

بررسی عددی تأثیر مدل‌های آشفته‌گی و عدد استوکس بر رفتار نانوذرات در جریان آشفته پشت پله به‌روش اویلری - لاگرانژی

عطیه فرخ (دانشجوی کارشناسی ارشد)

میراعلم مهدی* (دانشیار)

دانشکده‌ی مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی

مهندسی مکانیک شریف (بهار ۱۴۰۳)
دوره‌ی ۴۰، شماره‌ی ۱، صص. ۴۷-۶۰، (پژوهشی)

در این مقاله، جریان آشفته هوا شامل، نانوذرات مس در جریان پشت پله با استفاده از روش دینامیک سیالات محاسباتی (CFD) به‌روش اویلری - لاگرانژی شبیه‌سازی می‌شود. این شبیه‌سازی به دوصورت دوبعدی و سه‌بعدی با استفاده از نرم‌افزارهای CFX و FLUENT انجام و نتایج به‌دست آمده با یکدیگر و با نتایج تجربی گزارش شده در مطالعات پیشین به‌عنوان مثال مطالعه گریفزو مقایسه می‌گردد. در مدل‌سازی از کوپل دوراهه بین سیال پیوسته هوا و فاز گسسته نانوذرات استفاده و اثرات نیروهای برای ساغمن، گرادیان فشار و اثرات آشفته‌گی بر روی نانوذرات لحاظ می‌شود. نتایج عددی حاصل از مدل‌های اویلری - لاگرانژی و مدل تک‌فاز در حالت‌های پایا و گذرا نیز با یکدیگر مقایسه می‌گردد. مطابق نتایج حاصل، ماکزیمم خطا در روش تک‌فاز برابر با ۲۵ درصد و در روش اویلری - لاگرانژی برابر ۱۹ درصد است. در ادامه، اثرات مدل آشفته‌گی بر حرکت ذرات و برحسب قطرهای مختلف ۱۰، ۲۰، ۳۵، ۵۰، ۷۰، ۱۰۰ و ۲۰۰ میکرومتر و همچنین ترتیب جفت شدن بین فاز حامل پیوسته و فاز پراکنده مورد بررسی قرار می‌گیرد. بررسی اثر قطر ذره بر مسیر حرکت و رفتار ذرات و مطالعه تأثیر عدد استوکس بر حضور ذرات در گردابه ایجاد شده در پشت پله، بخش بعدی این پژوهش است. بررسی نتایج نشان می‌دهد که عدد استوکس و مدل آشفته‌گی تأثیر قابل ملاحظه‌ای بر حرکت ذرات پشت پله را دارند. ذراتی که دارای عدد استوکس کوچکتر از ۱/۲ (معادل قطر ۳۵ میکرومتر در این مطالعه) باشند، حضور گردابه را حس کرده و وارد گردابه می‌شوند. از بین مدل‌های آشفته‌گی کمترین خطا برای مدل SST برابر با ۶/۲۵ بیشترین خطا برای مدل $K\epsilon$ استاندارد برابر با ۱۸/۷۵ می‌باشد.

واژگان کلیدی: نانوسیال، مدل آشفته‌گی، روش اویلری-لاگرانژی، جریان پشت پله، فلوئنت، سی‌اف - ایکس.

atie.farrokh@yahoo.com
m.mahdi@sru.ac.ir

۱. مقدمه

سیالات محاسباتی (CFD) امکان حصول بینشی در مورد طیف گسترده‌ای از جریان‌های سیال را ارائه می‌دهد. در سال‌های اخیر، مدل‌های CFD برای شبیه‌سازی دقیق برهمکنش ذره‌سیال و همچنین ذره‌ذره را در جریان‌های آرام یا آشفته توسعه یافته است.

مطابق پژوهش کرو و همکاران^[۱] دو رویکرد متداول برای توصیف خواص جریان پر از ذرات وجود دارد که عبارتند از: مدل دو سیال اویلری^[۲] براساس

جریان‌های شامل ذرات پراکنده در بسیاری از کاربردهای صنعتی مانند انتقال پنوماتیک، جداسازی ذرات از سیال پایه یافت می‌شوند.^[۱] به‌منظور طراحی، بهینه‌سازی یا ارتقای مقیاس چنین فرایندها و مکانیزم‌های مربوطه، پیش‌بینی دقیق جریان‌های سیال پیچیده با کمک شبیه‌سازی عددی، مورد توجه ویژه مهندسان قرار گرفته است. دینامیک

* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۱۴۰۱/۱۱/۲، اصلاحیه ۱۴۰۲/۲/۹، پذیرش ۱۴۰۲/۳/۹.

استاد به این مقاله:

فرخ، عطیه و مهدی، میراعلم، ۱۴۰۳. بررسی عددی تأثیر مدل‌های آشفته‌گی و عدد استوکس بر رفتار نانوذرات در جریان آشفته پشت پله به‌روش اویلری - لاگرانژی. مهندسی مکانیک شریف، ۴۰(۱)، صص. ۴۷-۶۰. DOI:10.24200/J40.2023.61626.1665

رویکرد اویلری - اویلری (E-E) و مدل مسیر لاگرازی^[۱۲] براساس رویکرد اویلری - لاگرازی (E-L). مسیر ذرات با ادغام معادلات حرکت ذرات در مدل مسیر لاگرازی محاسبه می‌شود. مدل اویلری - اویلری مبتنی بر فرض پیوستگی برای فاز ذره است. پیاده‌سازی و حل معادلات ذرات با همان روش‌های عددی فاز سیال آسان می‌باشد. با این وجود، فرض پیوسته بودن ذرات چندان با فیزیک واقعی سازگار نیست و این رویکرد نمی‌تواند به‌درستی ویژگی‌های خاصی را که شامل اثرات زمان هستند، پوشش دهد.^[۱۵] در رویکرد E-L، ذرات به‌عنوان اجسام مجزا در چارچوب مرجع لاگرازی در نظر گرفته می‌شوند و حرکت یک ذره منفرد در حین حرکت در میدان جریان، دنبال می‌شود. به‌دلیل مشکل در تحمیل اثر آشفتگی فاز سیال بر حرکت و واکنش ذرات، این رویکرد قادر است در بررسی نیروهای مختلفی از جمله نیروی پسا، نیروی برخورد و نیروی جاذبه و غیره را که بر ذرات وارد می‌کنند، رفتار گسسته ذرات و اثرات زمان ذرات را در نظر بگیرد. بنابراین، هر دو روش دارای مزایایی هستند و معمولاً در محاسبه جریان‌های دوفازی مورد استفاده قرار می‌گیرند. انتخاب یک مدل خاص به ساختار جریان و نوع اطلاعاتی که قرار است استخراج شود، بستگی دارد. در مطالعه حاضر، رویکرد اویلری - لاگرازی برای پیش‌بینی میدان جریان ذرات و ردیابی حرکت ذرات اتخاذ شده است.

شبیه‌سازی عددی فاز پیوسته با محاسبه میانگین آماری خواص جریان که در آن ویژگی‌های مکانی - زمانی ساختارگردابی آشفته با میانگین زمانی فیلتر می‌شوند تا معادلات جریان متوسط به‌دست آید. این روش، به روش میانگین ناویر استوکس رینولدز معروف است.^[۱۶] وقتی ذرات در جریان میانگین مجموعه پیش‌بینی شده دنبال می‌شوند، اثر گرداب‌ها وجود ندارد و باید توسط مدل‌های تجربی در نظر گرفته شود. در حال حاضر، مدل‌های محاسباتی متعددی که برای شبیه‌سازی حرکت ذرات استفاده می‌شوند، از روش ذرات لاگرازی تصادفی استفاده می‌کنند. این مدل‌ها شامل مدل‌های جریان جدا شده قطعی (DSF)،^[۱۷] مدل‌های جریان جدا شده تصادفی (SSF)،^[۱۸] مدل‌های پراکندگی همبسته با زمان^[۱۹] و مدل‌های انتشار تابع چگالی احتمال^[۱۰] (PDF) می‌باشند. با این وجود، در این مدل‌ها، تأثیر گرداب‌ها بر ذرات صرفاً بر اساس قوانین تجربی است که به بهبود یا تأیید از طریق آگاهی از تأثیر واقعی گرداب‌ها بر حرکت ذرات نیاز دارد.

پیشرفت در تکنیک‌های کامپیوتری، پیش‌بینی جریان سیال را به‌کمک شبیه‌سازی گرداب‌ها ممکن نموده‌است که می‌تواند حداقل برخی از ویژگی‌های مکانی - زمانی ساختارهای گردابی آشفته را ارائه دهد. این مزیت کلیدی، این شبیه‌سازی‌ها برای بررسی مستقیم برهمکنش ذره گردابی است. روش دینامیک گردابی (VD)،^[۱۱] مدل تجزیه متعامد مناسب (POD)،^[۱۲] شبیه‌سازی گردابی بزرگ^[۱۳] (LES) و شبیه‌سازی عددی مستقیم (DNS)،^[۱۴] روش‌های رایج برای شبیه‌سازی سیال هستند. روش VD صرفاً برای نمایش دو بعدی مناسب است. مدل‌های POD نمی‌توانند به‌طور کمی، ساختارگردابی حل شده را برای مجموعه‌ای عمومی از شرایط مرزی و اولیه تعیین کنند. ساختارهای گردابی به‌طور کامل بدون هیچ‌گونه مدل‌سازی آشفتگی تجربی در DNS حل می‌شوند. با این وجود، این روش تنها برای جریان‌های ساده با اعداد رینولدز پایین به‌دلیل حجم زیاد محاسبات مناسب است. یک فیلتر فضایی پایین‌گذردر LES به معادلات ناویر استوکس اعمال می‌شود و معادلات فیلتر شده مستقیماً حل می‌شوند. این تکنیک، برای جریان‌های مهندسی با اعداد رینولدز کم تا متوسط بسیار امیدوارکننده است.

