مجله مهندسی مکانیک مدرس، آبان 1394، دوره 15، شماره 8، ص‌ص 105-115

ماهنامه علمی پژوهشی

مهندسی مکانیک مدرس

mme.modares.ac.ir



مطالعه عددی پخش و نشست ذرات کروی با اندازه نانو و میکرو در جریان گاز تراکم-ناپذیر آشفته در داخل یک کانال دارای زبری مصنوعی

یوسف همتی[1]، روح اله رفعی[2*]

1- کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه سمنان، سمنان
2- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه سمنان، سمنان
* سمنان، صندوق پستی 19111-35131، rafee@semnan.ac.ir

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل
دریافت: 26 فروردین 1394
پذیرش: 31 اردیبهشت 1394
ارائه در سایت: 30 خرداد 1394

کلید واژگان:
جریان دوفازی
زبری مصنوعی
نشست ذرات
مدل فاز گسسته

چکیده

پدیده پخش و نشست ذرات نانو و میکرو در جریان آشفته در چند دهه گذشته مورد توجه قرار گرفته است. در این مقاله، پخش و نشست ذرات در جریان آشفته تراکم‌ناپذیر دوفازی گاز- ذره در داخل کانال دوبعدی دارای زبری مصنوعی (برجستگی‌های منظم) مستطیلی با استفاده از روش اویلری- لاگرانژی مورد بررسی قرار گرفته است. جریان فاز گاز با استفاده از مدل آشفتگی RSM با تابع بهبودیافته دیواره شبیه‌سازی شده است. اعتبار شبیه‌سازی جریان فاز گاز با مقایسه نتایج آن با داده‌های تجربی موجود برای جریان آشفته توسعه یافته در یک کانال نامتقارن بررسی شده است. ردیابی ذرات در فاز گسسته با استفاده از مدل لاگرانژی انجام شده است. معادله لاگرانژی حرکت ذره شامل نیروی درگ، نیروی گرانش، نیروی بالابر سافمن و نیروی براونی می‌باشد. اعتبارسنجی شبیه‌سازی حرکت ذرات با مقایسه بین نتایج حاضر با معادلات تجربی و نتایج معتبر قبلی برای حرکت ذرات داخل یک کانال دوبعدی صاف انجام شده است. نتایج شبیه‌سازی فاز گاز نشان می‌دهد که با افزایش ارتفاع زبری مصنوعی، گردابه‌های ایجاد شده در فضای بین دو زبری بزرگتر می‌شود. نتایج فاز ذرات نشان می‌دهد که مقادیر رسوب در کانال‌های دارای زبری مصنوعی، تابع دو عامل نیروی گرانش و الگوی جریان گاز در فضای بین دو زبری است. مقادیر رسوب برای ذرات سبک، بیش‌تر تابع الگوی جریان در فضای بین دو زبری است و با بزرگتر شدن ذرات، اثر الگوی جریان کمتر و اثر نیروی گرانش بیش‌تر می‌شود.

Numerical study on dispersion and deposition of nano and micro spherical particles in turbulent incompressible gas flow inside a channel with artificial roughness

Yousof Hemmati, Roohollah Rafee*

Faculty of Mechanical Engineering, Semnan University, Semnan, Iran.
* P.O.B. 35131-19111 Semnan, Iran, rafee@semnan.ac.ir

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper
Received 15 April 2015
Accepted 21 May 2015
Available Online 20 June 2015

Keywords:
Two-Phase Flow
Artificial Roughness
Particle deposition
Discrete Phase Model

ABSTRACT

Phenomenon of dispersion and deposition of nano- and micro-particles in turbulent flows have been focused on in the past decades. In this paper, particle dispersion and deposition in gas-particle two-phase turbulent flow inside a two-dimensional channel with rectangular artificial roughness is studied using an Eulerian–Lagrangian method. The RSM turbulence model with enhanced wall treatment was used to simulate the anisotropic turbulent gas phase flow. The gas phase flow predictions were validated by comparing the results with available experimental data for a fully developed asymmetric turbulent channel flow. In discrete phase, Lagrangian approach was applied for particle tracking. The Lagrangian equation of particle motion includes drag, gravity, Saffman lift, and Brownian forces. The particle phase simulation results were validated by comparing the present work with available equations and valid data for a gas particles turbulent flow inside a two-dimensional smooth channel. The gas phase simulation results show that by increasing the artificial roughness height, a recirculation region that is created in the space between two ribs, becomes larger. The particle phase results show that the rate of deposition in the channel with artificial roughness is a function of gravity force and flow pattern in the mentioned space. The rate of deposition for small particle is affected significantly by gas flow pattern in the space between two ribs. However, for large particles the gravity force is more dominant.

1- مقدمه

جریان‌های چندفازی به طور گسترده در طبیعت و صنایع مختلف مشاهده می‌شوند. از انواع جریان‌های چندفازی می‌توان به جریان دوفازی سیال- ذرات جامد اشاره کرد. این نوع جریان در بسیاری از زمینه‌های مهندسی از جمله تمیز کردن هوا، خوردگی نازل‌ها و پره‌های توربوماشین‌ها و تجهیزات نیوماتیک در اثر برخورد ذرات موجود در سیال با آن‌ها نقش مهمی دارد.

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

Please cite this article using:
Y. Hemmati, R. Rafee, Numerical study on dispersion and deposition of nano and micro spherical particles in turbulent incompressible gas flow inside a channel with artificial roughness, *Modares Mechanical Engineering,* Vol. 15, No. 8, pp. 105-115, 2015 (In Persian)

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-03-28]

[DOR: 20.1001.1.10275940.1394.15.8.48.8]

تزریق سوخت مایع برای احتراق، تکنولوژی پودر، صنایع داروسازی، چاپگرهای لیزری، عکس برداری لیزری، غبارگیرهای الکتریکی، صنایع شیمیایی، رسوب در تجهیزات انتقال حرارت، جریان ذرات گرد و غبار در داخل فیلترها و جداکننده‌های سیکلونی، اسپری‌های رنگ‌پاشی و شن‌پاشی، ساخت ریزتراشه‌های میکرونی و سایر تجهیزات پزشکی از دیگر کاربردهای این نوع جریان دو فازی می‌باشد.

رسوب ذرات یک پدیده مهم در مسائل متعدد زیست‌محیطی از قبیل آلودگی‌های اسیدی هوا، پراکندگی آلاینده‌ها در جو، چگونگی پخش ذرات در محیط داخل خانه، استنشاق گرد و غبار سمی و غیره می‌باشد. به این منظور در دهه‌های اخیر مطالعات وسیعی در زمینه این نوع از جریان‌های دوفازی صورت گرفته است.

جریان‌های گاز- ذره، یک دسته خاص از جریان‌های دوفازی است که در آن ذرات کوچک درون گاز معلق می‌باشند. تبادلات مومنتم و انرژی بین دو فاز می‌تواند به واسطه مکانیزم برهم کنش لزجت و انتقال حرارت جابه‌جایی رخ بدهد (این در صورتی است که از دیگر منابع تبادل، مانند انتقال جرم در اثر تبخیر، تقطیر و یا واکنش‌های شیمیایی صرف‌نظر شود). مقدار ذرات ممکن است آن قدر کم باشد که میدان جریان گاز تحت تأثیر حضور ذرات واقع نشود. در چنین حالتی، تأثیر پذیری یک‌طرفه حرکت ذرات از جریان گاز، نحوه تعامل فیزیکی بین دو فاز را بیان می‌دارد. از طرف دیگر، مقدار ذرات ممکن است آن قدر زیاد باشد که میدان جریان گاز به طور قابل توجهی تحت تأثیر حضور ذرات واقع شده و یا حتی نیاز به در نظر گرفتن کسر حجمی اشغال شده توسط ذرات باشد. در چنین حالتی ارتباط دوطرفه بین سیال و ذرات برقرار می‌شود. فرض ارتباط یک‌طرفه اصولاً زمانی معتبر است که نسبت بارگیری[1] کمتر از ده درصد باشد [1]. نسبت بارگیری توسط رابطه (1) بیان می‌شود.

$$\beta = \frac{\rho_{\mathrm{pp}}}{\rho_{\mathrm{p}}} \qquad (1)$$

در رابطه (1)، β نسبت بارگیری، ρ_{pp} چگالی فاز ذرات و ρ_{p} چگالی جنس ذرات است.

