζ را می توان از معادله ارگان¹ به صورت زیر به دست آورد:

$$\zeta = \frac{1 - \epsilon}{2\epsilon^3} \left(150 \frac{1 - \epsilon}{Re_d} + 1.75 \right) \quad (34)$$

$$Re_d = d_p (U_d - V_s) / \nu \quad (35)$$

که ν ویسکوزیته سینماتیک مایع است. فرض بر این است که فشار مایع در بخش کانال ثابت باشد. بنابراین، افت فشار معادله بالا در بستر ناشی از دست دادن اصطکاک در ناحیه بدون ذره بالای بستر است. گرادیان فشار در ناحیه بدون ذره به صورت زیر به دست می آید:

$$\frac{dp}{dz} = \frac{\lambda}{D_h} \frac{1}{2} \rho U_e^2 \quad (36)$$

که λ برابر ضریب اصطکاک جریان لوله است و از فرمول بلازیوس استفاده شود داریم:

$$\lambda = \frac{0.3164}{Re^{1/4}} \quad (37)$$

که Re برابر عدد رینولدز $U_e D_h / \nu$ می باشد. مجموعه معادلات بالا فرمول اصطکاک برای جریان داخل لوله است. در این مورد، قطر هیدرولیکی به عنوان D_h استفاده می شود، زیرا بخش بدون ذره به علت وجود بستر ذره ای

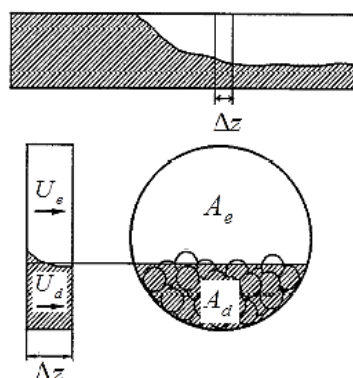


Fig. 8 Cross section of the channel to display two parts of the flow, Part of the accumulated particle and the other part with low particles

شکل 8 برش عرضی کانال جهت نمایش دو قسمت جریان، قسمت انباشته شده از ذرات و دیگری قسمتی با ذرات کم

$$AU = A_0 U_0 + A_d U_d \quad (38)$$

که A سطح مقطع لوله و U سرعت حجم مشخص است. توسط حل معادلات (33) و (38)، سرعت U_e ، U_d و گرادیان فشار dp/dz به دست می آید. در محاسبات فعلی، طول Δz برابر اندازه قطر ذره d_p است. همچنین با توجه به آشفتگی بودن جریان، اثرات آشفتگی و نوسانات سرعت بر روی حرکت ذرات در مدل شبیه سازی گردابه های بزرگ نیز به کد استفاده شده در این فوم افزوده شده است.

5-3- صحت سنجی

برای اعتبار سنجی روش اویلری-لاگرانژی از مقاله فسفر و همکاران [14] استفاده شده است، به این منظور هندسه "شکل 9" و با مشخصات، ارتفاع پله $U_0 = 0$ و $L_V = 5h$ ، $L_D = 35h$ ، $h = 40$ (mm)، $H = 26.7$ (mm) و 10.5 (m/s) ایجاد شده است.

یک پله روبه عقب حاوی ذره چگال با یک جریان ورودی کانال به صورت کاملا توسعه یافته مورد بررسی قرار گرفته است. این جریان ایده آل برای مطالعه تعاملات آشفتگی ذرات است، زیرا نتایج آشفتگی جریان میانی کانال، با حضور ذرات، تغییر می یابد [28]. این امر برای اطمینان از این که تغییرات مشاهده شده در آشفتگی ناشی از حضور ذرات بوده، ضروری است، زیرا جریان های جدا شده در جریان بالادست، به پروفیل سرعت متوسط بسیار حساس هستند (به بررسی های ایتون و جانسون² و سیمسون³ توجه کنید [30,29]).