تیان و همکاران،^[۱۵] رفتار یک جریان گاز ذره رقیق را بر روی یک جریان پشت

پله توسط یک مدل ردیابی ذرات لاگرازی و یک مدل اویلری - اویلری، مورد مطالعه قرار دادند. آنها دریافتند که مدل $k - \epsilon$ RNG و مدل $k - \epsilon$ ارائه شده توسط شیه و همکاران،^[۱۶] نتایج بهتری نسبت به مدل استاندارد $k - \epsilon$ دارد. مدل اویلری در مقایسه با نتایج تجربی، نتایج بسیار دقیق‌تری نسبت به مدل لاگرازی ارائه کرد. شبیه‌سازی عددی دوبعدی و جریان آشفته دوفازی بر روی یک جریان پشت پله در مطالعه یو انجام شده است.^[۱۷] میانگین‌های آماری مرتبه اول مانند پروفیل‌های طول اتصال مجدد و میانگین سرعت با نتایج تجربی مطابقت خوبی داشتند. اما میانگین آماری مرتبه دوم مانند پروفیل‌های نوسان سرعت مورد مطالعه قرار نگرفت. برخی از نتایج و مقایسه‌ها را می‌توان در مقالات یو^[۱۸-۲۱] یافت. مطابق با مطالعه مهدوی،^[۲۲] برای شبیه‌سازی نانو سیال با استفاده از روش DPM، برای لحاظ شدن تمام حرکت‌های مماسی و شعاعی ذره و حصول نتایج دقیق‌تر (حتی در صورت امکان استفاده از تقارن محوری)، باید از روش ۳ بعدی استفاده کرد. هنگامی که از روش DPM استفاده می‌شود، با وجود افت فشار نمی‌توان از نیروی گرانش صرف‌نظر کرد. این روش برای کسر حجمی کمتر از ۳ درصد برای شبیه‌سازی انتقال حرارت و افت فشار جریان آرام نانو سیال برای هر نوع ذره و قطر ذره قابل قبول است، ولی برای کسر حجمی‌های بالاتر به‌دلیل وقوع پدیده‌هایی مثل خوشه‌بندی و رسوب روش ضعیفی محسوب می‌شود. کومار و پیورایک^[۲۳] پیشنهاد کردند برای جریان آشفته نانو سیال (به‌همراه انتقال حرارت همرفتی) تا درصد حجمی ۵٪ این روش قابل اعتماد و برای درصد حجمی‌های بالاتر از مدل تک‌فاز استفاده می‌شود. نتایج مطالعات نشان می‌دهد که با افزایش در اندازه نانو ذرات، عدد ناسلت کاهش می‌یابد و هنگامی که در جریان آشفته از روش DPM استفاده می‌شود، نیروی درگ و گرانش دو نیروی غالب هستند. همچنین، کومار در مطالعاتی، هندسه مورد نظر را کمی پیچیده‌تر کرده و به بررسی رفتار نانو ذرات و تأثیر آن در خواص نانو سیال با استفاده از روش DPM پرداخت و نتیجه را با روش‌های دیگر و نتایج تجربی مقایسه کردند. مگنتی و همکاران^[۲۴] معتقد بودند که هندسه U شکل پیچیده‌ترین نوع هندسه است و بررسی‌های خود را روی میکروکانال‌های موازی انجام دادند و برای مدل‌سازی هندسه‌های مذکور، استفاده از مدل دوفاز غیرهمگن را معتبرتر دانسته و پیشنهاد کردند. نتیجه به‌دست آمده نشان می‌دهد که در موقعیت‌هایی که انتقال حرارت وجود دارد و غلظت کم است، اثرات مهاجرت ذرات ناشی از حرکت براونی، ترموفورسیس^۱ و گرادیان فشار یا تنش برشی منجر به تغییرات غیر بدیهی در غلظت ذرات می‌شود. مانع مثلثی شکل، هندسه‌ی دیگری بود که رشیدی و همکاران^[۲۵] جریان نانو سیال اطراف آن را شبیه‌سازی کردند و بیان کردند که فرض توزیع یکنواخت ذرات در مدل‌سازی تک‌فاز نتیجه‌ای غیر قابل اعتماد دارد و علت رد این روش برای شبیه‌سازی می‌باشد. نیروی براونی روی انتقال حرارت اثر بیشتری از نیروی ترموفورز دارد. افزایش پارامتر ترموفورز منجر به کاهش عدد ناسلت می‌شود. عدد ناسلت با افزایش کسر حجمی کاهش می‌یابد. کاهش قطر نانو ذرات منجر به افزایش پتانسیل انتقال گرمای همرفت طبیعی می‌شود. کامبیز وفایی و احمد البوجمال^[۲۶] با بررسی سه مدل تک‌فاز، گسسته و مخلوط برای دو حالت خاص ثابت و متغیر با دما نشان دادند که خواص متغیر با دما، بهبود در انتقال حرارت بالاتر و عدد ناسلت را برای نانو سیالات نشان می‌دهد و حداکثر انحراف بین تک‌فاز و DPM را ۵/۹٪ گزارش کردند و همچنین، اعلام نمودند که روش مخلوط هنگامی که خواص متغیر با دما در نظر گرفته شود، نتایج درستی ارائه نمی‌دهد. ورود نانو ذرات به سیال باعث افت فشار و افزایش تنش برشی دیواره و افزایش چشمگیر ضریب انتقال حرارت در سیال پایه می‌شود. رفتار نانو ذرات مخصوصاً میزان رسوب‌گذاری در زوایای مختلف یک لوله از افقی تا عمود بررسی دیگری بود که توسط مهدوی و همکاران^[۲۷] با

حرکت نامیده می‌شود. براساس قانون دوم نیوتون، برآیند نیروهایی که بر یک جسم اثر می‌کند برابر با تغییرات خالص مومنتوم می‌باشد:

$$\rho \frac{\partial \vec{V}}{\partial t} + \text{div}(\rho \vec{V} \vec{V}) = -\text{grad}P + \mu (\nabla^2 \vec{V}) + S_v \quad (2)$$

معادله انرژی:

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} + \text{div}(\rho \vec{V} C_p T) = k (\nabla^2 T) + S_h \quad (3)$$

که در آن V ، P ، T و t به ترتیب معرف بردار سرعت، فشار، دما و زمان هستند. علاوه بر این، ρ ، μ ، C_p و k به ترتیب بیانگر لزجت، چگالی، ظرفیت گرمایی و هدایت حرارتی برای هوا به عنوان فاز پیوسته هستند. توجه داشته باشید که S_v و S_h به ترتیب عبارات‌های مربوط به ترم چشمه تکانه و انرژی ذرات با سیال می‌باشند. این دو ترم به صورت زیر بیان می‌شوند: [۲۴]

$$S_v = \sum_{np} -\frac{m_p}{\delta V} \frac{dV_p}{dt} \quad (4)$$

$$S_h = \sum_{np} -\frac{m_p}{\delta V} C_p \frac{dT_p}{dt} \quad (5)$$

به طوری که t زمان و V_p و T_p سرعت و دما نانو ذرات و همچنین، m_p و np δV به ترتیب معرف جرم نانو ذرات، تعداد ذرات درون یک حجم سلول و حجم سلول می‌باشند.

معادلات فاز گسسته

معادله تعادل نیرو برای یک ذره مععلق در سیال، برای محاسبه مسیر ذرات استفاده می‌شود. نیروهای برهمکنش بین سیال و ذرات شامل نیروهای درگ، براونی و ترموفورتیک می‌باشد. نیروهای براونی و ترموفورتیک در اثر برخورد تصادفی مولکول‌های سیال به ذرات مععلق ایجاد می‌شوند. توجه داشته‌باشید که نیروی گرانش برای نانو ذرات بسیار کم است، مخصوصاً، در این مورد که قطر ذرات برابر با 10^6 نانومتر می‌باشد. برای ذرات با قطر بزرگتر از پنجاه نانومتر، نیروی گرانش ممکن است تأثیر کمی داشته باشد. بنابراین، در محاسبات از این نیرو صرف نظر می‌گردد. معادله حرکت یک فاز ذره به صورت زیر است: [۲۵]

$$\frac{dX_p}{dt} = V_p \quad (6)$$

$$\frac{dV_p}{dt} = F_D (V_f - V_p) + f_B + f_{th} \quad (7)$$

که در آن زیر نویس‌های f'' و P'' به ترتیب بیانگر سیال و ذره هستند. اولین عبارت در سمت راست معادله ۷، نیروی پسا می‌باشد که در اینجا از نیروی کشش استوکس کانینگهام استفاده شده است. بنابراین: [۲۴]

$$F_D = \frac{18 \mu_f}{d^2 \rho_p C_c} \quad (8)$$

به طوری که C_c ضریب تصحیح کانینگهام بوده و با رابطه زیر تعریف می‌شود:

$$C_c = 1 + \frac{2\lambda}{d} [1.257 + 0.4e^{-(1.1d/2\lambda)}] \quad (9)$$

λ معادل است با مسیر آزاد میانگین سیال و نیروی ترموفورتیک که به صورت زیر بیان می‌شود:

$$f_{th} = \frac{r_p \mu^* C_s}{\rho_f \rho_p d_p^2 (1 + r C_m K n)} \times \frac{(k_f / k_p + C_t + K n)}{(1 + r k_f / k_p + r C_t K n)} \times \frac{\nabla T}{T} \quad (10)$$

استفاده از روش اولبری - لاگراژی و نرم افزار فلونت انجام شد. نتایج ارائه شده توسط آنها نشان می‌دهد که برای حل معادلات انتقال حرارت در فلونت UDF حداکثر رسوب بین زاویه ۲۵ تا ۳۵ درجه و حداکثر ضریب انتقال حرارت بین زاویه ۳۰ تا ۴۵ درجه می‌باشد و نیروی واندروالسی بیشترین اثر را در رسوب گذاری دارد.

سعید و الدلیمی [۲۸] رویکرد تک فازی و چهار مجموعه مختلف از خواص ترموفیزیکی را برای مطالعه جریان آرام یک نانوسیال در یک لوله یکنواخت گرم شده به کار بردند. به طوریکه، مشخص شد که هر دو مدل وابسته به دما و مستقل از دما، خواص ترموفیزیکی نانوسیال‌ها می‌توانند به درستی رفتار نانوسیال‌ها را در طول جریان آرام شبیه سازی کنند. اوربیه و همکاران [۲۹] جریان‌های آرام و آشفته سه بعدی نانوسیال را در یک لوله یکنواخت گرم شده با استفاده از رویکرد تک فاز بررسی کردند و مشخص شد که ضریب انتقال حرارت با افزایش کسر حجمی افزایش می‌یابد، در شرایطی که ضخامت مرز حرارتی با افزایش کسر حجمی کاهش می‌یابد. بنابراین، نیازی به اعمال مدل‌های دوفازی برای توصیف رفتار نانوسیال نیست. تاسکسن و همکاران [۳۰] تأثیر هندسه کانال (دایره، مربع، مثلث و مستطیل) را بر رفتار ترموهیدرولیکی نانوسیال در طول جریان آرام مورد مطالعه قرار دادند. یک مدل تک فاز با خواص وابسته به دما، اعمال شد. افزایش انتقال حرارت با افزایش کسر حجمی مشاهده گردید که سطح مقطع دایره‌ای نسبت به سایر هندسه‌ها برتری داشت. ییلدیز و آکتورک [۳۱] از یک رویکرد تک فازی برای مطالعه جریان آشفته سه بعدی یک نانوسیال در داخل یک لوله یکنواخت گرم شده استفاده کردند. مدل استاندارد تلاطم $\epsilon - k$ با خواص وابسته به دما اعمال و افزایش قابل توجهی در عدد ناسلت و ضریب انتقال حرارت ثبت شد. با این وجود ضریب اصطکاک به طور قابل توجهی با افزایش کسر حجمی، افزایش یافت. بسیاری از محققان، تحقیقات بیشتر در مورد خواص ترموفیزیکی نانوسیالات را ضروری می‌دانند و در این زمینه باید محدودیت‌های تحقیقات تجربی را لحاظ نمود. [۳۲]

در این مطالعه، رفتار ذرات با قطره‌های مختلف در مرتبه میکرومتر در هندسه پشت پله مورد مطالعه قرار می‌گیرد. این مساله به صورت پایا و گذرا برای جریان آشفته به دو صورت دوبعدی و سه بعدی به کمک دو نرم افزار فلونت و CFX شبیه سازی شده و نتایج آن اعتبار سنجی گردید.

۲. مدل سازی ریاضی مساله

۲.۱. معادلات حاکم

معادلات فاز پیوسته

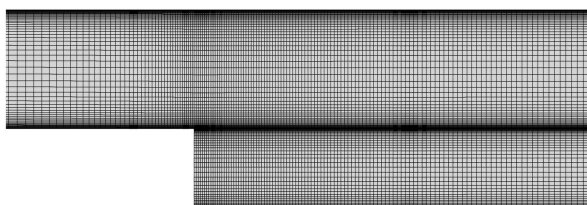
معادله پیوستگی

اصل بقای جرم، یک اصل اساسی در مکانیک سیالات است. طبق این اصل، جرم نه تولید می‌شود و نه از بین می‌رود. این اصل، در قالب معادله پیوستگی برای سیالات تراکم ناپذیر به صورت زیر تعریف می‌شود: [۲۳]

$$\text{div}(\rho \vec{V}) = 0 \quad (1)$$

معادله مومنتوم

تنها با داشتن معادله پیوستگی نمی‌توان رفتار مکانیکی سیالات را مشخص نمود و برای رسیدن به این هدف، باید معادلات مربوط به اصل بقا، اندازه حرکت یا قانون دوم نیوتون را نیز لحاظ نمود. حاصل ضرب سرعت در جرم، همان اصل اندازه



شکل ۲. شبکه بندی.

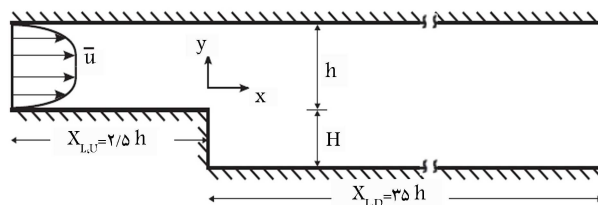
جدول ۲. استقلال از شبکه.

تعداد سلول	طول گردابه میلیمتر	درصد تغییرات
۱۷۲۵۲	۰/۲۵	۰/۵۴
۳۲۱۴۷	۰/۳۶	۰/۲۴
۷۸۲۹۰	۰/۴۱	

جدول ۳. خواص مواد و شرط مرزی.