در مدل‌های ارتباط یک‌طرفه و دوطرفه، دیدگاه نگرش حاکم بر ذرات می‌تواند یکی از دو دیدگاه کلی الف یا ب باشد:

الف) روشی که در آن جریان را به صورت مخلوطی از یک سیال همراه با ذرات جامد معلق در آن در نظر می‌گیرد و حرکت تک‌تک ذرات را به طور جدا از هم بررسی می‌کند و در واقع نگرشی اویلری- لاگرانژی به مسأله دارد.

ب) روشی که در آن جریان را یک جریان دوفازی (فاز سیال- ذرات جامد) در نظر می‌گیرد و در واقع با مدل دوسیالی و نگرش اویلری- اویلری مساله را بررسی می‌کند.

روش اویلری- لاگرانژی در مورد ذرات جامد، در مواردی که کسر حجمی و جرمی ذرات کم باشد، مدل مناسبی برای ارتباط یک طرفه است. در ارتباط دوطرفه بین گاز و ذرات جامد، محاسبه جملات چشمه‌ای ناشی از اثرات فاز ذرات در فاز گاز ضروری است. در روش دوم، هر دو فاز جریان با نگرش اویلری بررسی می‌شوند. با این حال ساده‌سازی‌های متعددی در مورد معادلات و شرایط مرزی مسأله مورد مطالعه باید در نظر گرفته شود [2]. لازم به ذکر است که نگرش اویلری- اویلری معمولاً در مورد جریان‌های غلیظ که نسبت بارگیری بیش‌تر از ده درصد می‌باشد، از دقت مناسبی برخوردار است [2]. در این مقاله با فرض نسبت بارگیری کمتر از ده درصد، از روش اویلری- لاگرانژی استفاده شده است. مدل‌های محاسباتی، یک ابزار بسیار مفید به منظور درک عمیق‌تر و طراحی بهتر در این زمینه می‌باشد. ناتوانی روش‌های تحلیلی در لحاظ نمودن پیچیدگی‌های موجود در مسائل حقیقی و از طرف دیگر، مشکلات موجود در بررسی‌های تجربی و تکنیک‌های اندازه‌گیری سبب شده تا مدل‌های محاسباتی در این بین از اهمیت ویژه‌ای برخوردار باشند.

در طی سال‌های گذشته، مطالعات گسترده‌ای در زمینه پخش و نشست ذرات در جریان‌های دو فازی صورت گرفته است. شبیه‌سازی کامپیوتری برای تجزیه و تحلیل پخش و نشست ذرات در میدان جریان آشفته توسط بسیاری از محققان گزارش شده است. اونیس و احمدی [3] با استفاده از روش طیفی انرژی[2] به آنالیز پخش ذرات کروی کوچک در میدان جریان آشفته تصادفی پرداختند. فن و احمدی [4] به منظور بررسی اثرات ساختار جریان گردابی آشفته در نزدیکی دیواره بر مقدار نشست ذرات در کانال عمودی با سطح صاف و زبر، یک مدل زیر لایه ارائه نمودند. ماتیدا و همکاران [5] با استفاده از پروفیل آشفته متوسط به دست آمده از داده‌های شبیه‌سازی مستقیم عددی[3] به شبیه‌سازی آماری نشست ذرات در جریان آشفته داخل لوله پرداختند. وانگ و جیمز [6] به بررسی اثرات ناهمسانگردی[4] بر پراکندگی ذرات در اثر آشفتگی و نشست ذرات کوچک پرداختند. اخیراً محققان به شبیه‌سازی نشست ذرات در مقیاس نانو و میکرو در هندسه‌های پیچیده پرداخته‌اند. مثال‌هایی از این مطالعات برای ریه انسان توسط لی و احمدی [7] و ژانگ و کلینسترور [8] گزارش شده است.

اسکوئیرس و سیمونین [9] به بررسی تأثیر زبری دیواره بر روی پخش ذرات در یک جریان آشفته حاوی ذرات در داخل یک کانال با استفاده از روش شبیه‌سازی گردابه بزرگ[5] برای جریان سیال و شبیه‌سازی ذره گسسته [6] برای فاز ذرات پرداختند. آن‌ها به این نتیجه رسیدند که زبری دیواره موجب افزایش انتقال آشفتگی در جهت عمود بر دیواره می‌شود که این پدیده موجب افزایش سرعت نوسانی ذره در عرض کل جریان و در نتیجه افزایش میزان رسوب خواهد شد.

لیو و احمدی [10] به مطالعه انتقال، پخش و رسوب ذرات در نزدیکی یک مدل ساختمانی پرداختند. آن‌ها جریان متوسط هوا را با استفاده از کد فلوئنت[7] و سرعت لحظه‌ای نوسانات آشفتگی را نیز با استفاده از مدل گوسی فیلتر شده نویز سفید[8] شبیه‌سازی نمودند. آن‌ها به این نتیجه رسیدند که نیروی گرانش بر الگوی رسوب ذرات بزرگتر از 10 میکرون اثر می‌گذارد. همچنین اثر حرکت براونی تنها برای ذرات کوچک‌تر از 0/1 میکرون مهم و برای ذرات بزرگ‌تر از چند میکرون ناچیز است.

تیان و احمدی [11] به مقایسه مدل‌های مختلف در پیش‌بینی رسوب ذرات در جریان آشفته کانال پرداختند. نتایج شبیه‌سازی برای حالت‌های مختلف با نتایج تجربی مقایسه شده و دقت هر یک مورد بررسی قرار گرفت. آن‌ها به این نتیجه رسیدند که مدل آشفتگی تنش رینولدزی[9] (RSM) به دلیل در نظر گرفتن اثرات ناهمسانگردی، پیش‌بینی دقیق‌تری از مقادیر

1- Mass Loading

2- Energy Spectral Method
3- Direct Numerical Simulation
4- Anisotropy
5- Large Eddy Simulation
6- Discrete Particle Simulation
7- FLUENT Code
8- Gaussian-Filtered White-Noise Model
9- Reynolds Stress Model

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-03-28]

[DOR: 20.1001.1.10275940.1394.15.8.48.8]

رسوب نسبت به مدل k-ε ارائه می‌نماید. همچنین استفاده از مدل دولایه[1] نسبت به تابع استاندارد دیواره[2]، منجر به برآورد دقیق‌تری در مقادیر رسوب می‌شود.

گائو و همکاران [12] به بررسی توانایی و دقت سه مدل آشفتگی RSM، RNG k-ε و SST k-ω در پیش‌بینی رسوب ذرات در جریان آشفته داخل کانال‌های افقی و عمودی پرداختند. سه مدل آشفتگی فوق با و بدون اصلاحات آشفتگی نزدیک دیواره مورد بررسی قرار گرفتند. آن‌ها به این نتیجه رسیدند که مدل RSM قادر است مقادیر رسوب را به خوبی پیش‌بینی نماید و هنگامی که با اصلاحات نزدیک دیواره ترکیب می‌شود، نتایج بهتری را نشان می‌دهد.

برخی از محققان به بررسی سرعت رسوب‌گذاری ذرات بر روی سطوح زبر پرداخته‌اند. به عنوان مثال لای و همکارانش [13]، مقدار سرعت رسوب را برای چهار نوع المان زبر در داخل کانال هوا به طور تجربی مطالعه نمودند و نشان دادند که سرعت رسوب در کانال‌های زبر بسیار بیشتر از کانال‌های صاف است. در نهایت تأکید نمودند که برای فهم بیشتر فیزیک پدیده رسوب ذرات در سطوح زبر آزمایش‌های بیشتر و مدل‌سازی جریان در نزدیکی المان‌های زبری به کمک دینامیک سیالات محاسباتی ضروری است.