اهداف مشخص تحقیق فسفر و همکاران [14] این بوده است که تغییر آشفتگی فاز گاز و رفتار ذرات در مناطق جدایش، اتصال مجدد جریان و مناطق توسعه یافته مسئله پله روبه عقب را بررسی کند. در این مطالعه از سه نوع ذره مختلف، ذرات شیشه ای $90\mu m$ و $150\mu m$ و ذرات مس $70\mu m$ ، دو عدد استوکس و سه عدد رینولدز مختلف ذرات، استفاده شده است. سرعت های فاز گاز در حضور ذرات، برای بارگذاری های جرمی $(\dot{m}_p / \dot{m}_{air})$ این ذرات از 3 تا 40 درصد، اندازه گیری شده است [14]. عدد رینولدز حرکت ذرات، به شکل زیر تعریف می شود:

$$Re_p = \frac{d_p U_{rel}}{\nu} \quad (39)$$

که در این رابطه d_p قطر ذره، ν ویسکوزیته سینماتیک سیال و U_{rel} مقیاس سرعت مشخصی برای سرعت متوسط لغزش ذرات نسبت به جریان است. برای آزمایش کنونی، بهترین انتخاب برای تشخیص سرعت متوسط لغزش ذرات، سرعت متوسط مایع در حال نوسان است. هر سه اندازه ذره دارای عدد استوکس نسبتا زیاد بودند، بنابراین آن ها برای حرکت لحظه ای

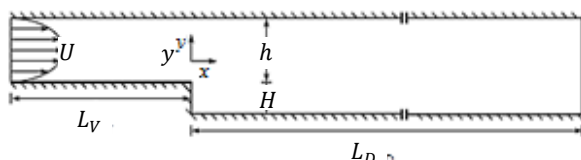


Fig. 9 The geometry general form of the step problem for the verification of the Eulerian-Lagrangian method

شکل 9 نمای کلی هندسه مسئله پله برای صحت سنجی روش اویلری-لاگرانژی

² Johnston

³ Simpson

¹ Ergun



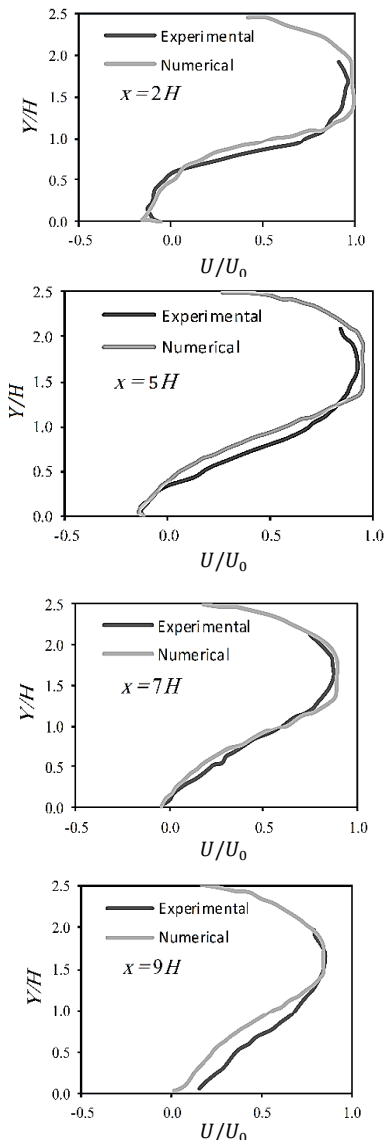
Fig. 11 The volume ratio of particles to the fluid around (gas) after one second in the step problem

شکل 11 نسبت حجمی ذرات به سیال پیرامون (گاز) پس از گذشت زمان یک ثانیه در مسئله پله

5 مقطع با نتایج آزمایشگاهی مقایسه گردید (شکل 12). همان گونه که مشاهده می شود مطابقت خوبی بین نتایج به دست آمده با نتایج آزمایشگاهی وجود دارد.