واحد	مقدار	خواص مواد
kg/m^3	۸۸۰۰	چگالی
μm	۷۰	قطر ذره
kg/s	$1/58 \times 10^{-5}$	نرخ جرمی جریان ذره
m/s	$(10/5 \text{ } ^\circ)$	سرعت تزریق
m^2/s	$1/5 \times 10^{-6}$	ویسکوزیته
m/s	۱۰/۵	$U_{x,0}$
m/s	$(9/33 \text{ } ^\circ)$	\bar{u}_{avg}
m^2/s^2	۰/۴۵	k
$1/s$	۲۸۰۰	ω
pa	۰	\bar{p} شرط مرزی خروجی
m/s	$(\text{ } ^\circ)$	\bar{u} شرط مرزی دیواره

است. همان‌طور که در جدول ۲ مشاهده می‌شود با بیش از دو برابر کردن تعداد سلول، طول گردابه در مرحله سوم، تغییرات چندانی در طول گردابه مشاهده نشده است. بنابراین، شبکه با ۳۲۱۴۷ سلول برای ادامه حل انتخاب شده است. این مدل‌سازی با استفاده از نرم‌افزار فلوئنت با هدف مطالعه و بررسی رفتار ذرات در جریان آشفتگی و تأثیر ذرات در آشفتگی جریان و بالعکس انجام شده است. اطلاعات فاز گسسته (مس) و پیوسته (هوا) در جدول ۳ آمده است. جریان هوا با پروفیل سرعت هاینربولیک تا نوزانت با مقدار میانگین ۹/۳۳ متر بر ثانیه وارد شده است و شرط مرزی خروجی فشار، صفر پاسکال است. شبیه‌سازی عددی انجام شده به روش حجم محدود به‌دو صورت پایا و گذرا در نرم‌افزار فلوئنت نسخه ۲۰۲۱ انجام شده است. در شبیه‌سازی گذرا مقدار گام زمانی $10^{-4} \times 2.5$ ثانیه است. مسئله به‌صورت دوراها و با استفاده از مدل آشفتگی $SST - \omega$ مدل‌سازی شده است. فشار و سرعت به‌یکدیگر کوپل شده و از مدل استاندارد برای فشار و مرتبه دوم برای مومنتوم و انرژی جنبشی آشفتگی استفاده شده است. از بین نیروهای موجود



شکل ۱. هندسه مدل.

جدول ۱. مشخصات ابعادی هندسه مدل.

مشخصات پله	مشخصات کانال
ارتفاع پله $H = 26/7 \text{ mm}$	ارتفاع کانال $h = 4 \text{ mm}$
$w/H = 1:17$	پهنای کانال $w = 457 \text{ mm}$
	$h/H = 3:5$

در این رابطه k_f ، k_p و K_n به ترتیب بیانگر رسانایی حرارتی سیال، نانو ذره و عدد نادسن می‌باشند و مقادیر ثابت به‌صورت $C_t = 1/18$ ، $C_m = 1/14$ و $C_s = 1/17$ تعریف می‌شوند. در معادله (۷)، نیروی براونی به‌صورت زیر بیان می‌شود:

$$f_B = \zeta \sqrt{\frac{\pi S_0}{\Delta t}} \quad (11)$$

در اینجا، ζ اعداد تصادفی گاوسی مستقل با میانگین صفر و واریانس واحد است. در رابطه (۱۱)، S_0 شدت طیفی نیروی براونی است که به‌صورت زیر ارزیابی می‌شود:

$$S_0 = \frac{216 \nu K_B T}{\pi^2 \rho_f d_p^2 \left(\frac{\rho_p}{\rho_f}\right)^2 C_c} \quad (12)$$

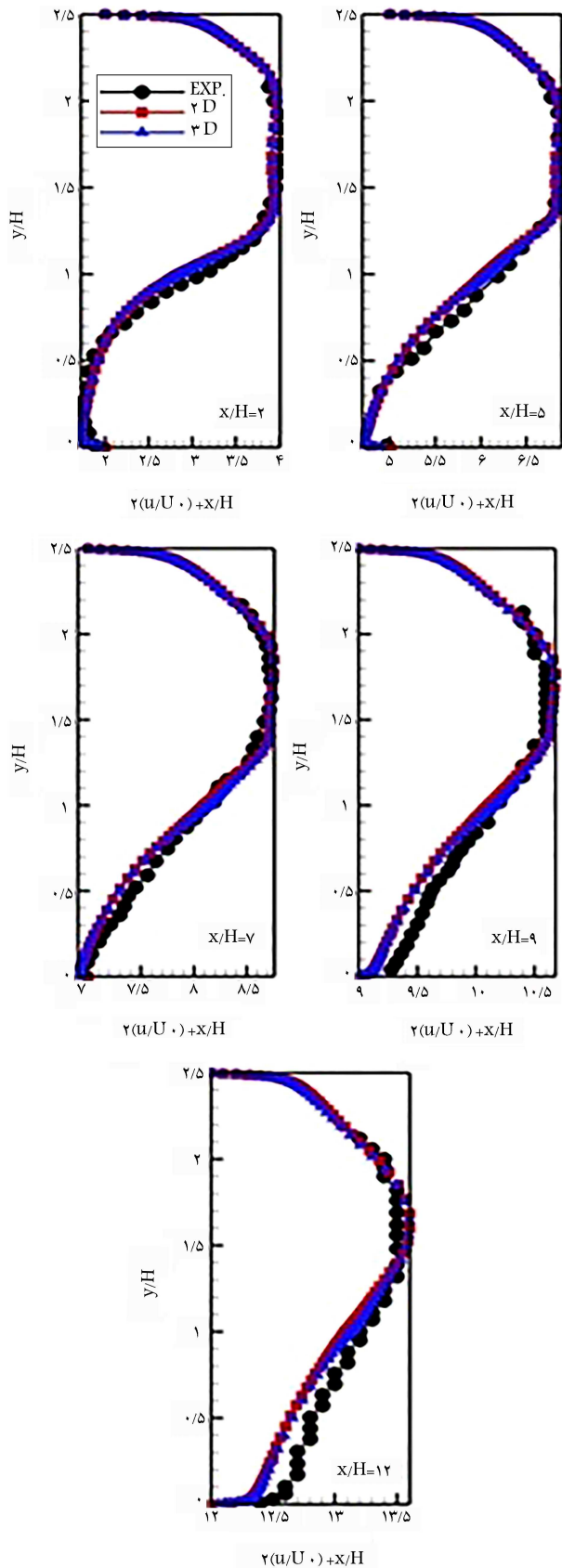
مطابق با فرمول $K_B v$ ، T به ترتیب دمای مطلق سیال، ویسکوزیته سینماتیکی و ثابت بولتزمن بوده و برابر با $(23 JK^{-1}) - 1.38 \times 10^{-23}$ می‌باشد.

۲.۲. مدل‌سازی و شرایط مرزی

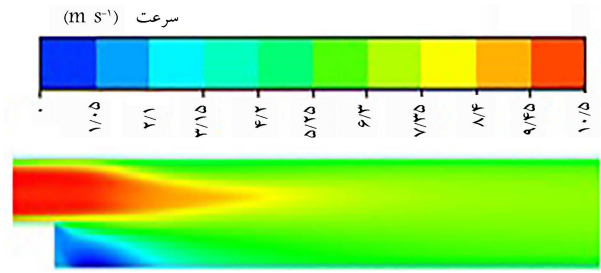
در این پژوهش، رفتار سیال شامل، نانو ذره روی مدل جریان پشت پله با هندسه‌ای که در شکل ۱ نشان داده شده، بررسی و با مشخصات ابعادی ارائه شده در جدول ۱ بیان شده است.

مدل‌سازی ۷ میدان، به‌صورت دو بعدی و سه بعدی انجام شده و شبکه بندی آن به‌صورت با سازمان مستطیلی انتخاب شده است. شبکه در نزدیک دیواره‌ها به‌منظور بهبود کیفیت بررسی و حساسیت مطالعه تغییرات رفتار جریان در نزدیکی دیواره ریزتر و کوچک شده است. ۳۱۷۰۰ المان و ۳۲۱۴۷ گره دارد. با افزایش تعداد سلول و ریزتر کردن اندازه المان‌ها تغییری در نتیجه شبیه‌سازی مشاهده نشده است، بنابراین نتیجه حاصل مستقل از اندازه مش است. در حالت سه بعدی پهنای کانال ۲ میلی‌متر در نظر گرفته شده و برای شبکه بندی این پهنای، یک بار آن را به‌صورت یک قسمت و حالت دوم به‌صورت ده قسمت شبکه بندی شد که نتایج حاصل از حالت اول بهتر بوده و از نظر هزینه زمان و محاسبه مناسب تر است. در شکل ۲، شبکه بندی انجام شده را مشاهده کرد.

استقلال از شبکه: برای بررسی استقلال حل و نتایج نسبت به شبکه بندی، سه‌شبکه با تعداد سلول ۱۷۲۵۲ و ۳۲۱۴۷ و ۷۸۲۹۰ برای حل دو بعدی در نظر گرفته شد که نتایج برای طول گردابه در جدول زیر برای هر شبکه بندی بیان شده



شکل ۴. نمودار سرعت در راستای x در پنج محور در مختصات $x/H = \{2, 5, 7, 9, 12\}$ برای نتایج تجربی، دو بعدی، سه بعدی.



شکل ۳. توزیع سرعت در راستای x .

در روش اویبری - لاگرانژی نیروی جرم مجازی و گرادبان فشار انتخاب شده و گزینه کوپلینگ توربولانس دوطرفه^۲ فعال شد. برای قانون پسا مدل کروی استفاده گردید. برای وارد کردن رابطه سرعت بامقدار ماکزیمم $10/5$ و میانگین $9/33$ متر بر ثانیه از معادله زیر به عنوان رابطه سرعت ورودی در راستای x استفاده شده است:

$$u = -1,9z^{10} + 2z^9 + 4,7z^8 - 4,8z^7 - 4,3z^6 + 4,1z^5 + 1,6z^4 - 1,4z^3 - 1,5z^2 + 0,32z^1 + 10,75 \quad (13)$$

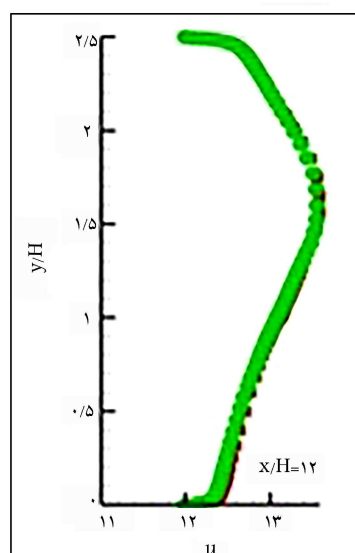
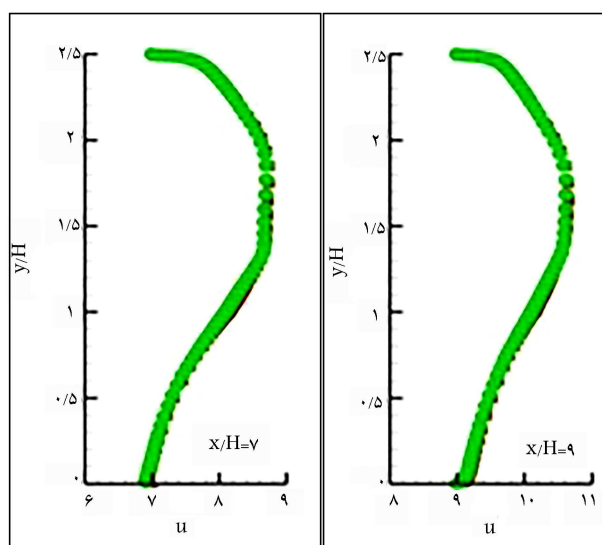
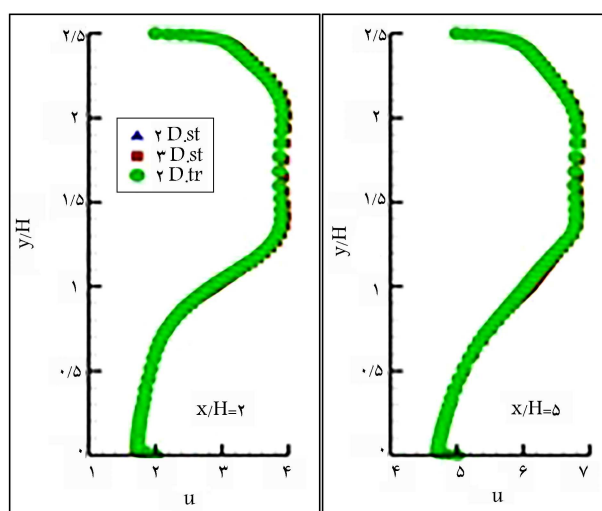
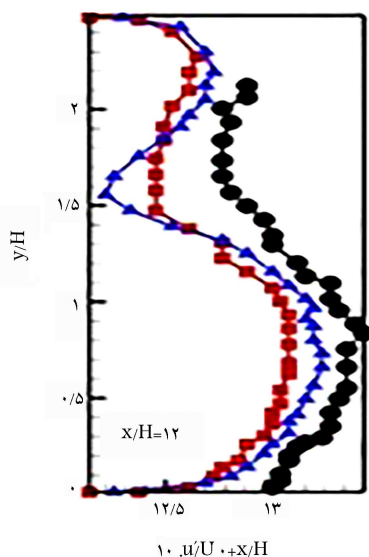
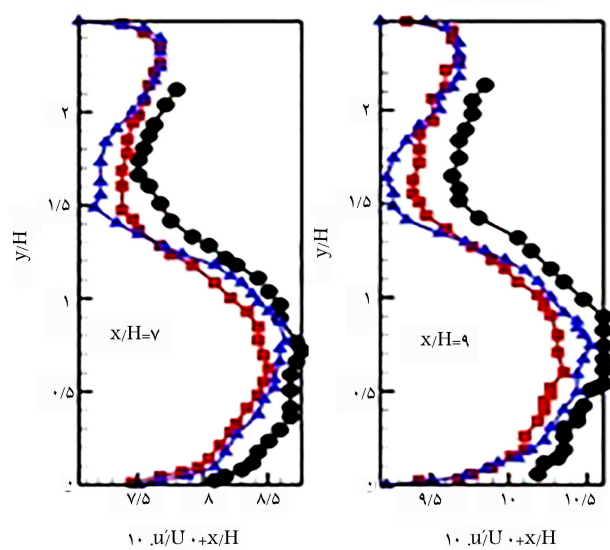
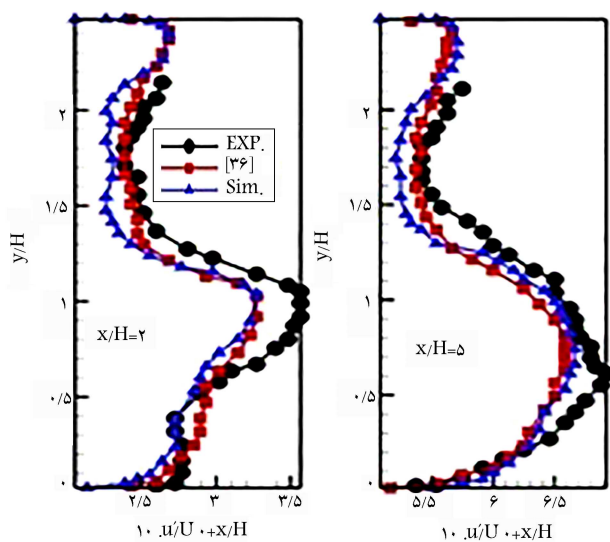
$$z = x - 0,045/0,014 \quad (14)$$