از دیگر مطالعات در زمینه رسوب ذرات بر روی سطوح زبر می‌توان به مطالعه شمس و همکاران [14] اشاره کرد که در آن سرعت ته‌نشینی سه دسته از ذرات با جنس‌های مختلف (شیشه‌ای کروی، پلیمری با شکل غیر منتظم و ذرات سیلیسی فیبر گون) بر روی سطوح زبر بطور تجربی مطالعه شده است. از سوی دیگر حسین و همکاران [15]، سرعت ته‌نشینی ذرات را بر روی صفحات زبر از جنس کاغذ دیواری، گچ دیوار و دو نوع فرش در داخل یک محفظه تست برای ذرات باسایز 0/03 تا 5 میکرومتر بصورت آزمایشگاهی بررسی نمودند و نتایج را با صفحات صاف آلومینیومی مقایسه کردند. البته در مطالعات مورد اشاره، اثرات الگوی جریان در اطراف زبری و ابعاد زبری‌های مصنوعی بر سرعت رسوب بررسی نشده است.

شبیه‌سازی میدان جریان گاز و حرکت ذرات در اطراف زبری‌ها و برجستگی‌های منظم در مسیرهای عبور گاز و ذرات، در فهم فیزیکی پدیده نشست ذرات بسیار مهم است. هدف از کارهای انجام شده در کانال‌های صاف، مانند شبیه‌سازی عددی تیان و احمدی [11] و شبیه‌سازی عددی گائو و همکارانش [12] معرفی مدل‌های مناسب به منظور پیش‌بینی مقادیر رسوب در کانال‌های صاف بدون زبری بوده است. همچنین در مطالعات انجام شده در کانال‌های زبر (مانند شبیه‌سازی عددی اسکوئیرس و سیمونین [9]) تأثیر وجود زبری به عنوان یک برجستگی بر روی دیواره و اثرات وجود زبری و ابعاد آن (به عنوان مثال عرض زبری‌ها) بر میدان جریان و مقایر رسوب بررسی نشده است. از سوی دیگر فرمول‌های ارائه شده برای محاسبه سرعت رسوب در کانال‌های زبر طبیعی پیش‌بینی می‌کنند که با افزایش ارتفاع متوسط زبری مقدار رسوب همواره افزایش می‌یابد. در حالی که در کانال‌های با زبری مصنوعی، همانطور که در این مقاله بررسی می‌شود با افزایش بیشتر ارتفاع زبری مقدار سرعت رسوب لزوماً افزایش نمی‌یابد. در این مقاله تغییرات سرعت نشست ذرات با تغییر در ابعاد زبری مصنوعی مستطیلی در جریان آشفته تراکم‌ناپذیر کانال دوبعدی با استفاده از روش اویلری- لاگرانژی بررسی گردیده است. اثر میدان جریان بین زبری‌های مصنوعی و نقش ابعاد زبری (نظیر عرض و ارتفاع آن) در کانال‌های زبر مصنوعی بر مقادیر سرعت رسوب به طور مستقیم شبیه‌سازی شده است.

به منظور تولید شبکه از نرم‌افزار گمبیت[3] و برای شبیه‌سازی جریان گاز (فاز پیوسته) و ردیابی[4] ذرات (فاز گسسته) از نرم افزار فلوئنت[5] استفاده شده است. برای شبیه‌سازی جریان گاز از مدل تنش رینولدزی (RSM) استفاده شده است. دلیل استفاده از مدل RSM، پیش‌بینی ناهمسانگرد گردابه‌ها توسط این مدل است. همچنین برای مدل کردن جریان‌های نزدیک دیواره، از تابع بهبودیافته دیواره[6] کمک گرفته شده است. فاز ذرات نیز با استفاده از مدل فاز گسسته[7] ردیابی می‌شود.

2- معادلات حاکم

2-1- معادلات حاکم بر جریان گاز

در این مطالعه، سرعت متوسط ورودی جریان گاز در کانال، 3 متر بر ثانیه و بیش‌ترین سرعت موضعی جریان گاز در کانال کمتر از 3/5 متر بر ثانیه است. همچنین سرعت صوت در دمای 288 کلوین و در جو زمین تقریباً برابر 340 متر بر ثانیه می‌باشد. در نتیجه، عدد ماخ[8] (نسبت سرعت جریان گاز به سرعت صوت) تقریباً برابر 0/01 است. بنابراین می‌توان جریان را تراکم‌ناپذیر در نظر گرفت. معادلات حاکم بر جریان گاز در حالت تراکم‌ناپذیر و پایا را می‌توان به صورت کلی مطابق رابطه (2) بیان کرد.

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho_f u_i \varphi) = \frac{\partial}{\partial x_i}\left(\Gamma_\varphi \frac{\partial \varphi}{\partial x_i}\right) + S_\varphi \qquad (2)$$

که در آن φ متغیر اصلی معادله انتقال، Γ_φ ضریب نفوذ[9] و S_φ جمله می‌باشد. پارامترهای مخصوص برای φ، Γ_φ و S_φ در جدول 1 ذکر شده است.

در جدول 1، μ لزجت دینامیکی، μ_t لزجت آشفتگی، k انرژی جنبشی آشفتگی، ε نرخ اضمحلال انرژی جنبشی آشفتگی، R_{ij} تانسور تنش رینولدز، P_{ij} مقدار تولید تنش، φ_{ij} مقدار کرنش فشاری، ε_{ij} مقدار اتلاف آشفتگی و G_k مقدار تولید انرژی جنبشی آشفتگی می‌باشد. مقادیر و ثوابت موجود در جدول 1 برای مدل RSM توسط رفعی و همکاران [16] تشریح شده است.

2-2- تابع بهبودیافته دیواره[11]

توابع دیواره، در حقیقت پروفیل‌های تحلیلی جریان در لایه مرزی مجاور دیواره هستند، که با استفاده از روش‌های تحلیلی و از حل صریح معادلات جریان در نزدیکی دیواره بدست می‌آیند. برای بدست آوردن روشی که کاربرد آن را بتوان در ناحیه نزدیک دیواره گسترش داد، لازم است که برای کل

جدول 1 مقادیر φ، Γ_φ و S_φ در معادله کلی انتقال

معادله	φ	Γ_φ	S_φ
پیوستگی	1	0	0
مومنتم	u_i	μ	$-\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j}(-\rho R_{ij})$
تنش رینولدز	R_{ij}	$\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k}$	$P_{ij} + \varphi_{ij} - \varepsilon_{ij}$
نرخ اضمحلال انرژی جنبشی آشفتگی	ε	$\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon}$	$\frac{\varepsilon}{k}(C_{1\varepsilon}G_k - C_{2\varepsilon}\rho\varepsilon)$

1- Two-Layer Zonal
2- Standard Wall Function
3- Gambit
4- Track
5- Fluent
6- Enhanced Wall Treatment
7- Discrete Phase Model
8- Mach Number
9- Diffusion Coefficient
10- Source Term
11- Enhanced Wall Treatment

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-03-28]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1394.15.8.48.8]

ناحیه دیوار، قانون دیواره فرمول‌بندی شود. بدین منظور، کادر [17] با استفاده از یک تابع ترکیب‌کننده، رابطه (3) را پیشنهاد نموده است.

$$\frac{u}{u^*} = e^{\Gamma} u^+_{laminar} + e^{\frac{1}{\Gamma}} u^+_{turbulent} \quad (3)$$

Γ تابع ترکیب‌کننده می‌باشد و توسط رابطه (4) [17] تعریف می‌شود.

$$\Gamma = -\frac{0.01(y^+)^4}{1 + 5y^+} \quad (4)$$

$u^+_{laminar}$ پروفیل سرعت بی‌بعد در زیرلایه آرام[1] و $u^+_{turbulent}$ پروفیل سرعت بی‌بعد در زیرلایه لگاریتمی[2] می‌باشد و به ترتیب توسط رابطه‌های (5) و (6) [17] تعریف خواهند شد.

$$u^+_{laminar} = y^+ \quad (5)$$

$$u^+_{turbulent} = \frac{1}{\kappa} \ln(E y^+) \quad (6)$$

در رابطه (6)، $\kappa = 0.4178$ ثابت فون کارمن[3] و $E = 9.793$ ثابت تجربی برای قانون لگاریتمی است.