4- نتایج روش ترکیبی اویلری-اویلری و لاگرانژی

در این مسئله ذرات کوچک تر از 12 میکرون با روش اویلری-اویلری و ذرات 12 تا 200 میکرون با روش اویلری-لاگرانژی به کانال ساده مسئله اولیه



سیال مناسب نیستند. همچنین، همان طور که مشاهده می شود، سرعت متوسط لغزش بین سیال و ذرات در اکثر مناطق جریان، کوچک است. بنابراین، سرعت سیال یا ذره r.m.s یک مقیاس مناسب برای اختلاف سرعت لحظه ای است. در جریان فعلی، این مقادیر با یک میانگین در حدود (ms^{-1}) 1.2 برابر هستند. این مقدار سرعت برای محاسبه عدد رینولدز مشخص شده برای هر سه نوع ذره انتخاب شده است. عدد استوکس برابر نسبت زمان عکس العمل ذرات به زمان نماینده (مرجع) در جریان است.

$$St = \frac{\tau_p}{\tau_f} \quad (40)$$

برای ذرات کوچک با عدد رینولدز ناچیز، استوکس نشان داد که ثابت زمانی ذره برابر رابطه زیر می باشد:

$$\tau_{p,Stokes} = \frac{(2\rho_p + \rho_f)d_p^2}{36\mu} \quad (41)$$

برای ذرات جامد در محیط گازی، تاثیر چگالی سیال ناچیز خواهد بود و ثابت زمانی استوکسی به صورت زیر ساده می شود:

$$\tau_{p,Stokes} = \frac{\rho_p d_p^2}{18\mu} \quad (42)$$

که ρ_p برابر چگالی ذره، d_p برابر قطر ذره و μ ویسکوزیته جنبشی می باشد. هرچند، این تعریف ثابت زمانی، تنها برای جریان خزشی کاملاً درست است و تغییر ثابت زمانی ذره برای عدد رینولدز بالا، برای ذرات موجود مهم است. ضریب درگ، C_D ، می تواند برای اعداد رینولدز بالای 700 صحیح باشد، و مطابق رابطه زیر به دست آید:

$$C_D = \frac{24}{Re_p} [1 + 0.15Re_p^{0.687}] \quad (43)$$

افزایش ضریب درگ به دلیل افزایش عدد رینولدز، ثابت زمانی ذرات را کاهش می دهد [27]. بنابراین ثابت زمانی تغییر یافته در این مطالعه برابر است با:

$$\tau_p = \frac{\tau_{p,Stokes}}{[1 + 0.15Re_p^{0.687}]} \quad (44)$$

اندازه زمان سیال انتخاب شده، τ_f ، براساس فرکانس عبور گردابه تقریباً بزرگ، در لایه برشی جدا شده، بوده است.

$$\tau_f = \frac{5H}{U_0} \quad (45)$$

که H برابر ارتفاع پله و U_0 سرعت خط مرکزی کانال است. فرکانس غالب در این حالت توسط اندازه گیری های طیفی تک فاز و مطالعات تجربی تک فاز ایتون و جانسون [29] و بیتهاچارجی، اسپیک و تروت [31] به دست آمده است.

برای اعتبارسنجی روش عددی کار حاضر، از نتایج آزمایش فسلر و همکاران [14] استفاده گردید. محل قرارگیری ذرات و نسبت حجمی ذرات به سیال پیرامون (گاز) پس از گذشت زمان یک ثانیه به ترتیب در "شکل های 10 و 11" نشان داده شده است. در این مسئله برای شبیه سازی عددی این مسئله از کد نرم افزار متن باز این فوم استفاده گردید. پروفایل های سرعت در