در شکل ۳ می توان توزیع سرعت در راستای x را در دامنه حل مشاهده کرد.

۳. بررسی نتایج

در شکل ۴، توزیع سرعت در راستای x نشان داده شده است. بر اساس این شکل، می توان دریافت که بیشترین مقدار سرعت در ورودی برابر با $10/5$ بوده و کمترین در گردابه تشکیل شده در پشت پله است که مقداری در خلاف جهت x دارد. مقدار سرعت صفر در نزدیکی دیواره مطابق با فرض عدم لغزش روی دیواره می باشد. در شکل ۴ مقایسه ای بین سرعت در راستای x برای دو حالت دوبعدی و سه بعدی با مقادیر تجربی در ۵ مقطع $x/H = \{2, 5, 7, 9, 12\}$ در طول کانال انجام گرفته است. نتایج، نشان می دهد که اختلاف نتایج دوبعدی (قرمز) با نتایج مساله به صورت سه بعدی (آبی) اندک بوده و منطبق با نتایج آزمایشگاهی می باشد. با افزایش فاصله از پله، در نزدیکی دیوار پایینی مقداری اختلاف بین نتایج عددی و آزمایشگاهی مشاهده می شود که با افزایش فاصله مقدار خطا بیشتر می شود. بیشترین خطا در خط پنجم یعنی $x/H = 12$ نزدیک دیواره پایین برابر با 19 درصد است. بنابراین، می توان برای مدل سازی مساله جهت کاهش هزینه محاسباتی و زمان حل از مدل دو بعدی استفاده نمود.

محاسبات شبیه سازی در حالت گذرا به دلیل وارد شدن زمان به معادلات، در زمانی طولانی تری انجام می شود. بنابراین، اگر پاسخ حل گذرا با حالت پایا تفاوتی نداشته باشد، حالت پایا مناسب تر و از نظر زمان و محاسبات مقرون به صرفه تر خواهد بود. از آنجایی که متغیر زمان در سرعت آشفتگی بیشترین تأثیر را دارد و موضوع مورد بحث نیز آشفتگی است، در شکل ۵ بین دو حالت پایا و گذرا در دو حالت دوبعدی و سه بعدی برای سرعت آشفتگی در ۵ مقطع مقایسه ای انجام شده است. همان طور که در شکل مشهود است، در حل ارائه شده هیچ تفاوتی بین دو حالت پایا و گذرا برای هندسه دوبعدی و سه بعدی دیده نمی شود و نتایج حاصل از آنها کاملاً بر هم منطبق هستند.



شکل ۶. مقایسه مقدار سرعت آشفتگی حاصل از شبیه‌سازی و مقدار تجربی و مقاله گریفزو و همکاران. [۳۶]

شکل ۵. مقایسه مقدار سرعت آشفتگی در پنج مقطع کانال $x/H = \{2, 5, 7, 9, 12\}$ در دو حالت پایا و گذرا برای دو مدل گسسته و پیوسته.

تراکم ذرات نزدیک دیواره بالایی بیشتر است، کانال را ترک می‌کنند. برای ذرات با قطر ۳۵ شکل (شکل ۷ - پ) اکثر ذرات مسیرشان را تا نصف طول کانال در نیمه بالایی کانال و در دو فاصله از دیواره طی می‌کنند و بعد از آن کم‌کم پخش شده و مانند ذرات با قطر ۲۰ با تراکم تقریباً یکسان از کانال خارج می‌شوند. برای ذرات با قطر ۵۰ میکرومتر (شکل ۷ - ت) ذرات در نقطه‌ی نزدیک ۴۰ درصد طول کانال، از ورودی به دیواره پایینی برخورد کرده و در ادامه اکثریت ذرات از مرکز کانال عبور کرده و مقداری نیز به‌طور بسیار نزدیک از دو دیواره بالایی و پایینی مسیر را ادامه می‌دهند و مابین ذرات عبورکننده از مرکز و دیواره به‌طور قابل توجهی خالی از ذره است و به‌همین صورت هم از کانال خارج می‌شوند.

همان‌طورکه در شکل ۷ - ج مشاهده می‌شود، ذرات با قطر ۷۰ میکرومتر در نیمه کانال شکل ۷ - ج با دیواره پایینی کانال برخورد کرده و در ادامه دچار انحراف شده و سپس از انتهای کانال خارج می‌شود.

شکل ۷ - چ نشان می‌دهد ذراتی که دارای قطر ۱۰۰ هستند، در نقطه دورتری نسبت به ذرات با قطر ۷۰ به دیواره پایینی برخورد کرده که البته درصد این ذرات نسبت به کل ذرات، خیلی کم است و بیشتر ذرات در نیمه بالایی کانال جریان دارند و بعد از طی شدن ۷۵ درصد از طول کانال، ذرات در عرض کانال پخش می‌شوند و با تراکم یکسان از انتهای کانال عبور می‌کنند.

برای ذرات با قطر ۲۰۰ میکرومتر شکل (۷ - ح)، جریان ابتدا دچار یک انحراف می‌شود و سپس اکثر ذرات در ۸۰ درصد بالایی کانال را در انتها ترک می‌کنند، جهت بهتر نشان دادن نتایج حاصل از تأثیر اندازه قطر ذرات بر مسیر حرکت، محل برخورد ذرات بر حسب درصد طول کانال در جدول ۴ به‌صورت کمی آورده شده است.

۲.۳. تأثیر عدد استوکس بر حضور ذره در گردابه

مکانیزم اختلاط ذرات با سیال و انتشار ذرات توسط ساختار آشفتگی، موضوعات مورد توجه در بسیاری از کاربردهای مهندسی است. درک تعامل بین ذرات و سیال آشفته برای بهبود عملکرد دستگاه‌های مهندسی مهم است. اکنون به‌خوبی شناخته شده است که تلاطم معمولاً توسط بسیاری از ساختارهای گردابی از مقیاس کولموگروف تا مقیاس طول مشخصه غالب است. انتظار می‌رود چنین ساختارهایی تأثیر قوی برای حرکت ذرات به‌شبه‌ای سازمان‌یافته داشته باشند. در این بخش، اثرات گردابه‌ها بر ذرات با اعداد استوکس مختلف مقایسه شده است.

نسبت زمان آرامش دینامیکی ذرات τ_p^* به مقیاس زمانی سیال τ_f جریان به‌عنوان عدد استوکس ذره تعریف می‌شود:

$$St = \frac{\tau_p}{\tau_f} \quad (16)$$

که در آن τ_p معرف زمان ریلکسشن دینامیکی ذرات معیاری از پاسخگویی یک ذره به میدان جریان سیال است و τ_f بیانگر مقیاس زمانی سیال، معیاری از زمان موجود برای برهم‌کشش گردابی ذره می‌باشد. نقش اصلی عدد استوکس در تعیین اثرات تلاطم بر حرکت ذره در بررسی کرو و همکارانش اشاره شده است.^[۳۷]

جدول ۴. مقدار عدد استوکس برحسب قطر ذرات.

قطر (میکرومتر)	۱	۲۰	۳۵	۵۰	۷۰	۱۰۰
درصد فاصله	۰	۲۲/۵	۴۱/۶۶	۴۵	۵۵	۶۶/۶۶
طول برخورد (%)						

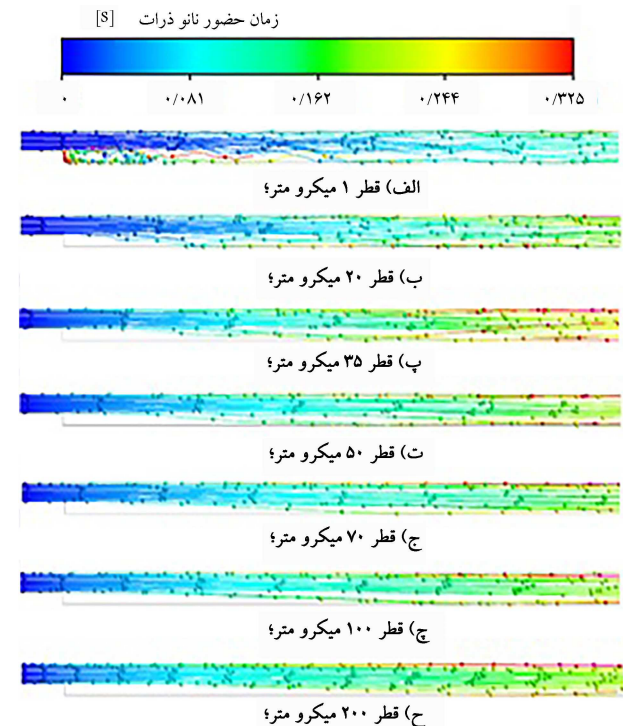
در شکل ۶، مقایسه‌ای بین سرعت آشفتگی جریان شبه‌سازی و مقدار به‌دست آمده از نتیجه مقاله گریفزو و همکاران^[۳۶] و مقدار تجربی در مقطع ۵ از کانال با مختصات $\{2, 5, 7, 9, 12\}$ صورت گرفته است. برای مدل‌های $k - \varepsilon$ و $k - \omega$ سرعت آشفتگی از رابطه زیر به‌دست آمده است:

$$\begin{aligned} \sqrt{u'^2} &= \sqrt{v'^2} = \sqrt{w'^2} \\ &= \sqrt{2k/3} \end{aligned} \quad (15)$$

همان‌طورکه در شکل ۶ مشاهده می‌شود، نتایج حاصل از شبه‌سازی، تطابق خوبی با نتیجه ارائه شده در مقاله دارد و با درصد خطای ماکزیمم ۱۹ درصد در نمودار پنجم در نیمه بالایی کانال اعتبارسنجی شده است.