معادله کلی توسط رابطه (7) [17] بیان خواهد شد.

$$\frac{du^+}{dy^+} = e^{\Gamma} \frac{du^+_{laminar}}{dy^+} + e^{\frac{1}{\Gamma}} \frac{du^+_{turbulent}}{dy^+} \quad (7)$$

2-3- معادله حاکم بر حرکت ذره

در این مقاله فرض می‌شود که جریان به اندازه کافی رقیق و ارتباط یک‌طرفه بین جریان گاز و ذرات وجود دارد. رابطه (8)، معادله حاکم بر حرکت ذره را بیان می‌کند [11].

$$\frac{d\overrightarrow{u_p}}{dt} = \frac{1}{\tau} \frac{C_D Re_P}{24} (\vec{u} - \overrightarrow{u_p}) + \overrightarrow{F_L} + \vec{g} + \overrightarrow{n(t)} \quad (8)$$

u_p سرعت ذره است و ب رابطه (9) بیان می‌شود. τ زمان استراحت ذره می‌باشد و با استفاده از رابطه (10) تعریف می‌گردد. C_D ضریب درگ، Re_P عدد رینولدز ذره، F_L نیروی بالابر سافمن[4]، g_i شتاب گرانش و $n(t)$ نیروی براونی[5] در واحد جرم می‌باشد. در این مقاله، نیروی عمده که بیش‌ترین تأثیر در مقادیر رسوب دارد، نیروی درگ و گرانش می‌باشند.

$$u_p = \frac{dx_p}{dt} \quad (9)$$

$$\tau = \frac{S d_p^2 C_c}{18\nu} \quad (10)$$

S نسبت چگالی ذره به سیال است و با رابطه (11) بیان می‌شود. ρ_p چگالی ذره، ρ_f چگالی سیال، d_p قطر ذره، ν ویسکوزیته سینماتیکی سیال و C_c ضریب تصحیح لغزش استوکس-کانینگهام[6] می‌باشد و طبق رابطه (12) محاسبه می‌شود [16].

$$S = \frac{\rho_p}{\rho_f} \quad (11)$$

$$C_c = 1 + \frac{2\lambda_g}{d_p} \left(1.257 + 0.4e^{-\left(\frac{1.1 d_p}{2\lambda_g}\right)}\right) \quad (12)$$

در رابطه 12، λ_g مسیر آزاد متوسط[7] مولکولی گاز می‌باشد.

عدد رینولدز ذره با رابطه (13) تعریف می شود.

$$Re_P = \frac{d_p |\vec{u} - \overrightarrow{u_p}|}{\nu} \quad (13)$$

ذرات به صورت کروی در نظر گرفته شده‌اند. بنابراین ضریب درگ با استفاده از روابط (14) و (15) [18] تعریف می‌شوند.

$$C_D = \frac{24}{Re_p} \qquad Re_P < 1 \quad (14)$$

$$C_D = \frac{24}{Re_p} \left(1 + 0.15 Re_p^{0.687}\right) \qquad 1 < Re_P < 400 \quad (15)$$

نیروی بالابر سافمن با استفاده از رابطه (16) [16] محاسبه می‌شود.

$$F_L = \frac{2 k_L \nu^{\frac{1}{2}} d_{ij}}{S d_p (d_{lk} d_{kl})^{\frac{1}{4}}} (\vec{u} - \overrightarrow{u_p}) \quad (16)$$

در رابطه (16)، $k_L = 2.594$ ضریب ثابت نیروی بالابر سافمن[8] [19] و d_{ij} تانسور نرخ تغییر شکل سیال[9] است و با رابطه 17 بیان می‌شود.

$$d_{ij} = \frac{1}{2}\left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i}\right) \quad (17)$$

حرکت براونی، $n(t)$، به عنوان یک فرایند تصادفی نویز سفید گوسی[10] با چگالی طیفی S_0 مطابق با رابطه (18) [20] مدل می‌شود.

$$S_0 = \frac{216 \nu k_b T}{\pi^2 \rho_f d_p^5 S^2 C_c} \quad (18)$$

در رابطه (18)، T دمای مطلق و k_b ثابت بولتزمن و برابر رابطه (19) [20] است.

$$k_b = 1.38 \times 10^{-23} \ (J/K) \quad (19)$$

اگر نسبت چگالی ذره به سیال بسیار زیاد باشد نیروی جرم مجازی و براونی قابل صرف‌نظر است. شبیه‌سازی‌های انجام شده توسط مؤلفان نشان می‌دهد که اثرات حذف نیروی سافمن از شبیه‌سازی در این مورد اثر چندانی ندارد. اما همان‌طور که در تحلیل‌ها نیز بیان شده، نیروی وزن برای ذرات بزرگ بر سرعت رسوب کاملاً تأثیرگذار است.

2-4- مدل فاز گسسته[11]

در مدل فاز گسسته، اثر آشفتگی حرکت ذره توسط تجزیه u به صورت رابطه (20) نشان داده می‌شود.

$$u_i = \bar{u}_i + u'_i \quad (20)$$

که در آن $\bar{u}$ سرعت متوسط جریان سیال است که توسط معادلات ناویراستوکس محاسبه می‌شود و u' سرعت نوسانی ناشی از آشفتگی است که باید مدل شود (روابط 32 و33). اگر ذرات کاملاً به صورت کروی و تنها نیروی وارد بر آن‌ها نیروی درگ در نظر گرفته شود، معادله حرکت ذره به فرم رابطه (21) نوشته می‌شود.

$$\frac{d\overrightarrow{u_p}}{dt} = \frac{(\vec{u} - \overrightarrow{u_p})}{\tau} \quad (21)$$

در این صورت زمان استراحت ذره با رابطه (22) تعریف می‌شود.

$$\tau = \frac{4}{3} \frac{\rho_p d_p}{\rho |\vec{u} - \overrightarrow{u_p}| C_d} \quad (22)$$

با استفاده از روش گسسته سازی ضمنی اویلری برای معادله (21)، سرعت ذره در زمان $n + 1$ مطابق رابطه (23) می‌باشد.

1- Laminar Sublayer
2- Logarithmic Sublayer
3- Von Kármán Constant
4- Saffman Lift Force
5- Brownian force
6- Stokes-Cunningham Slip Correction Factor
7- Mean Free Path
8- Constant Coefficient of Saffman Lift Force
9- Deformation Rate Tensor of the Fluid
10- Gaussian white noise random process
11- DPM

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-03-28]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1394.15.8.48.8]

$$\vec{u}_{\mathrm{p}}^{n+1} = \frac{\vec{u}_{\mathrm{p}}^{n} + \frac{\vec{u}^{n+1}\Delta t}{\tau}}{1 + \frac{\Delta t}{\tau}} \quad (23)$$

موقعیت ذره با روش ذوزنقه‌ای مطابق رابطه (24) گسسته می‌شود.

$$x_{\mathrm{p}}^{n+1} = x_{\mathrm{p}}^{n} + 0.5\Delta t(u_{\mathrm{p}}^{n+1} + u_{\mathrm{p}}^{n}) \quad (24)$$

همچنین انتخاب گام زمانی Δt به صورت رابطه (25) [21] مناسب می‌باشد.

$$\Delta t = \frac{\min(t_{\mathrm{cv}}\,,\ \tau\,,\ t_{\mathrm{int}})}{5} \quad (25)$$

در رابطه (25)، t_{cv} زمان عبور ذره از یک سلول، τ زمان استراحت ذره و t_{int} مدت زمان برهم کنش ذره با گردابه می‌باشد و توسط رابطه (26) [21] بیان می‌شود.

$$t_{\mathrm{int}} = \min(t_{\mathrm{e}}, t_{\mathrm{cross}}) \quad (26)$$

که در آن t_{e} طول عمر گردابه[1] است که در حالت ثابت طبق رابطه (27) [11] بیان می‌شود.

$$t_{\mathrm{e}} = 2T_L \quad (27)$$

و در حالت تصادفی طول عمر گردابه با استفاده از رابطه (28) [11] محاسبه می‌شود.