Fig. 10 Particle placement after passed one second in the step problem

شکل 10 محل قرارگیری ذرات پس از گذشت زمان یک ثانیه در مسئله پله

¹ Bhattacharjee, Scheelke & Troutt

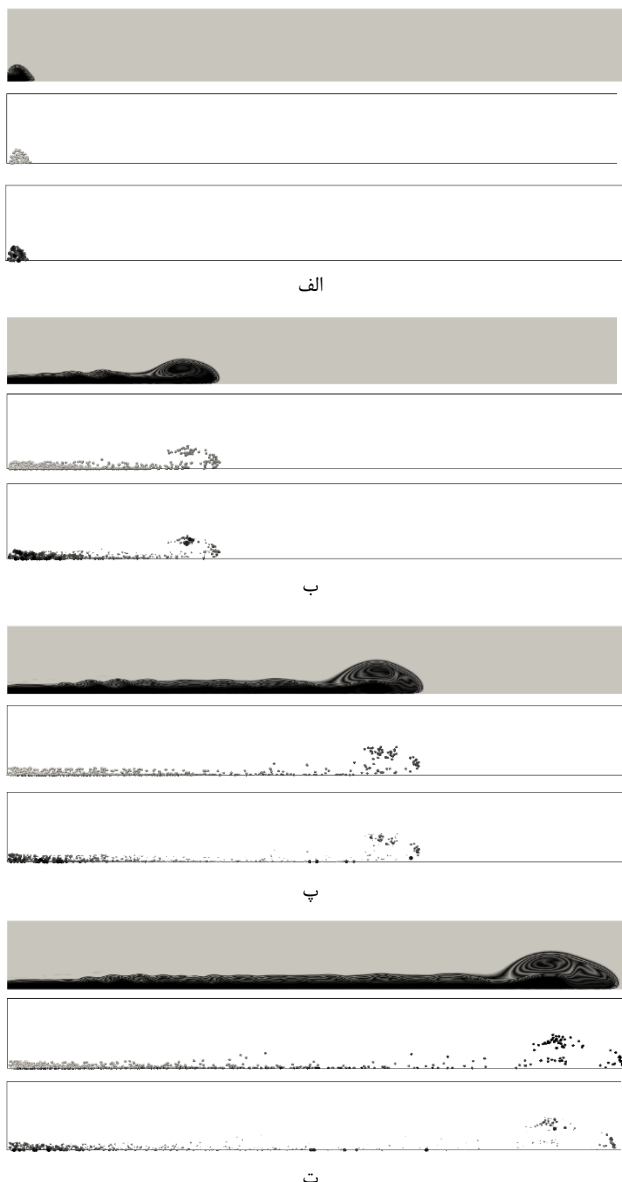


Fig. 13 The first images refer to particles smaller than 12 microns, which are solved by the Eulerian-Eulerian method. Second and third images relate to larger particles simulated by the Eulerian-Lagrangian method. In the second picture, the dimensions of the same particles are displayed and their color shows the age and the third image is related to their dimensions. (a) 1 second (b) 10 second (c) 20 second (d) 30 second

شکل 13 تصاویر اول مربوط به ذرات کوچکتر از 12 میکرون است که به روش اویلری-اویلری حل شده‌اند. تصاویر دوم و سوم مربوط به ذرات بزرگتر است که به روش اویلری-لاگرانژی شبیه سازی شده‌اند. در تصویر دوم ابعاد ذرات یکسان نمایش داده شده‌اند و رنگشان، سن آن‌ها را نمایش می‌دهد و تصویر سوم مربوط به ابعاد آن‌ها است. (الف) 1 ثانیه (ب) 10 ثانیه (پ) 20 ثانیه (ت) 30 ثانیه



Fig. 14 An image of the input that indicates that larger particles are deposited slightly at the entrance

شکل 14 تصویری از ورودی که نشان می‌دهد ذرات بزرگتر در درفاصله کمی از ورودی ته نشین می‌شوند

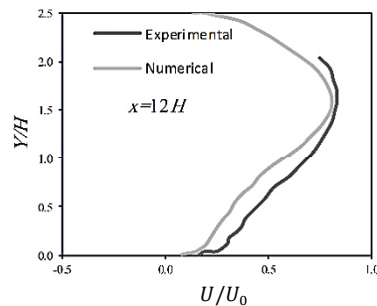


Fig. 12 Comparison of speed profiles numerical results with laboratory results for Eulerian-Lagrangian method verification

شکل 12 مقایسه پروفایل‌های سرعت نتایج حل عددی با نتایج آزمایشگاهی جهت صحت‌سنجی روش اویلری-لاگرانژی