۱.۳. تأثیر قطر ذرات بر روی مسیر حرکت ذرات

با توجه به نتایجی که تاکنون گزارش شد، استفاده از هندسه دو بعدی و حالت پایا انتخابی مناسب برای شبه‌سازی این مساله است و در ادامه با استفاده از این نتایج به بررسی رفتار ذرات در قطرهای مختلف ۱، ۲۰، ۳۵، ۵۰ و ۱۰۰ میکرومتر داخل جریان آشفته با رینولدز ۱۸۶۰۰ و مسیر ذرات و تأثیر قطر بر آنها پرداخته شده است. در شکل ۷ مسیر حرکت ذرات به‌ازای قطرهای مختلف آمده است. در شکل ۷ - الف مسیر حرکت نانو ذرات با قطر ۱ - میکرومتر نشان داده شده است. مشاهده می‌شود ذره در این اندازه بیشترین پخش شوندگی را نسبت به سایر اندازه‌ها دارد. با این‌وجود اکثر ذرات بعد از ورودی، ابتدا به‌صورت همگرا طول کانال را طی کرده و سپس به‌طور تدریجی پخش شده به‌طوریکه، کانال را با تراکم تقریباً یکدستی ترک نموده‌اند. در میانه کانال ذرات کمتری نزدیک دیواره بالا و پایینی حضور دارند. از شکل ۷ - ب مشاهده می‌شود برای ذرات با قطر ۲۰ میکرومتر از میزان همگرایی اکثریت ذرات کاسته شده و ذرات بیشتر در نیمه بالایی کانال حضور دارند به‌طوریکه



شکل ۷. مسیر حرکت ذرات به‌ازای قطرهای مختلف.

جدول ۵. مقدار عدد استوکس برحسب قطر ذرات.

ذره	مس
چگالی	۸۸۰۰
قطر (میکرومتر)	۱۰۰ ۷۰ ۵۰ ۳۵ ۲۰ ۱
عدد استوکس	۱۳/۰۲ ۵/۲ ۳/۷ ۱/۲ ۰/۷ ۰/۰۰۲۱

باتوجه به آزمایش فسار و ایتون^[۳۸] مقیاس زمانی سیال را می‌توان با رابطه ۱۶ نشان داد:

$$\tau_f = \frac{\Delta H_0}{U_0} \quad (17)$$

به‌طوریکه براساس یک فرکانس تقریبی عبوری از گردابه بزرگ در لایه برشی جدا شده است. زمان ریلکشن دینامیکی ذرات اصلاح شده توسط فسار و ایتون به شرح زیر است:

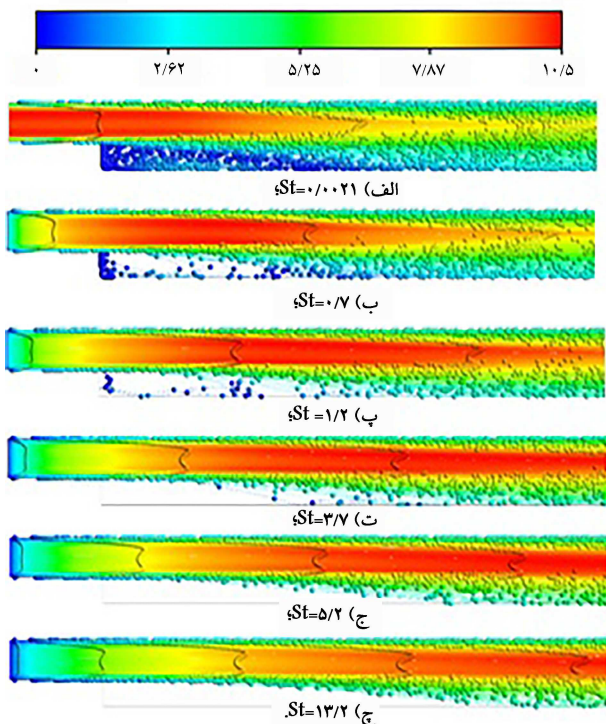
$$\tau_p = \frac{\rho_p d_p^2}{18\mu \left(1 + 0.15 Re_p^{0.87}\right)} \quad (18)$$

در این رابطه Re_p عدد رینولدز میانگین ذرات است که براساس یافته‌های تجربی فسار و ایتون با میانگین سرعت لغزش فرضی $1/2$ متر بر ثانیه محاسبه می‌شود. اگر $St \ll 1$ باشد، زمان ریلکشن ذرات بسیار کمتر از زمان مشخصه مرتبط با میدان جریان است. بنابراین، ذرات زمان کافی برای پاسخ به تغییرات سرعت سیال را دارند. بنابراین، ذرات و سیال تقریباً در تعادل سرعت هستند. از طرف دیگر، اگر $St \gg 1$ باشد، ذرات اساساً زمانی برای پاسخ به تغییرات سرعت سیال ندارند و سرعت ذرات تحت تأثیر فاز سیال قرار نمی‌گیرد.

کره‌های مسی با قطرهای ۱، ۲۰، ۳۵، ۵۰، ۷۰ و ۱۰۰ میکرومتر به ترتیب برای شبیه‌سازی ذرات با عدد استوکس‌های مختلف همان‌طور که در جدول ۵ فهرست شده است، انتخاب شده‌اند. هر مجموعه‌ای از کره‌های هم‌اندازه، زمانی وارد جریان می‌شود که نتیجه شبیه‌سازی فاز گاز هم‌گرا شده باشد. سرعت اولیه ذرات برابر با سرعت سیال محلی تنظیم شده است و اطمینان حاصل می‌شود که ذرات در تعادل دینامیکی با جریان گاز هستند.

شکل ۸، مسیر حرکت ذرات نانو در اعداد استوکس مختلف را در میدان جریان نشان می‌دهد. حضور ذره با قطر ۱ میکرومتر در جریان با عدد استوکس ۰/۰۰۲۱۱ که بسیار کوچکتر از ۱ است در شکل ۸ - الف آمده است. ذره کاملاً خود را با تغییرات سرعت جریان منطبق کرده و بنابراین، می‌توان شاهد حضور زیادی از ذرات در گردابه پشت پله باشیم. با افزایش قطر ذره به ۲۰ میکرومتر عدد استوکس ۰/۷۰۴ می‌شود که عددی بسیار نزدیک به ۱ است. مطابق شکل ۸ - ب ذرات کمتری گردابه پشت پله را احساس کرده و همراه جریان سیال پایه می‌شوند. این ذرات برای قطر ۳۵ میکرومتر بسیار کاهش یافته و ذراتی هم که گردابه را احساس می‌کنند از مرز آن عبور کرده و به داخل آن کشیده نمی‌شوند و مطابق شکل ۸ - پ اکثر ذرات با این قطر از کنار گردابه عبور کرده‌اند بدون این که حضور آن را احساس کنند و به تغییرات سیال پایه، پاسخ دهند. برای ذرات با قطر ۵۰ میکرومتر شکل ۸ - ت عدد استوکس ۳/۷ است و برای قطر بیشتر از ۱، این ذرات بدون این که حتی از مرز گردابه عبور کنند و به سمت پشت پله بازگردند به مسیر خود ادامه داده و تنها پاسخ آنها به تغییرات فاز گاز برخورد با دیواره پایینی کانال بعد از گردابه بوده است. با بیشتر شدن سایز ذرات به ۷۰ و ۱۰۰ (شکل ۸ - ج و شکل ۸ - چ) ذرات با افزایش قطر

سرعت میانگین ذرات ($m s^{-1}$)



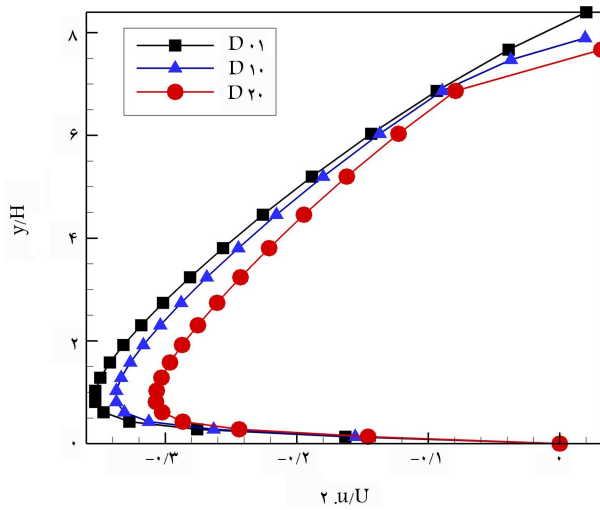
شکل ۸. حضور ذره با قطرهای مختلف در گردابه پشت پله.

در فاصله دورتری از پشت پله به دیواره پایینی کانال برخورد می‌کنند که این نشان دهنده تطابق و پاسخ کمتر ذرات به سیال می‌باشد.

به‌عنوان نتیجه کلی، ذرات با عدد استوکس بسیار کوچک ($St \ll 1$) به شدت توسط ساختار گردابی فاز گاز کنترل می‌شوند و از نزدیک گردابه‌های گاز را دنبال می‌کنند. چنین ذراتی را نمی‌توان متمرکز کرد. ذرات با مقیاس زمانی مشابه مقیاس زمانی سیال ($St \sim 1$) توسط یک گرداب چرخیده می‌شوند و در امتداد ناحیه محیطی گرداب متمرکز می‌شوند. ذرات با عدد استوکس بزرگ ($St \gg 1$) در حفظ حرکت خود پایدارتر هستند. آنها نمی‌توانند به حرکت گردابی در مقیاس زمانی سیال موجود پاسخ دهند و همچنین متمرکز نخواهند شد.

در شکل ۹، مقایسه‌ای برای سرعت آشفتگی نانو ذرات در دو حالت دوبعدی و سه‌بعدی با نتایج تجربی و نتایج حاصل از مطالعه یو کین فونگ^[۳۹] در پنج مقطع کانال با مختصات $x/H = \{2, 5, 7, 9, 12\}$ انجام گرفته است. وی در مطالعه خود برای به‌دست آوردن سرعت آشفتگی یک حجم کنترل در نظر گرفته و برای آن فرمولی نوشته است. در حالت دوبعدی اختلاف بسیاری در مطالعه فونگ دیده می‌شود و داده‌ها به نسبت نتایج سه‌بعدی از پراکندگی بیشتری برخوردار هستند که باعث خطای بالای آن شده است. در شبیه‌سازی انجام شده، نتایج سه‌بعدی در اکثر نقاط بیشتر از نتایج دوبعدی به داده‌های تجربی نزدیک می‌باشد. با این وجود، بیشینه خطای نتایج دوبعدی شبیه‌سازی از نتایج دوبعدی فونگ، بسیار کمتر است و نشان‌دهنده دقت بالای شبیه‌سازی می‌باشد. بنابراین، برای بررسی رفتار ذره و بررسی سرعت آشفتگی مدل‌سازی سه‌بعدی دارای دقت بالاتری است.

همان‌طور که پیش‌تر به آن اشاره شد، ذرات با قطر کمتر از ۲۰ - میکرومتر، گردابه پشت پله را به‌طور محسوس و با تأثیرپذیری بیشتری نسبت به ذرات با قطر بزرگتر احساس می‌کنند. در شکل ۱۰ مقدار سرعت منفی پشت پله برای سه قطر ۱، ۱۰، ۲۰ میکرومتر در مختصات $x/H = \{2\}$ در گردابه قرار گرفته است، مقایسه شده است.



شکل ۱. مقایسه مقدار سرعت منفی پشت پله برای سه قطر ۱، ۱۰، ۲۰ میکرومتر در مختصات $x/H = \{2\}$ در گردابه.