$$t_{\mathrm{e}} = -T_L \log(\zeta) \quad (28)$$

در رابطه (18)، ζ عدد تصادفی یکنواخت[2] بین صفر و یک و T_{L} مقیاس زمانی انتگرالی لاگرانژی ذره[3] می‌باشد و با استفاده از رابطه (29) [11] تعریف می‌شود.

$$T_L = \mathrm{C_L}\frac{k}{\varepsilon} \quad (29)$$

C_L ثابت مقیاس زمانی انتگرالی[4] می‌باشد که هنوز یک مقدار کلی برای آن تعیین نشده است. در برخی مراجع مقدار این ثابت در محدوده بین 0/2 تا 0/96 گزارش شده است [11]. در نرم‌افزار فلوئنت برای مدل RSM، مقدار این ثابت برابر 0/3 پیشنهاد شده است.

t_{cross} زمان عبور ذره از گردابه[5] است و با رابطه (30) [21] تعریف می‌شود.

$$t_{\mathrm{cross}} = -\tau \ln\left(1 - \frac{L_{\mathrm{e}}}{\tau|u - u_p|}\right) \quad (30)$$

در رابطه (30)، L_{e} مقیاس طولی گردابه[6] (اندازه گردابه) است و با استفاده از رابطه (31) [12] تعریف می‌شود.

$$L_{\mathrm{e}} = 0.164\frac{k^{\frac{3}{2}}}{\varepsilon} \quad (31)$$

مقادیر سرعت‌های نوسانی با استفاده از رابطه (32) محاسبه خواهند شد.

$$u_i' = \xi\sqrt{\overline{u_i'^2}} \quad (32)$$

در رابطه (32)، ξ عدد تصادفی گوسی[7] با متوسط صفر و انحراف استاندارد واحد[8] می‌باشد و $\sqrt{\overline{u_i'^2}}$ ریشه دوم متوسط[9] زمانی سرعت‌های نوسانی در جهت i است.

در مدل RSM مقادیر سرعت‌های نوسانی با استفاده از رابطه (33) محاسبه می‌شود.

$$u' = \xi\sqrt{\overline{u'^2}}\ ,\quad v' = \xi\sqrt{\overline{v'^2}}\ ,\quad w' = \xi\sqrt{\overline{w'^2}} \quad (33)$$

2-5- سرعت رسوب[10]

شبیه‌سازی نتایج برای رسوب ذرات معمولاً در یک فرم بدون بعد سرعت رسوب برای مقایسه با داده‌های تجربی و مدل‌های تجربی ارائه شده است. سرعت رسوب بی‌بعد برای ذرات در نزدیکی یک سطح با استفاده رابطه (34) محاسبه خواهد شد.

$$\mathrm{u_d^+} = \frac{J}{C_0 u^*} \quad (34)$$

در رابطه (34)، J شار جرمی ذرات به سمت دیواره در واحد زمان و $\mathrm{C_0}$ غلظت جرمی ذرات موجود در جریان سیال داخل کانال است.

در شبیه‌سازی کامپیوتری، سرعت رسوب ذرات به صورت رابطه (35) محاسبه می‌شود.

$$\mathrm{u_d^+} = \frac{N_{\mathrm{d}}/\mathrm{t_d^+}}{N_0/\mathrm{y_0^+}} \quad (35)$$

در رابطه (35)، N_0 تعداد اولیه ذرات که در ناحیه با فاصله بی‌بعد $\mathrm{y_0^+}$ از دیواره به صورت یکنواخت توزیع شده‌اند و N_d تعداد ذرات رسوبی در بازه زمانی $\mathrm{t_d^+}$ می‌باشد. $\mathrm{y_0^+}$ و $\mathrm{t_d^+}$ به ترتیب توسط روابط (36) و (37) تعریف می‌شوند.

$$\mathrm{y_0^+} = \frac{y_0 u^*}{\nu} \quad (36)$$

$$\mathrm{t_d^+} = \frac{t_{\mathrm{d}} u^*}{\nu} \quad (37)$$

در رابطه (36)، y_0 ناحیه توزیع ذرات و در رابطه (37)، t_d مدت زمان رسوب در شبیه‌سازی کامپیوتری می‌باشد.

رابطه تجربی ساده به منظور محاسبه سرعت رسوب بی‌بعد در کانال صاف توسط وود [22] به صورت رابطه (38) پیشنهاد داده شده است.

$$\mathrm{u_d^+} = 0.057\mathrm{S_c^{\frac{-2}{3}}} + 4.5 \times 10^{-4}\tau^{+^2} + \mathrm{u_t^+} \quad (38)$$

در رابطه (38)، $\mathrm{S_c}$ عدد اشمیت، τ^+ زمان استراحت بی‌بعد ذره و $\mathrm{u_t^+}$ ترم مربوط به ته‌نشینی گرانشی در مجرای افقی می‌باشد.

$$\mathrm{S_c} = \frac{\nu}{D} \quad (39)$$

D ضریب پخش جرمی ذره[11] می‌باشد که با رابطه (40) بیان می‌شود.

$$D = \frac{\mathrm{K_b}T}{3\pi\mu d_{\mathrm{p}}}\mathrm{C_c} \quad (40)$$

زمان استراحت بی‌بعد ذره طبق رابطه (41) تعریف می‌شود.

$$\tau^+ = \frac{\tau u^{*^2}}{\nu} = \frac{C_c\rho_p d_p^2 u^{*2}}{18\mu\nu} = \frac{\mathrm{SC_c}d_p^2 u^{*2}}{18\nu^2} \quad (41)$$

ترم $\mathrm{u_t^+}$ با رابطه (42) تعریف می‌شود.

$$\mathrm{u_t^+} = \tau^+ \mathrm{g^+} \quad (42)$$

در رابطه (42)، $\mathrm{g^+}$ توسط رابطه (43) تعریف خواهد شد.

$$\mathrm{g^+} = \frac{\nu}{\mathrm{u^{*3}}}\ g \quad (43)$$

فن و احمدی [4] یک معادله تجربی به منظور محاسبه سرعت رسوب بی‌بعد برای کانال عمودی (گرانش در جهت جریان) که در آن اثرات زبری سطح و

1- Eddy Lifetime
2- Uniform Random Number
3- Particle Lagrangian Integral Time Scale
4- Integral Time Scale Constant
5- Eddy Crossing Time
6- Eddy Length Scale
7- Gaussian Random Number
8- Unit Standard Deviation
9- Root Mean Square
10- Deposition Rate
11- Particle Mass Diffusivity

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-03-28]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1394.15.8.48.8]

گرانش لحاظ شده است را مطابق رابطه (44) ارائه نمودند.

$$u_d^+ = \begin{cases} 0.084 S_c^{\frac{-2}{3}} + \frac{1}{2} A \times B \times C & u_d^+ < 0.14 \\ 0.14 & \text{در غیر این صورت} \end{cases} \quad (44)$$

در رابطه (44)، مقادیر A، B و C به ترتیب توسط روابط (45)، (46) و (47) تعریف خواهند شد.

$$A = \left[\frac{\left(0.64K^+ + \frac{d^+}{2}\right)^2 + \frac{\tau^{+2} g^+ L_1^+}{0.01085\left(1+\tau^{+2} L_1^+\right)}}{3.42 + \frac{\tau^{+2} g^+ L_1^+}{0.01085\left(1+\tau^{+2} L_1^+\right)}} \right]^{\frac{1}{\left(1+\tau^{+2} L_1^+\right)}} \quad (45)$$

$$B = \left[1 + 8e^{\frac{-(\tau^+ - 10)^2}{32}}\right] \quad (46)$$

$$C = \frac{0.037}{1 - \tau^{+2} L_1^+ \left(1 + \frac{g^+}{0.037}\right)} \quad (47)$$

در رابطه (45)، مقادیر L_1^+، d^+ و K^+ به ترتیب توسط روابط (48)، (49) و (50) تعریف خواهند شد. d^+ قطر بی‌بعد ذره و K^+ زبری بی‌بعد سطح می‌باشد.

$$L_1^+ = \frac{3.08}{Sd^+} \quad (48)$$

$$d^+ = \frac{u^*}{\nu} d_p \quad (49)$$

$$K^+ = \frac{u^*}{\nu} K \quad (50)$$

در رابطه (50)، K ارتفاع متوسط زبری می‌باشد. بنا بر رابطه (50)، با افزایش ارتفاع متوسط زبری، زبری بی‌بعد سطح افزایش می‌یابد و در نتیجه طبق رابطه (45)، سرعت رسوب بی‌بعد زیاد می‌شود.