افزوده شده است. تمام مشخصات هندسی کانال همانند مسئله اولیه حفظ شده است. در این حالت هر دو معادلات اویلری-اویلری و اویلری-لاگرانژی به صورت کوپل حل شده‌اند. تصویر "شکل 13" مربوط به زمان‌های 1، 10، 20 و 30 ثانیه از جریان می‌باشد. تصویر الف غلظت ذرات کوچکتر از 12 میکرون را نمایش می‌دهد، تصویر ب ذرات بزرگتر که جریان چگال با خود حمل می‌کند را به نمایش می‌گذارد، رنگ ذرات، سن و زمان حضور آن‌ها را در کانال نمایش می‌دهد. ابعاد ذرات در تصویر ب تاثیر داده نشده است و تمامی آن‌ها با ابعاد یکسان نمایش داده شده‌اند و در تصویر پ ابعاد ذرات در نمایش آن‌ها در نظر گرفته شده است. برای نمایش بهتر ذرات، ابعاد آن‌ها بسیار بزرگتر از ابعاد واقعی آن‌ها به تصویر کشیده شده است.

همان گونه که قابل پیش‌بینی بود، ذرات بزرگتر در نزدیکی ورودی ته نشین می‌شوند و ذرات کوچکتر تا زمان بیشتری با جریان همراه می‌شوند (طبق شکل 14).

در نتایج اویلری-اویلری، جریان چگال حاوی ذرات بسیار بزرگ، حدود 100 میکرون به علت وزن و سرعت سقوط بیشتر با سرعت بالایی ته نشین شده و جریان چگال عملاً مستهلک شده و از فاصله مشخصی از ورودی، پیشتر نمی‌رود، در این نتایج نیز می‌توان نتیجه به دست آمده را راستی آزمایی نمود، در "شکل 15" فقط ذرات 100 میکرون و بزرگتر به نمایش درآمده است، همان گونه که مشاهده می‌شود.

با نتایج اویلری-اویلری که در پایین تصویر آمده (شکل 15) و مربوط به کف کانال می‌باشد، مطابقت دارد و همان گونه که نتایج اویلری-اویلری، سیال چگال حاوی ذرات بزرگ بعد از گذشت مسافت مشخص متوقف می‌شود در این نتایج نیز همان گونه است. تنها تفاوت در ذرات است که در هد سیال چگال مشاهده می‌شود. در روش اویلری-لاگرانژی تعدادی ذرات بزرگ در هد جریان مشاهده می‌شود که به علت گردابه هد جریان تا مسافت زیادی با جریان همراه می‌شود.

5- نتیجه گیری

زیر مجموعه مهمی از جریان‌های چگال، به دلیل حضور تعداد زیادی از ذرات جامد در سیال، ایجاد می‌شوند. این نوع جریان‌های چگال به دلیل ته نشینی این ذرات معلق، از نوع جریان‌های ناپایدار می‌باشند، چرا که با ته نشینی این ذرات، اخلاف چگالی از بین رفته و جریان چگال مستهلک شده و از حرکت باز می‌ایستد.

برای شبیه سازی این نوع جریان‌ها، اغلب از روش اویلری-اویلری استفاده می‌شود، مزیت مهم این نوع دیدگاه زمان پردازش پایین این روش می‌باشد. با

instability, *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 418, No. 1, pp. 213-229, 2000.

[6] Q. Wang, K. D. Squires, Large eddy simulation of particle-laden turbulent channel flow, *Physics of Fluids*, Vol. 8, No. 5, pp. 1207, 1996.

[7] M. D. Patterson, J. Simpson, S. Dalziel, N. Nikiforakis, Numerical modelling of two-dimensional and axisymmetric gravity currents, *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, Vol. 47, No. 10-11, pp. 1221-1227, 2005.

[8] S. K. Ooi, G. Constantinescu, L. Weber, Numerical simulations of lock exchange compositional gravity current, *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 635, pp. 361-388, 2009.

[9] S.K. Ooi, G. Constantinescu, L. J. Weber, 2D Large-Eddy Simulation of lock-exchange gravity current flows at high Grashof numbers, *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 133, No. 3, pp. 1037-1047, 2007.

[10] S. K. Ooi, G. Constantinescu, L. Weber, A numerical study of intrusive compositional gravity currents, *Physics of Fluids*, Vol. 19, No. 7, pp. 076602-076602-14, 2007.