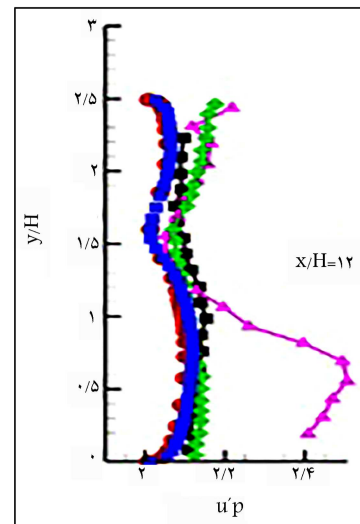
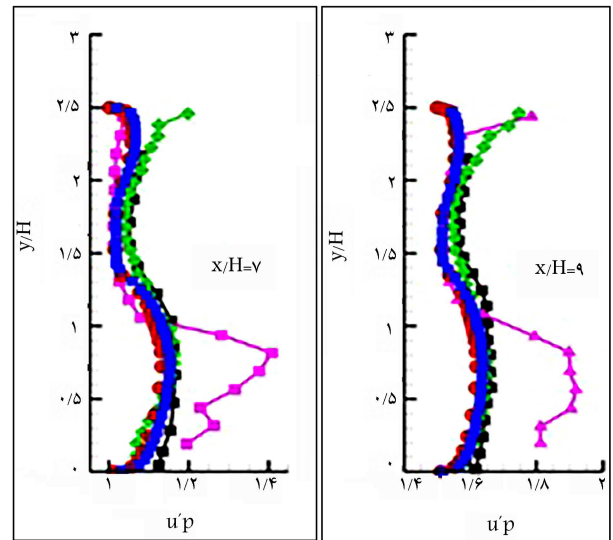
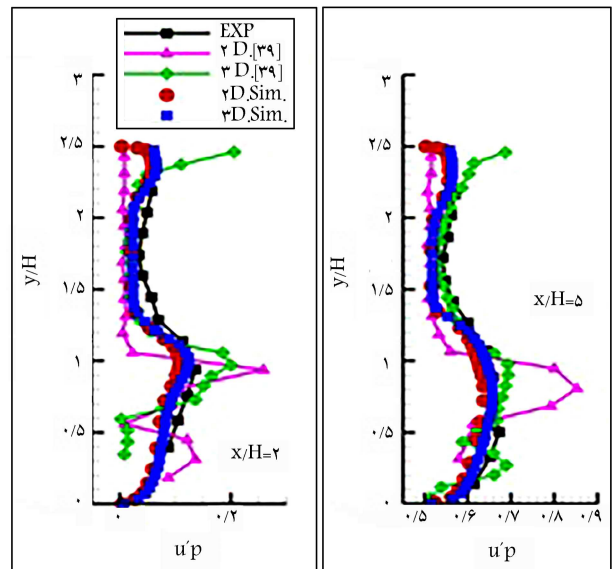
همان‌طور که در شکل قابل مشاهده است، ذرات سبکتر با ارتفاع بیشتری نسبت به دیواره پایینی کانال، شروع به برگشت کرده و سرعت برگشت بیشتری دارند. به طوری که به ترتیب ذرات با قطرهای ۱، ۱۰ و ۲۰ میکرومتر بیشترین فاصله بازگشت را دارند. از نظر اندازه سرعت بازگشت، ذره با قطر ۱ میکرومتر (با مقدار بیش از -0.35) دارای بیشترین مقدار و بعد از آن ذرات با قطرهای ۱۰ و ۲۰ میکرومتر با مقدار کمتر از -0.35 و بیشتر از -0.3 به ترتیب مقادیر بعدی را به خود اختصاص داده‌اند.

در شکل ۱۱، مدل‌های مختلف آشفتگی دو معادله $K\varepsilon$ و $K\omega$ بررسی شده است. به طوری که معادلات مربوط به مدل $K\omega$ به نتایج تجربی نزدیک‌تر می‌باشد. بیشترین اختلاف مدل‌های آشفتگی $K\varepsilon$ در قسمت پیشینه پروفایل سرعت است که این مقدار خطا با پیشروی در طول کانال افزایش می‌یابد. در بین مدل‌های $K\omega$ بیشترین تطابق با نتایج تجربی را مدل SST دارد و بعد از آن، با اختلاف خیلی کم، مدل BSL برای شبیه‌سازی آشفتگی جریان مناسب می‌باشد و در پایان، مدل استاندارد $K\omega$ در جایگاه سوم قرار می‌گیرد. بنابراین، در این مطالعه از مدل SST برای شبیه‌سازی آشفتگی استفاده شده است.

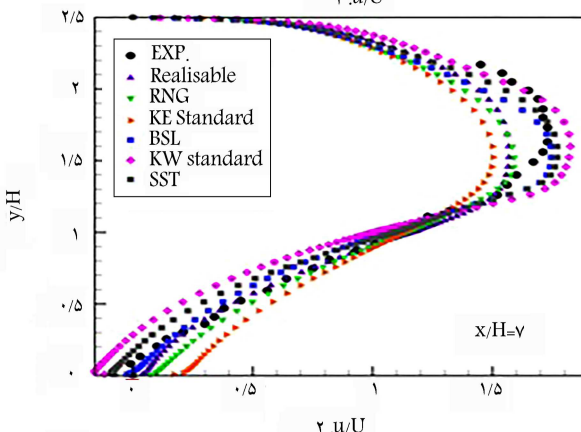
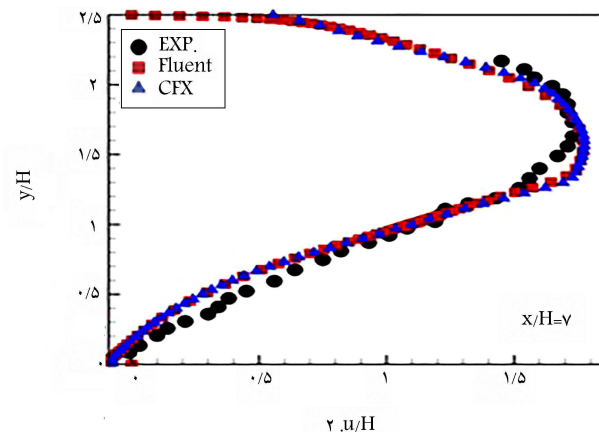
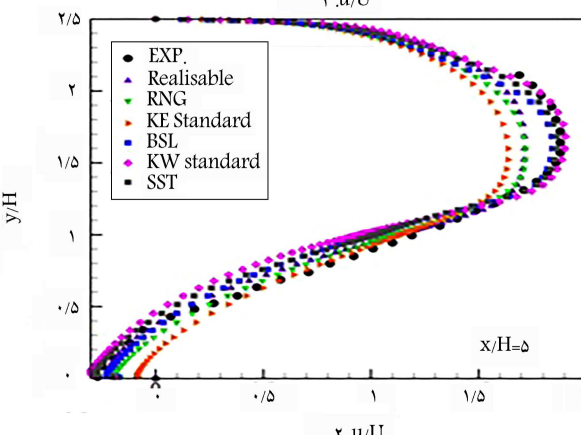
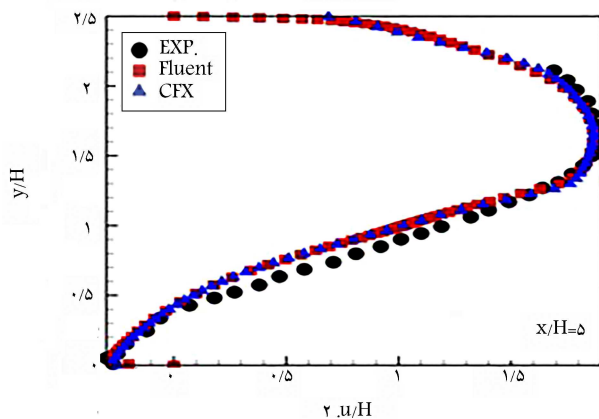
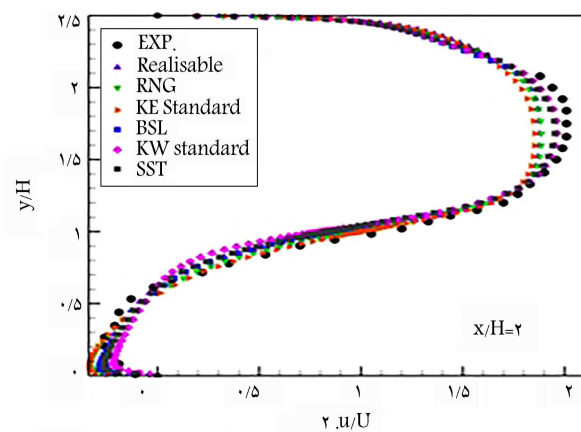
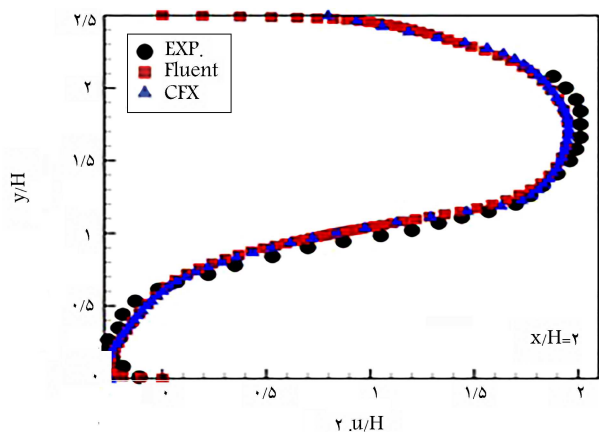
۳.۳. شبیه‌سازی مساله جریان پشت پله با نرم‌افزار CFX

در ادامه، جهت شبیه‌سازی نوسینال در جریان آشفتگی در نرم‌افزار CFX و بررسی میزان تطابق نتایج حاصل با داده‌های تجربی این مساله در CFX شبیه‌سازی شد. برای یکسان بودن شرایط مقایسه از همان هندسه و مش قبلی در حل فلوئنت استفاده شده است. هندسه دو بعدی می‌باشد و حل با روش حجم محدود و رویکرد اویلری - لاگرانژی به صورت دوراها انجام شده است. حل به صورت پایا بوده و برای ورود هندسه دو بعدی به نرم‌افزار CFX که فقط هندسه‌های سه بعدی را حل می‌کند، از گزینه تقارن استفاده شده است. به این ترتیب، نرم‌افزار به طور خودکار هندسه دو بعدی را به هندسه سه بعدی با عمق بسیار کوچکی تبدیل می‌کند که تأثیر چندانی روی نتیجه حل ندارد. همان‌طور که از شکل ۱۲ مشاهده می‌شود تطابق خوب و قابل قبولی در شبیه‌سازی دوفازی با رویکرد اویلری - لاگرانژی با نتایج تجربی و توسط فلوئنت و CFX وجود دارد. از این جهت می‌توان از مزایای سرعت همگرایی و حل نرم افزار CFX مخصوصاً در مسائل پایا استفاده کرد.

نتیجه با شبیه‌سازی نوییل و رانوت^[۴۰] اعتبارسنجی شد. در شکل ۱۳، می‌توان



شکل ۹. مقایسه آشفتگی سرعت نانو ذرات در پنج مقطع کانال با مختصات $x/H = \{2, 5, 7, 9, 12\}$ دو حالت دو بعدی و سه بعدی.^[۳۹]



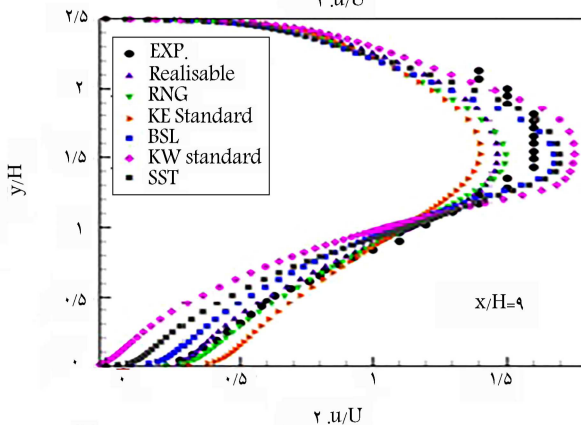
شکل ۱۲. مقایسه نتایج شبیه‌سازی دو نرم‌افزار فلونت افزار فلونت و CFX در چهار مقطع کانال با مختصات $x/H = \{2, 5, 7\}$ برحسب سرعت جریان.

جدول ۶. ریشه میانگین مجذور خطا برای شکل ۱۳.