ویژگی مهم رابطه (44)، لحاظ نمودن اثرات زبری سطح در پیش‌بینی مقادیر سرعت رسوب بی‌بعد است. با توجه به این که در این مقاله، نشست ذرات در کانال‌های زبر مصنوعی بررسی می‌شود، همانطور که در بخش‌های بعدی اشاره شده است، در کانال مورد مطالعه لزوماً با افزایش ارتفاع زبری نرخ رسوب افزایش نمی‌یابد.

برای کانال افقی (گرانش عمود بر جهت جریان)، در معادله (45) و (47)، $g^+ = 0$ در نظر گرفته می‌شود و همزمان معادله (42) که ترم مربوط به ته‌نشینی گرانشی (u_t^+) می‌باشد، به معادله (44) اضافه می‌شود.

3- توصیف مسأله

سیال مورد استفاده در این مقاله، هوا با چگالی $\rho_f = 1.225\ kg/m^3$، لزجت دینامیکی $\mu = 1.84 \times 10^{-5}\ kg/ms$ و مسیر آزاد متوسط $\lambda_g = 6.8 \times 10^{-8} m$ و در دمای $T = 288K$ می‌باشد. برای مدل کردن آشفتگی جریان از مدل آشفتگی RSM به همراه تابع بهبودیافته دیواره استفاده شده است. در ورودی کانال از شرط مرزی سرعت ورودی، در خروجی کانال از شرط مرزی خروجی جریان و برای سطوح پایینی و بالایی کانال از شرط مرزی دیواره با شرط عدم لغزش[1] استفاده شده است.

به منظور حل عددی معادلات حاکم از نرم‌افزار فلوئنت استفاده شده است. روش تجزیه معادلات فاز پیوسته، روش حجم محدود[2] است که در شبکه رویهم[3] به کار برده می‌شود. در تجزیه ترم‌های جابه‌جایی معادلات انتقال حاکم بر جریان گاز از روش بالادست مرتبه اول[4] استفاده شده است. با توجه به تراکم‌ناپذیر بودن جریان، روش فشار مبنا[5] و برای ارتباط بین فشار و سرعت، معادله تصحیح فشار با الگوریتم سیمپل[6] مورد استفاده قرار گرفته است.

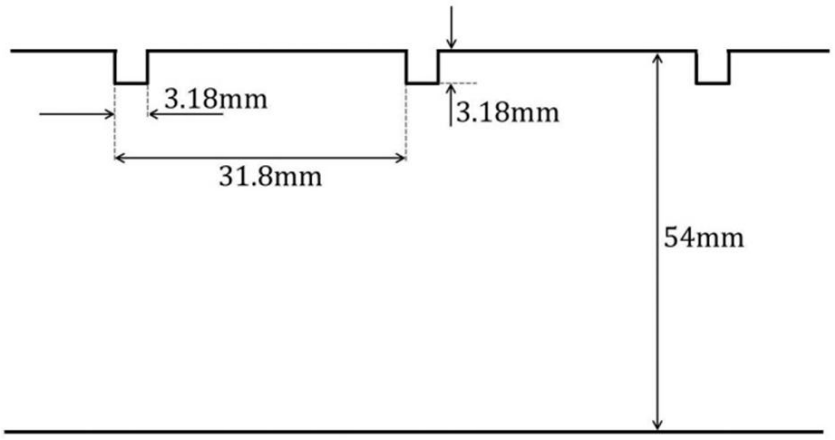
برای هر اندازه، تعداد 3000 ذره با توزیع رزین-رامل[7] در محدوده قطر 10 نانومتر تا 50 میکرومتر تزریق می‌شود. چگالی ذره ثابت و برابر $\rho_p = 2450 \frac{kg}{m^3}$ و در نتیجه نسبت چگالی ذره به سیال برابر $S = 2000$ می‌باشد. سرعت اولیه ذرات برابر سرعت محلی جریان گاز در نظر گرفته می‌شود. از شرط مرزی تله[8] برای مدل فاز گسسته برای دیواره کانال استفاده می‌شود. وقتی از شرط مرزی تله استفاده می‌شود، در صورت تماس ذره به دیواره، ذره به دیواره می‌چسبد و روی آن رسوب می‌کند. مقدار شتاب جاذبه برابر $g = 9.807 \frac{m}{s^2}$ در نظر گرفته می‌شود. ذرات با استفاده از ردیابی تصادفی[9] که شامل مدل مرحله‌ای تصادفی گسسته[10] و همچنین طول عمر گردابه تصادفی[11] می‌باشد، ردیابی می‌شوند. مقدار ثابت مقیاس زمانی انتگرالی برای مدل RSM، $C_L = 0.3$ در نظر گرفته شده است.

4- اعتبارسنجی حل عددی

4-1- اعتبارسنجی فاز گاز

در این مقاله، با توجه به هندسه مسأله که یک کانال دوبعدی دارای زبری مصنوعی می‌باشد؛ به منظور اعتبارسنجی روش شبیه‌سازی جریان گاز، هوا در داخل یک کانال دوبعدی نامتقارن و با ابعاد کار تجربی هانجالیک و لاندر [23]، با عدد رینولدز 18500 بر مبنای سرعت بیشینه حل شده است. هندسه و ابعاد کانال نامتقارن در شکل 1 نمایش داده شده است. طول کل کانال نامتقارن برابر 2/8 متر است. برای ایجاد توسعه یافتگی در جریان، 2/554 متر از آن دارای زبری مصنوعی و به منظور استفاده از شرط مرزی خروجی جریان، 0/256 متر از انتهای کانال به صورت صاف و بدون زبری مصنوعی در نظر گرفته شده است.

قبل از اعتبارسنجی فاز گاز در هندسه مورد نظر (شکل 1)، لازم است استقلال جواب‌ها از شبکه بررسی شود. بدین منظور دو شبکه با تعداد 401200 و 601000 سلول محاسباتی از نوع چهارگوش[12] و منظم[13] در نرم‌افزار گمبیت تولید شده است. استفاده از شبکه‌ای با تعداد 401200 سلول محاسباتی، حل مستقل از شبکه را در جریان داخل کانال نامتقارن به دست



شکل 1 هندسه و ابعاد کانال دو بعدی نامتقارن

1- No Slip
2- Finite Volume Method
3- Collocated Grids

4- First Order Upwind
5- Pressure Based Method
6- SIMPLE
7- Rosin-Rammler
8- Trap
9- Stochastic Tracking
10- Discrete Random Walk Model
11- Random Eddy Lifetime
12- Quadrilateral
13- Map

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-03-28]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1394.15.8.48.8]

می‌دهد. شکل 2، بخشی از شبکه تولید شده با 401200 سلول محاسباتی را نشان می‌دهد. همانطور که در شکل مشخص است، در نزدیک مرز دیواره‌ها، ریزی شبکه[1] بیش‌تر می‌باشد.