[11] 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*, Vol. 138, No. 1, pp. 57-70, 2011.

[12] M. Nasr-Azadani, E. Meiburg, Turbidity currents interacting with three-dimensional seafloor topography, *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 745, pp. 409-443, 2014.

[13] L. Ottolenghi, C. Adduce, R. Inghilesi, V. Armenio, F. Romon, Entrainment and mixing in unsteady gravity currents, *Journal of Hydraulic Research*, Vol. 54, No. 5, pp. 541-557, 2016.

[14] J. R. Fessler, J. K. Eaton, Turbulence modification by particles in a backward-facing step flow, *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 394, pp. 97-117, 1999.

[15] G. Hetsroni, Particles-turbulence interaction, *International Journal of Multiphase Flow*, Vol. 15, No. 5, pp. 735-746, 1989.

[16] R. A. Gore, C. T. Crowe, Modulation of turbulence by dispersed phase, *Journal of Fluids Engineering*, Vol. 113, No. 2, pp. 304-307, 1991.

[17] Y. Yang, J. N. Chung, T. R. Troutt, C. T. Crowe, The influence of particles on the spatial stability of two-phase mixing layers, *Physics of Fluids A 2*, Vol. 2, No. 10, pp. 1839-1845, 1990.

[18] A. A. Mostafa, H. C. Mongia, V. G. McDonell, G. S. Samuelsen, Evolution of particle-laden jet flows: A theoretical and experimental study, Vol. 27, No. 2, *AIAA*, pp. 167-183, 1989.

[19] S. K. Ooi, G. Constantinescu, L. Weber, Numerical simulations of lock-exchange compositional gravity current, *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 635, pp. 361-388, 2009.

[20] J. Paik, A. Eghbalzadeh, F. Sotiropoulos, Three-Dimensional unsteady RANS modeling of discontinuous gravity currents in rectangular domains, *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 135, No. 6, pp. 505-521, 2009.

[21] P. Moin, J. Kim, Numerical investigation of turbulent channel flow, *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 118, pp. 341-377, 1982.

[22] A. Peer, A. Gopaul, M. Dauhoo, M. Bhuruth, A new fourth-order non-oscillatory central scheme for hyperbolic conservation laws, *Applied Numerical Mathematics*, Vol. 58, No. 5, pp. 674-688, 2008.

[23] F. Necker, C. Härtel, L. Kleiser, E. Meiburg, High-resolution simulations of particle-driven gravity currents, *International Journal of Multiphase Flow*, Vol. 28, No. 2, pp. 279-300, 2002.

[24] T. H. Ellison, J. S. Turner, Turbulent entrainment in stratified flows, *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 6, No. 3 pp. 423-448, 1959.

[25] M. Garcia, G. Parker, Experiments on the entrainment of sediment into suspension by a dense bottom current, *Journal of Geophysical Research*, Vol. 98, No. 3, pp. 4793-4807, 1993.

[26] P. A. Cundall, O. D. Strack, A discrete numerical model for granular assemblies, *Geotechnique Journal*, Vol. 29, No. 1, pp. 47-65, 1979.

[27] M. Saidi, H. Basirat Tabrizi, J. R. Grace, C. J. Lim, Hydrodynamic investigation of gas-solid flow in rectangular spout-fluid bed using CFD-DEM modeling, *Powder Technology*, Vol. 284, No. 2, pp. 355-364, 2015.

[28] J. D. Kulick, J. R. Fessler, J. K. Eaton, Particle response and turbulence modification in fully developed channel flow, *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 277, pp. 109-134, 1994.

[29] J. K. Eaton, J. P. Johnston, Turbulent flow reattachment: An experimental study of the flow and structure behind a backward-facing step. *Mechanical Engineering Department. Rep. MD-39*. Stanford University, Stanford, California, 1980.

[30] R. L. Simpson, Aspects of turbulent boundary-layer separation, *Progress in Aerospace Sciences*, Vol. 32, No. 5, pp. 457-521, 1996.

[31] T. Troutt, S. Bhattacharjee, B. Scheelke, Modification of vortex interactions in a reattaching separated flow, *The American Institute of Aeronautics and Astronautics Journal*, Vol. 24, No. 4, pp. 623-629, 1986.