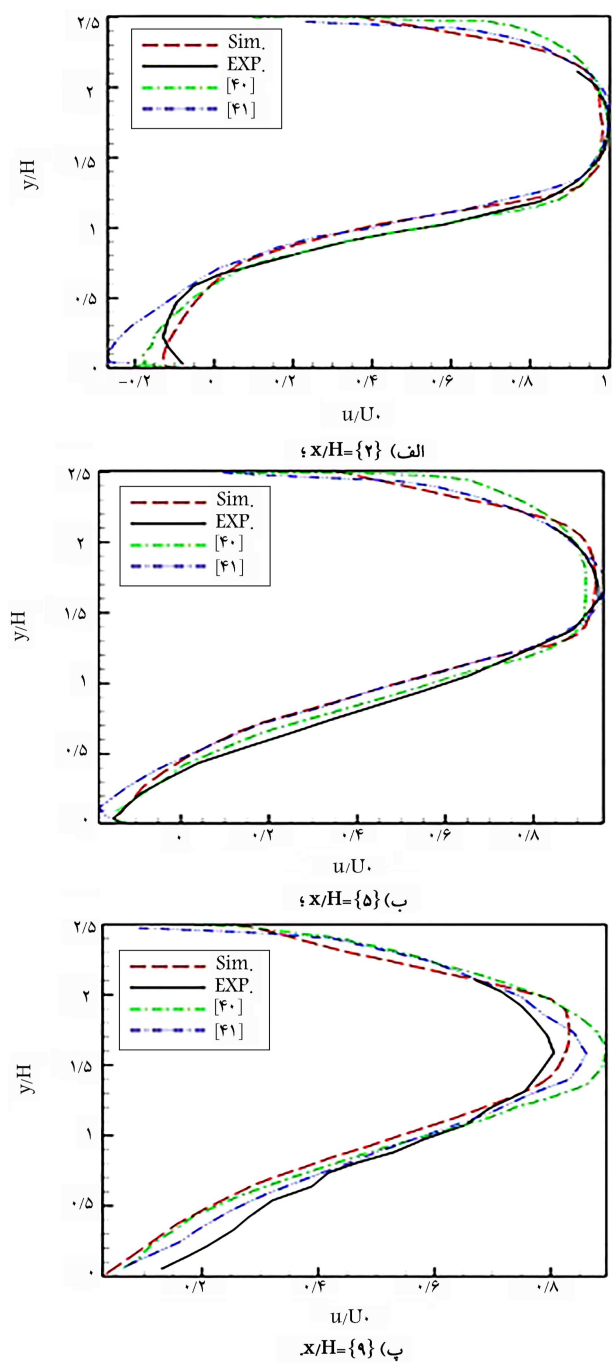
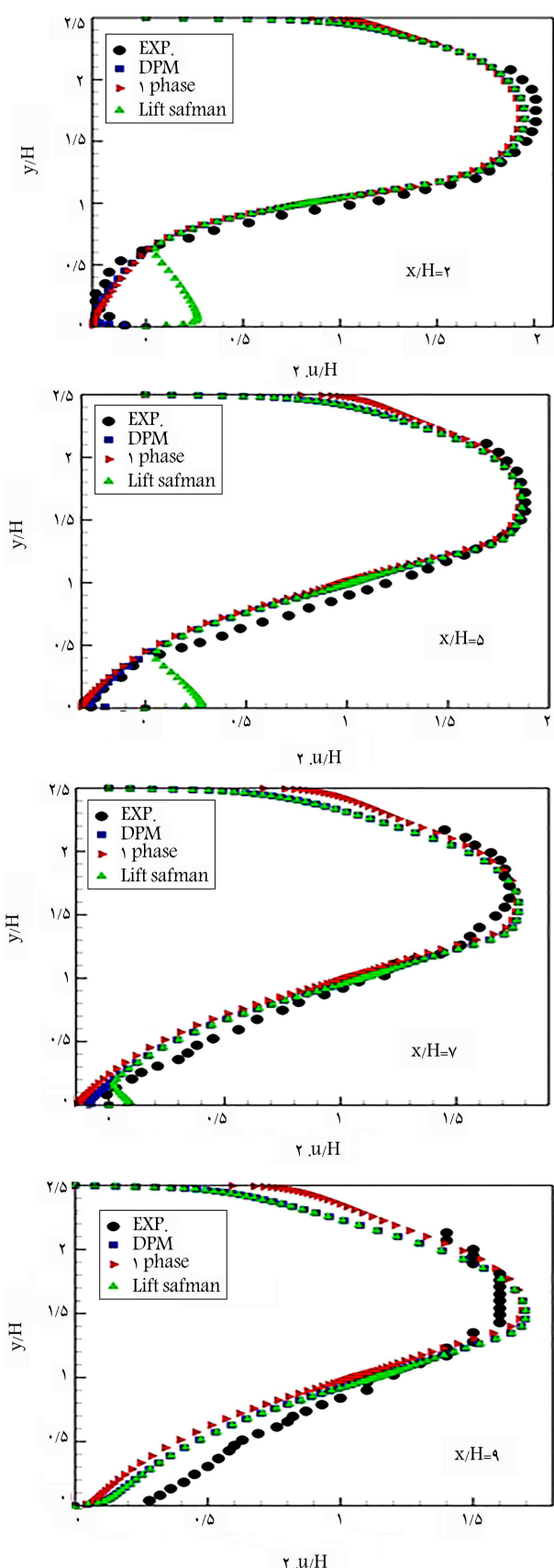
داده	$x/H = \{2\}$	$x/H = \{5\}$	$x/H = \{9\}$
شبیه‌سازی	۰/۰۶۵۰۸۳	۰/۰۵۰۵۷۴	۰/۰۵۷۹۲۶
نوبیل و رانوت ^[۴۰]	۰/۰۳۵۹۹	۰/۰۵۰۰۹۹	۰/۰۳۷۲۸۷
چان و همکارن ^[۴۱]	۰/۰۸۶۶۷۶	۰/۰۳۹۳۹۴	۰/۰۶۲۳۲۸

نمودار سرعت در راستای x در سه مقطع کانال با مختصات $x/H = \{2, 5, 9\}$ نشان داده شده است. در این نمودار می‌توان نتیجه مطالعه فسلر را به‌عنوان نتیجه تجربی و نتیجه مطالعه‌ی چان و همکارن^[۴۱] را نیز مشاهده کرد.

در جدول ۶، می‌توان ریشه میانگین مجذور خطا را برای داده‌های شکل ۱۳



شکل ۱۱. مقایسه مدل‌های آشفتگی در چهار مقطع کانال با مختصات $x/H = \{2, 5, 7, 9\}$ برحسب سرعت جریان.



شکل ۱۳. پروفیل سرعت در راستای x .

مشاهده کرد. همان‌طورکه از جدول مشاهده می‌شود میانگین خطا برای شبیه‌سازی در سه مختصات یاد شده برابر با 0.57% می‌باشد. این مقدار میانگین خطا برای داده‌های نوییل و رانوت، چان و همکاران به ترتیب برابر است با 0.411% و 0.627% از بین این سه خطا، کمترین خطا مربوط به نوییل و رانوت است و بعد از آن خطای مطالعه حاضر و در آخر مطالعه چان و همکاران قرار دارد.

در این بخش از مطالعه به بررسی اعتبار روش DPM پرداخته شده است که نتایج آن در شکل ۱۴ آورده شده است. در این روش معادلات برای فاز گسسته و پیوسته به صورت جداگانه حل می‌شود و در نهایت فاز گسسته توسط ترم چشمه به فاز پیوسته ربط داده می‌شود. این روش حل، مستلزم محاسبات و هزینه زمانی

شکل ۱۴. مقایسه نتایج شبیه‌سازی دو نرم‌افزار فلوئنت ابزار فلوئنت و CFX در چهار مقطع کانال با مختصات $x/H = \{2, 5, 7, 9\}$ برحسب سرعت جریان.

بیشتری می‌باشد. اما در روش تک فاز یک سیال، پیوسته با خواص موثر جدید که تابع خواص سیال و نانو ذره و درصد حجمی می‌باشد تعریف شده و معادلات تنها برای یک سیال تک فاز حل می‌گردد. اگر چه این روش در محاسبات و زمان به صرفه می‌باشد اما، دقت در ازای این صرفه جویی کم شده و درصد خطا بالا می‌رود. در این مسئله برای رویکرد DPM ماکزیمم خطای سرعت ۱۹ درصد بوده و برای روش تک فاز این مقدار خطا به ۲۵ درصد افزایش می‌یابد. در حل DPM نیروهای مگرادیان فشار، جرم مجازی و درگ فعال می‌باشد. زمانی که نیروی سافمن را وارد حل نموده، مشاهده می‌شود نمودار سرعت در بخش گردابه دچار خطای زیادی شده و از روند تجربی فاصله می‌گیرد. برای محاسبه رویکرد تک فاز چگالی موثر نانوسیال، رابطه‌ی زیر حاصل می‌شود:

$$\rho_{nf} = (1 - x)\rho_f + x\rho_p \quad (19)$$

به طوری که در رابطه فوق ρ_p چگالی ذره (مس)، چگالی سیال پایه (هوا) و x کسر حجمی و برابر ۳ درصد می‌باشد.

۴. نتیجه گیری

برای شبیه سازی جریان نانوسیال در هندسه پشت پله و به منظور بهترین انتخاب و بررسی رفتار نانوذرات در جریان آشفته و تأثیر آشفته‌گی بر روی ذرات و بالعکس، دو هندسه دو بعدی و سه بعدی در دو حالت پایا و گذرا با استفاده از رویکرد اولبری - لاگرانژی مورد مطالعه قرار گرفت. رینولدز جریان مورد مطالعه ۱۸۶۰۰ است. تأثیر قطر ذره و عدد استوکس روی مسیر حرکت ذره در جریان آشفته نیز بررسی شد. نتایج حاصل از شبیه سازی برای یافتن نمودار سرعت در راستای x در حالت هندسه سه بعدی نسبت به نتایج حالت دو بعدی، تطابق بهتری با نتایج تجربی دارد. نتایج برای سرعت آشفته‌گی در دو حالت پایا و گذرا کاملاً برهم منطبق شد و هیچ تفاوتی در آنها دیده نشد. برای ذرات با قطر کوچکتر از ۳۵ میکرومتر، نانوذرات گردابه پشت پله را احساس کرده و در نزدیکی دیواره مسیری را برخلاف جریان طی می‌کنند و با افزایش قطر این مسیر بازگشت کوتاه می‌شود. همچنین، در این مطالعه، تأثیر قطر ذره در مسیر و پراکندگی بررسی گردید که مطابق با نتایج حاصل، برای ذرات با استوکس پایین نانوذرات با پراکندگی بیشتر و به صورت پخش از کانال خارج می‌شود. با افزایش عدد استوکس و سنگین تر شدن ذرات میزان پراکندگی کاهش یافته و مسیر ذرات ابتدا دچار یک انحراف شده و سپس بیشتر ذرات از نیمه بالایی کانال خارج شدند. ذرات با عدد استوکس کمتر از ۱، فرصت کافی برای پاسخ به تغییرات جریان را دارند و از این جهت وارد گردابه‌ها شده و جریان سیال پایه را دنبال می‌کنند. بنابراین، با توجه به هدف این مطالعه که بررسی رفتار ذره در جریان آشفته است، ذراتی انتخاب شدند که دارای عدد استوکس بسیار کوچک و کمتر از ۱ باشند تا وارد گردابه‌ها در جریان آشفته شوند و امکان مطالعه و بررسی رفتارشان وجود داشته باشد. با مقایسه نتایج حاصل از شبیه سازی دو بعدی و سه بعدی با نتایج تجربی، نتایج حاصل از شبیه سازی سه بعدی با خطای بسیار کم تطبیق بالایی با نتایج تجربی دارند. نتایج حاصل از مدل $K\omega SST$ نشان می‌دهد که این مدل با کمترین درصد خطا بهترین مدل و بعد از آن مدل $K\omega BSL$ برای شبیه سازی آشفته‌گی جریان نانوسیال پیشنهاد می‌شود. مطابق با نتایج به دست آمده، استفاده از نیروی برای سافمن توصیه نمی‌شود و استفاده از این نیرو سبب ایجاد خطا در پیش بینی مقادیر در ناحیه گردابه می‌شود.