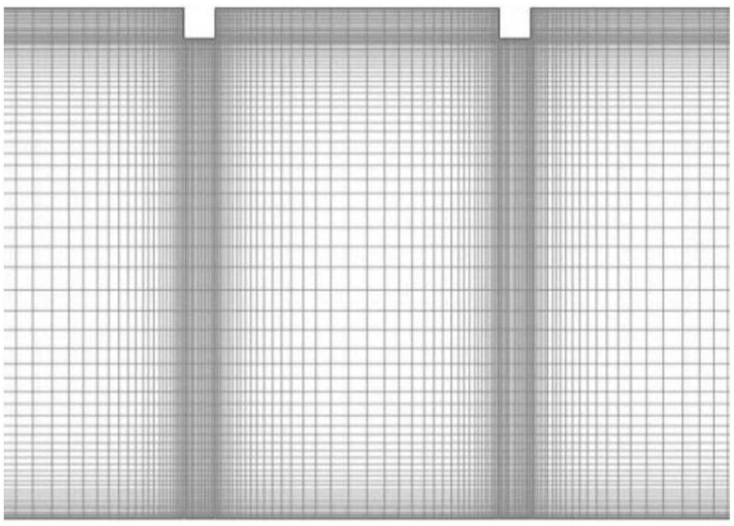
هانجالیک و لاندر [23]، مقدار نسبت تنش برشی دیواره زبر به تنش برشی دیواره صاف ($\tau_{\omega_r}/\tau_{\omega_s}$) را حدود 4:1 گزارش نمودند. در مطالعه حاضر، این نسبت به مقدار 4/20 توسط مدل RSM پیش‌بینی شده است. در شکل 3، پروفیل بی‌بعد سرعت متوسط جریان اصلی در جریان توسعه یافته کانال نامتقارن در مطالعه حاضر با نتایج تجربی هانجالیک و لاندر [23] مقایسه شده است. مقدار خطا در بیش‌ترین حالت تقریباً در وسط کانال و کم‌تر از ده درصد می‌باشد. همچنین در نواحی نزدیک زبری، مقادیر سرعت توسط هانجالیک و لاندر [23] ارائه نشده است.

در شکل 3، u سرعت محوری، u_m سرعت بیشینه محوری، y_c فاصله تا دیواره زبر و D_c عرض کانال نامتقارن است.

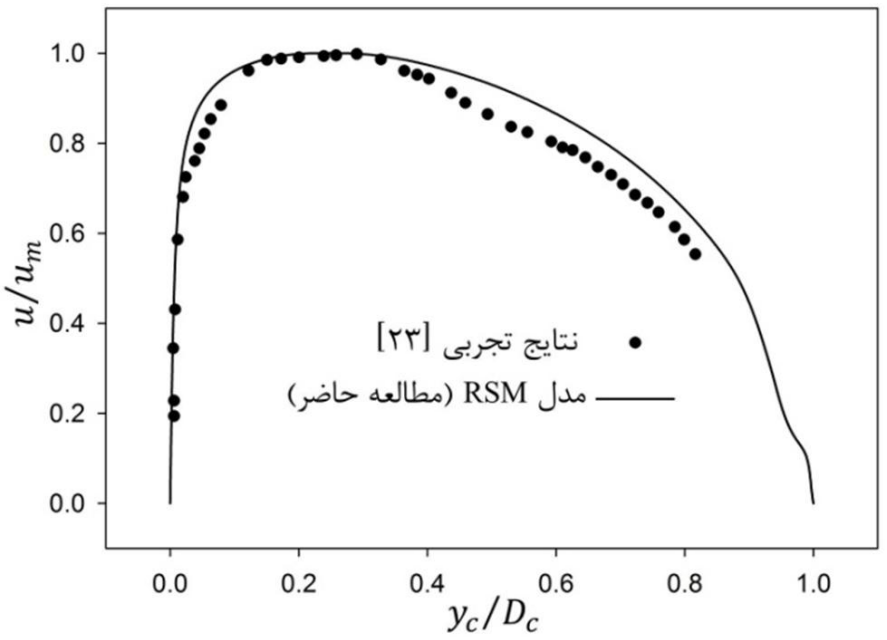
در شکل 4، مقادیر rms سرعت‌های نوسانی در سه جهت جریان اصلی[2]، جریان عرضی[3] و جریان عمقی[4] بررسی شده است.

در شکل 4، $u_{\tau r}$ سرعت اصطکاکی دیواره زبر و $\tilde{y}_0$ فاصله دیواره زبر تا سطحی است که تنش برشی در آن صفر می‌باشد.

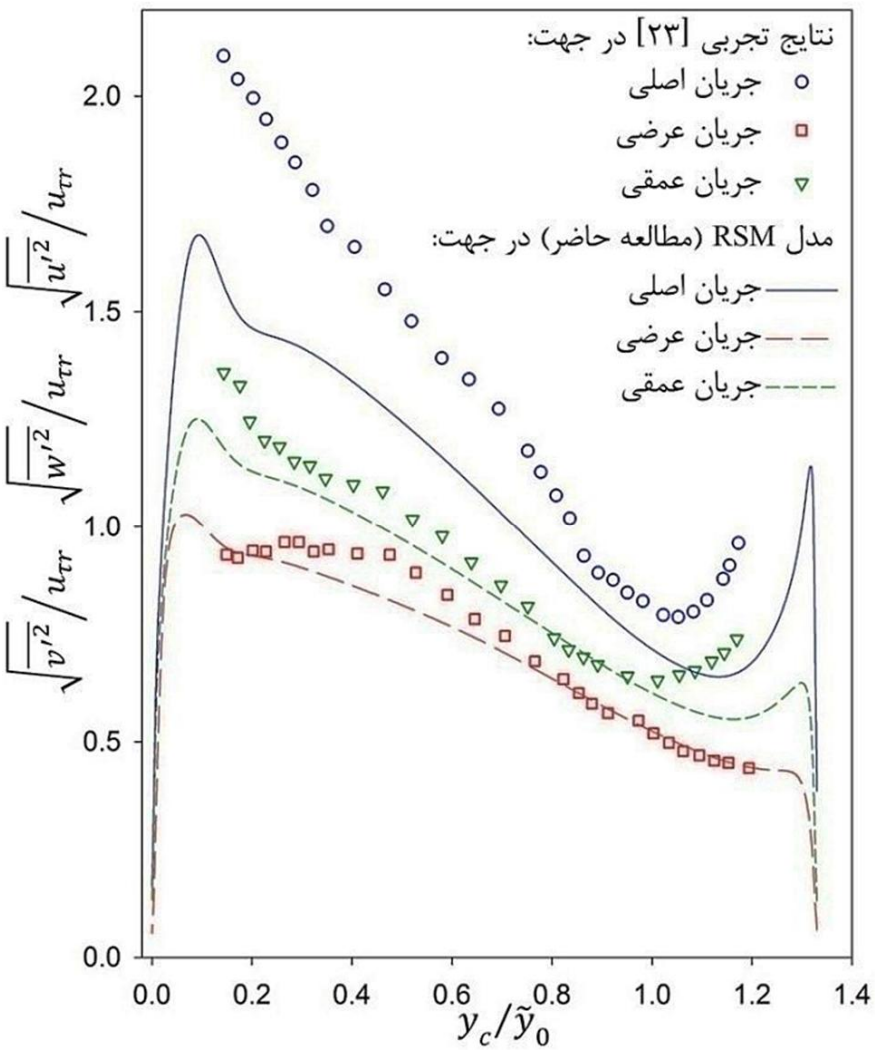
با توجه به نتایج به دست آمده از اعتبارسنجی صورت گرفته، مدل RSM با تابع بهبود یافته دیواره برای ادامه کار در تحلیل‌های بعدی مناسب می‌باشد.



شکل 2 بخشی از شبکه تولید شده کانال نامتقارن با 401200 سلول محاسباتی



شکل3 پروفیل بی‌بعد سرعت متوسط جریان اصلی در جریان توسعه یافته کانال نامتقارن

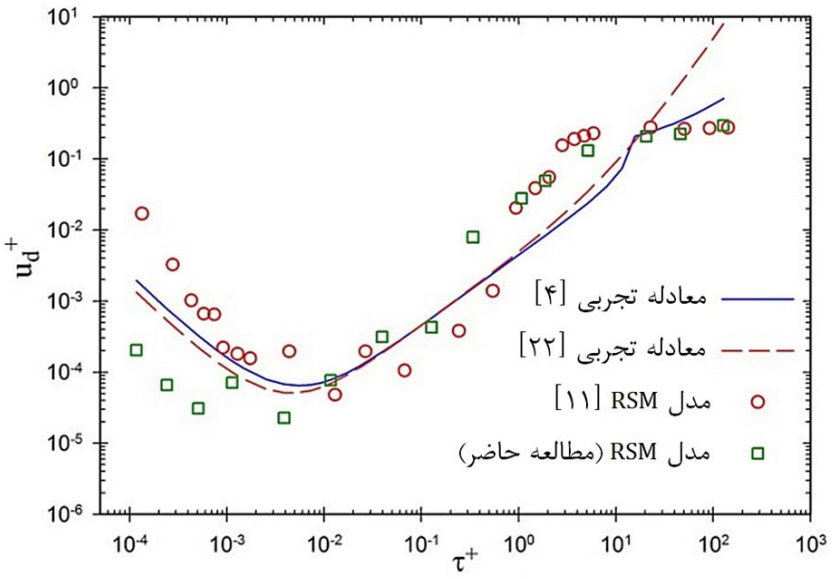


شکل 4 ریشه دوم متوسط بی‌بعد نوسانات سرعت آشفتگی در جریان توسعه یافته کانال نامتقارن