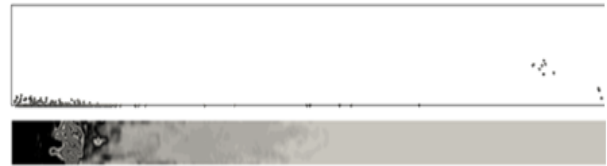


Fig. 15 Match the particle deposition pattern larger than 100 microns in the Eulerian-Eulerian and Eulerian-Lagrangian methods.

شکل 15 مطابقت الگوی رسوب ذرات بزرگتر از 100 میکرون به روش اویلری-اویلری و اویلری-لاگرانژی

افزودن ترم سقوط ذرات به معادله غلظت در این روش نیز شاهد استهلاک جریان خواهیم بود. در اکثر پدیده‌های طبیعی طیف گسترده‌ای از ذرات با ابعاد و خواص متفاوت در جریان چگال حضور دارند و برای شبیه‌سازی این نوع جریان‌ها باید برای هر یک، معادله غلظت جداگانه‌ای را به معادلات افزود که با بی‌شمار شدن تنوع ذرات عملاً این روش توجیه زمان پایین پردازش خود را از دست می‌دهد.

از طرفی، روش اویلری-اویلری الگوی رسوب و مسیر حرکت ذرات را به ما نمی‌دهد و از برهم کنش آن‌ها صرف‌نظر می‌گردد. بنابراین این روش برای مسائلی با تنوع بالای خواص فیزیکی ذرات و زمانی که سرعت سقوط ذرات و فرآیندها ته‌نشینی محسوس باشد، روش اویلری-اویلری روش مطلوبی نمی‌باشد ولی احتساب تمام ذرات نیز به روش اویلری-لاگرانژی حجم پردازش را به شدت افزایش می‌دهد. با توجه به نتایج به‌دست آمده مشخص گردید زمانی که ابعاد ذرات کوچک‌تر از 12 میکرون باشد، فرآیندها رسوب‌گذاری، محسوس نمی‌باشد و می‌توان از اثر ابعاد ذرات چشم پوشی نمود و روش اویلری-اویلری روش مناسبی محسوب می‌شود.

در نتیجه، با جدا نمودن ذرات درشت و ریز و محاسبه آن‌ها با دو روش متفاوت، از مزیت هر دو دیدگاه استفاده گردید. ذرات ریز با معادله غلظت و طیفی از ذرات 12 تا 200 میکرون به روش اویلری-لاگرانژی به مسئله افزوده گردید و نتایج قابل قبولی به‌دست آمد. بنابراین، این ایده می‌تواند راه‌حلی باشد برای جبران نقاط ضعف دو روش اویلری-اویلری و اویلری-لاگرانژی و این دو دیدگاه می‌توانند، برای کسب نتایجی قابل قبول و با زمان پردازشی بهینه، مکمل یکدیگر باشند.

6- مراجع

[1] Z. He, P. Hu, H. Ho, Y. Lin, Hydrodynamics of gravity currents down a ramp in linearly stratified environments, *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 20, No. 3, pp. 3-6, 2016.

[2] S. Chamoun, G. De Cesare, A. J. Schleiss, Venting of turbidity currents approaching a rectangular opening on a horizontal bed, *Journal of Hydraulic Research*, Vol. 0, No. 0, pp. 1-15, 2017.

[3] C. Hartel, E. Meiburg, F. Necker, Vorticity dynamics during the start-up phase of gravity currents, *Nuovo Cimento-Societa Italiana Di Fisica Sezione Civile*, Vol. 22, No. 6, pp. 823-834, 1999.

[4] C. Hartel, E. Meiburg, F. Necker, Analysis and direct numerical simulation of the flow at a gravity-current head Part 1: Flow topology and front speed for slip and no-slip boundaries, *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 418, No. 7, pp. 189-212, 2000.

[5] C. Hartel, F. Carlsson, M. Thunblom, Analysis and direct numerical simulation of the flow at a gravity-current head Part 2: The lobe-and-cleft