فهرست علائم

- φ : کسر حجمی ذره؛
- ρ : چگالی (kg/m^3)؛
- ρ_{eff} : چگالی موثر نانوسیال (kg/m^3)؛
- ρ_p : چگالی فاز دوم (ذره) (kg/m^3)؛
- ρ_f : چگالی فاز اول (سیال) (kg/m^3)؛
- ρ_{nf} : چگالی نانوسیال (kg/m^3)؛
- τ : تنش برشی (N/m^2)؛
- TD : نسبت قطر ذرات؛
- τ_p : زمان ریلکسشن دینامیکی ذرات؛
- τ_f : مقیاس زمانی سیال؛
- μ : ویسکوزیته دینامیکی ($kg/m s$)؛
- μ_f : ویسکوزیته دینامیکی سیال ($kg/m s$)؛
- μ_{nf} : ویسکوزیته دینامیکی نانوسیال ($kg/m s$)؛
- λ : مسیر آزاد میانگین سیال (m)؛
- ζ : اعداد تصادفی گاوسی مستقل با میانگین صفر و واریانس واحد؛
- v : ویسکوزیته سینماتیکی (m^2/s)؛
- ω : فرکانس آشفته‌گی (s^{-1})؛
- δV : حجم سلول (m^3)؛
- A_p : مساحت سطح ذرات (m^2)؛
- C_c : تصحیح کانتینگهام؛
- C_p : ظرفیت گرمایی ($J/kg K$)؛
- $C_{p_{bf}}$: ظرفیت گرمایی سیال پایه ($J/kg K$)؛
- C_{p_p} : ظرفیت گرمایی نانوذرات ($J/kg K$)؛
- $C_{p_{nf}}$: ظرفیت گرمایی نانوسیال ($J/kg K$)؛
- d_f : قطر ذرات سیال (m)؛
- d_p : قطر ذره (m)؛
- e : عدد نیر؛
- f_B : نیروی براونی (N)؛
- F_D : نیروی پسا (N)؛
- f_{th} : نیروی ترموفورز (N)؛
- h : ارتفاع کانال (m)؛
- H : ارتفاع پله (m)؛
- u_B : سرعت براونی نانوذرات (m/s^2)؛
- u' : سرعت آشفته‌گی در راستای x (m/s^2)؛
- Re_p : عدد رینولدز بر اساس سرعت نسبی و قطر ذره؛
- K : انرژی جنبشی آشفته‌گی (m^2/s^2)؛
- K_B : ثابت بولتزمن؛
- K_{eff} : هدایت حرارتی موثر برای نانوسیال ($W/m K$)؛
- k_f : رسانایی حرارتی سیال ($W/m K$)؛
- k_p : رسانایی حرارتی ذره ($W/m K$)؛
- Kn : عدد ناسن؛
- l_{BF} : طول آزاد (m)؛
- m_p : جرم ذره (kg)؛

t : زمان (s)؛
 \bar{V} : بردار سرعت (m/s^{\vee})؛
 V_f : سرعت سیال (m/s^{\vee})؛
 V_p : سرعت ذره (m/s^{\vee})؛
 v' : سرعت آشفتگی در راستای y (m/s^{\vee})؛
 w : پهنای کانال (m)؛
 w' : سرعت آشفتگی در راستای (m/s^{\vee})؛
 X_p : مکان ذره (m).

np : تعداد ذرات درون یک حجم سلول؛
 P : فشار (p)؛
 st : عدد استوکس؛
 S_h : نرم چشمه انرژی ذرات؛
 S_v : نرم چشمه تکانه ذرات؛
 S_e : شدت طیفی نیروی براونی؛
 T : دما (k)؛
 T_p : دمای ذره (k)؛

پانویسها

1. Thermophores
2. Two-Way Turbulence Coupling

منابع (References)

1. Sommerfeld, M., von Wachem, B. and Oliemans, R., 2008. Best practice guidelines for computational fluid dynamics of dispersed multiphase flows. European Research Community On Flow, Turbulence and Combustion.
2. Crowe, C.T., Troutt, T.R. and Chung, J.N., 1996. Numerical models for two-phase turbulent flows. *Annual Review of Fluid Mechanics*, 28, pp.11-43.
3. Spalding, D.B., 1981. A general purpose computer program for multi-dimensional one- and two-phase flow. *Mathematics and Computers in Simulation*, 23, pp.267-276.
4. Crowe, C.T., Sharma, M.P. and Stock, D.E., 1977. Particle-Source in Cell (Psi-Cell) Model for Gas-Droplet Flows. *Journal of Fluids Engineering-Transactions Of the ASME*, 99(2), pp.325-332.
5. Crowe, C.T., Chung, J.N. and Troutt, T.R., 1988. Particle mixing in free shear flows. *Progress in Energy and Combustion Science*, 14(3), pp.171-194.
6. Launder, B.E. and Spalding, D.B., 1972. Lectures in mathematical models of turbulence, New York: Academic Press.
7. Faeth, G.M., 1987. Mixing, transport and combustion in sprays. *Progress in Energy and Combustion Science*, 13(4), pp.293-345.
8. Yuu, S., Yasukouchi, N., Hirosawa, Y. and Jotaki, T., 1978. Particle diffusion in a duct laden jet. *Aiche Journal*, 24, pp.509-519.
9. Berlemont, A., Desjonqueres, P. and Gouesbet, G., 1990. Particle lagrangian simulation in turbulent flows. *International Journal of Multiphase Flow*, 16(1), pp.19-34. [https://doi.org/10.1016/0301-9322\(90\)90034-G](https://doi.org/10.1016/0301-9322(90)90034-G).
10. Lockwood, F.C., and Papadopoulos, C., 1989. A New method for the computation of particulate dispersion in turbulent 2-Phase flows. *Combustion and Flame*, 76(3-4), pp.403-413. [https://doi.org/10.1016/0010-2180\(89\)90121-1](https://doi.org/10.1016/0010-2180(89)90121-1).
11. Wen, F., Kamalu, N., Chung, J.N., Crowe, C.T. and Troutt, T.R., 1992. Particle dispersion by vortex structures in plane mixing layers. *Journal of Fluids Engineering-Transactions of the ASME*, 114, pp. 657-666.
12. Joia, I.A., Ushijima, T., and Perkins, R.J., 1997. Numerical study of bubble and particle motion in a turbulent boundary layer using proper orthogonal decomposition. *Applied Scientific Research*, 57(3-4), pp.263-277.
13. Moin, P. and Kim, J., 1982. Numerical investigation of turbulent channel flow. *Journal of Fluid Mechanics*, 118, No.May, pp. 341-377. <https://doi.org/10.1017/S0022112082001116>.
14. Elghobashi, S. and Truesdell, G.C. 1992. Truesdell, direct simulation of particle dispersion in a decaying isotropic turbulence. *Journal of Fluid Mechanics*, 242, pp.655-700. <http://dx.doi.org/10.1017/S0022112092002532>.
15. Tian, Z.F., Tu, J.Y. and Yeoh, G.H., 2005. Numerical simulation and validation of dilute gas-particle flow over a backward-facing step. *Aerosol Science and Technology*, 39(4), pp.319-332. <http://dx.doi.org/10.1080/027868290930961>.
16. Shih, T.H., Liou, W.W., Shabbir, A., Yang, Z.G. and Zhu, J., 1995. A New kappa-epsilon eddy viscosity model for high reynolds-number turbulent flows. *Computers & Fluids*, 24(3), pp. 227-238. [https://doi.org/10.1016/0045-7930\(94\)00032-T](https://doi.org/10.1016/0045-7930(94)00032-T).
17. Yu, K.F., 2002. Large eddy simulation of particle-laden turbulent flow over a backward-facing step, MPhil Thesis: The Hong Kong Polytechnic University.
18. Wang, B., Zhang, H.Q., Yu, K.F., Wang, X.L., Guo, Y.C., and Lin, W.Y., 2003. Numerical simulation of large eddy structures evolution behind backward-facing step. *Chinese Quarterly of Mechanics*, 24(2), pp.166-173. 10.1115/FEDSM2003-45743.

19. Wang, B., Zhang, H.Q., Yu, K.F., X.L. Wang, X.L., Guo, Y.C., and Lin, W.Y., 2003. Large eddy simulation of a gas-particle two-dimensional backward-facing step flow. *Journal of Combustion Science and Technology*, 9(5), pp.447-452. <http://dx.doi.org/10.1115/FEDSM2003-45743>.
20. Yu, K.F., Lau, K.S. and Chan, C.K., 2004. Numerical simulation of gas-particle flow in a single-side backward-facing step flow. *Journal of Computational and Applied Mathematics*, 163(1), pp.319-331. <https://doi.org/10.1016/j.cam.2003.08.077>.
21. Yu, K.F., Lau, K.S., and Chan, C.K., 2004. Large eddy simulation of particle-laden turbulent flow over a backward-facing step. *Communications In Nonlinear Science and Numerical Simulation*, 9, pp.251-262. [http://dx.doi.org/10.1016/S1007-5704\(03\)00113-8](http://dx.doi.org/10.1016/S1007-5704(03)00113-8).
22. Mahdavi, M., Sharifpur, M. and Meyer J.P., 2015. CFD modelling of heat transfer and pressure drops for nanofluids through vertical tubes in laminar flow by Lagrangian and Eulerian approaches. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 88, pp. 803-813. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2015.04.112>.
23. Kumar, N. and Puranik, B.P. 2016. Numerical study of convective heat transfer with nanofluids in turbulent flow using a Lagrangian-Eulerian approach. *Applied Thermal Engineering*, 111, 25 January 2017, pp.1674-1681. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2016.08.038>.
24. Maganti, L.S., Dhar, P., Sundararajan, T. and Das, S. K. 2016. Nanofluids Particle and thermohydraulic maldistribution of nanofluids in parallel microchannel systems. *Microfluidics and Nanofluidics*. <https://link.springer.com/article/10.1007/s10404-016-1769-3>.
25. Rashidi, S., Bovand, M., Abolfazli Esfahani, J. and Ahmadi, G. 2016. Discrete particle model for convective AL2O3-water nanofluid around a triangular obstacle. *Thermal Engineering*, <http://dx.doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2016.01.076>.
26. Albojamal, A. and Vafai, K. 2017. Analysis of single phase, discrete and mixture models, in predicting nanofluid transport. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 114, pp.225-237. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2017.06.030>.
27. Mahdavi, M., Sharifpur, M. and Meyer. J.P., 2018. Discrete modelling of nanoparticles in mixed convection flows. *Powder Technology*, 338. <http://dx.doi.org/10.1016/j.powtec.2018.07.025>.
28. Saeed, F.R. and Al-Dulaimi, M.A., 2021. Numerical investigation for convective heat transfer of nanofluid laminar flow inside a circular pipe by applying various models. *Archives of Thermodynamics*, 42, pp.71-95. DOI:10.24425/ather.2021.136948.
29. Uribe, S., Zouli, N., Cordero, M.E. and Al-Dahhan, M. 2021. Development and validation of a mathematical model to predict the thermal behaviour of nanofluids. *Heat Mass Transf*, 57, pp.93-110. <https://link.springer.com/article/10.1007/s00231-020-02927-5>.
30. Taskesen, E., Tekir, M., Gedik, E. and Arslan, K. 2021. Numerical investigation of laminar forced convection and entropy generation of Fe3O4/water nanofluids in different cross-sectioned channel geometries. *J. Therm. Eng*, 7, pp.1752-1767. <http://dx.doi.org/10.18186/thermal.1025984>.
31. Yildiz, M. and Aktürk, A. 2021. Numerical investigation on heat transfer and hydraulic performance of Al2O3-Water nanofluid as a function of reynolds number and flow velocity. *Int. J. Heat Mass Transf*, 11, pp.535-547. <http://dx.doi.org/10.21597/jist.770939>.
32. Zhang, X. and Li, J. 2022. A review of uncertainties in the study of heat transfer properties of nanofluids. *Heat Mass Transf*, pp.1-33. <http://dx.doi.org/10.1007/s00231-022-03276-1>.
33. Goutam, S. and Paul, M.C. 2014. Discrete phase approach for nanofluids flow in pipe. In: *Second International Conference on Advances In Civil, Structural and Mechanical Engineering- CSM 2014*, 16-17 Nov. <https://doi.org/10.15224/978-1-63248-054-5-59>.
34. Deepak Selvakumar, R., Dhinakaran. S., 2017. Heat transfer and particle migration in nanofluid flow around a circular bluff body using a two-way coupled Eulerian-Lagrangian approach. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 115, pp.282-293. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2017.07.103>.
35. Bovand, M., Rashidi, S., Ahmadi, G. and Abolfazli Esfahani, J. 2016. Effects of trap and reflect particle boundary conditions on particle transport and convective heat transfer for duct flow-A two-way coupling of Eulerian Lagrangian Model, *Applied Thermal Engineering*. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2016.07.124>.
36. Franziska Greifzu, Christoph Kratzsch, Thomas Forgber, Friederike Lindner. and Rüdiger Schwarze. 2016. Assessment of particle-tracking models for dispersed particle-laden flows implemented in OpenFOAM and ANSYS FLUENT. *Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics*. <http://dx.doi.org/10.1080/19942060.2015.1104266>
37. Crowe, C.T., Chung, J.N., and Troutt, T.R., 1988. Particle Mixing in Free Shear Flows. *Progress in Energy and Combustion Science*, 14(3), pp.171-194. [https://doi.org/10.1016/0360-1285\(88\)90008-1](https://doi.org/10.1016/0360-1285(88)90008-1).
38. Fessler, J.R. and Eaton, J.K., 1999. Turbulence modification by particles in a backward-facing step flow. *Journal of Fluid Mechanics*, 394, pp.97-117. <https://doi.org/10.1017/S0022112099005741>.
39. YU KIN FUNG. 2015. Numerical investigation on the interaction between particles and eddies in gas-particle flows behind a backward-facing step.
40. Ranut, P. and Nobile, E. 2014. Multiphase flows examples solved with ANSYS CFX. Università degli Studi di Trieste. Dipartimento di Ingegneria e Architettura.
41. Chan, C.K., Zhang, H.Q. and Lau, K.S., 2001. Numerical simulation of gas-particle flows behind a backward-facing step using an improved stochastic separated flow model. *Computational Mechanics*, 27, pp.412-417.