4-2- اعتبارسنجی شبیه‌سازی حرکت فاز ذرات

در این مقاله، اعتبارسنجی فاز ذرات در کانال صاف (بدون زبری) صورت می‌گیرد. بدین منظور ابتدا هوا با سرعت ورودی 5 متر بر ثانیه در داخل یک کانال دوبعدی صاف به عرض 0/02 متر و طول 1 متر حل شده است. سپس ذرات در ناحیه توسعه یافته در محدوده $y^+ = 30$ تزریق شده هر ذره به طور جداگانه ردیابی می‌شود. سرعت رسوب بی‌بعد با استفاده از رابطه (35) و زمان استراحت بی‌بعد ذره با استفاده از رابطه (41) محاسبه می‌گردد.

در شکل 5، مقادیر سرعت رسوب بی‌بعد بر حسب زمان استراحت بی‌بعد ذره، در کانال افقی با گرانش عمود بر جهت جریان با نتایج شبیه‌سازی عددی تیان و احمدی [11]، معادله تجربی وود [22] (رابطه 38) و معادله تجربی فن و احمدی [4] (رابطه 44) مقایسه شده است. نتایج نشان داده شده مربوط به شبیه‌سازی عددی تیان و احمدی [11]، با استفاده از مدل دولایه‌ای به دست آمده است.



شکل 5 مقایسه سرعت رسوب بی‌بعد پیش‌بینی شده در مطالعه حاضر با نتایج قبلی در کانال صاف افقی با گرانش عمود بر جهت جریان

1- Mesh Resolution
2- Stream-Wise
3- Lateral
4- Span-Wise

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-03-28]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1394.15.8.48.8]

همانطور که در شکل 5 مشخص می‌باشد، برای زمان‌های استراحت بی‌بعد کمتر از 0/01، دقت مدل RSM در شبیه‌سازی عددی تیان و احمدی [11] کمی بیشتر از دقت مدل RSM در مطالعه حاضر و برای زمان‌های استراحت بی‌بعد ذره بزرگتر از 0/01، دقت هر دو مدل تقریباً برابر می‌باشد. با توجه به نزدیک بودن دقت مدل RSM در مطالعه حاضر با دقت مدل RSM در شبیه-سازی عددی تیان و احمدی [11]، نتـــــایج قابل قبول می‌باشند.

5- نتایج

جریان هوا با سرعت ورودی 3 متر بر ثانیه در داخل کانال متقارن دوبعدی با زبری مصنوعی مستطیلی بررسی شده است. هندسه کانال متقارن در شکل 6 نمایش داده شده است.

w عرض زبری مصنوعی، h ارتفاع زبری مصنوعی و λ طول موج زبری مصنوعی است.

عرض کانال متقارن برابر 0/03 متر و طول کل آن برابر 1/4 متر می‌باشد. از ابتدای کانال به طول 1/2 متر، کانال دارای زبری مصنوعی به صورت متقارن و 0/2 متر انتهایی آن به صورت صاف و بدون زبری مصنوعی است. در این مقاله، تغییرات نشست ذرات با تغییر در دو پارامتر w و h بررسی می‌شود. حالت‌های مختلف ابعاد زبری مصنوعی مطابق روابط (51) و (52) در نظر گرفته می‌شوند.

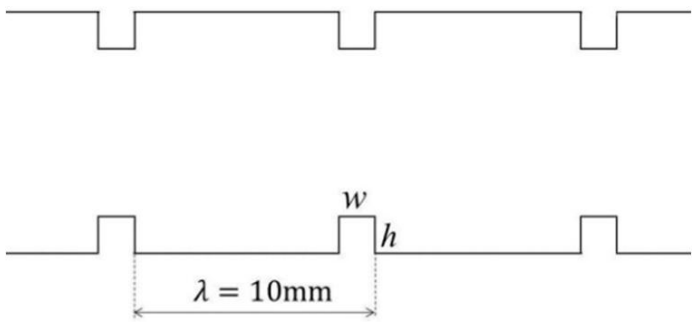
$$w = 1\text{mm}, h = \begin{cases} 0.5\text{ mm} \\ 0.75\text{mm} \\ 1\text{mm} \\ 1.25\text{mm} \\ 1.5\text{mm} \end{cases} \quad (51)$$

و

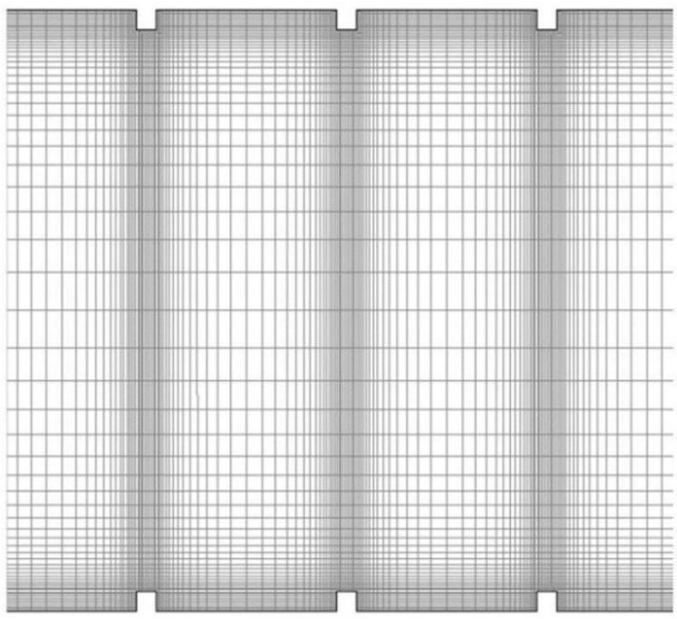
$$h = 1\text{mm}, w = \begin{cases} 0.5\text{mm} \\ 0.75\text{mm} \\ 1\text{mm} \\ 1.25\text{mm} \\ 1.5\text{mm} \end{cases} \quad (52)$$

در مجموع نه هندسه تولید و نشست ذرات در آن بررسی شده است. در اینجا برای ابعاد $w = h = 1\text{mm}$ حل مستقل از شبکه بررسی می شود. بدین منظور سه شبکه با تعداد 229380، 360600 و 484440 سلول محاسباتی از نوع چهارگوش و منظم تولید شد. با استفاده از شبکه دارای 360600 سلول محاسباتی، جواب‌های مستقل از شبکه برای کانال متقارن به دست آمده است. شکل 7، بخشی از شبکه تولید شده با 360600 سلول محاسباتی را نشان می‌دهد.

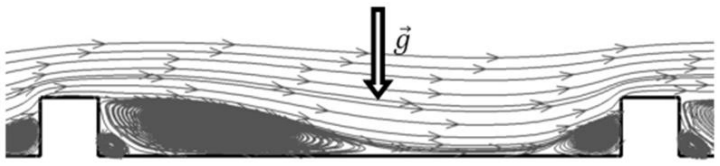
هدف از این مطالعه، بررسی نشست ذرات در داخل کا نال با زبری مصنوعی مستطیلی در دو حالت افقی (با گرانش عمود بر جهت جریان) و عمودی (با گرانش در جهت جریان) می‌باشد. خطوط جریان در فضای بین دو زبری در شکل‌های 8 و 9 نمایش داده شده است. این شکل‌ها برای زبری‌های مستطیلی با ابعاد $w = h = 1\text{mm}$ ارائه شده‌اند. بردار شتاب جاذبه نیز در این شکل‌ها نشان داده شده است.



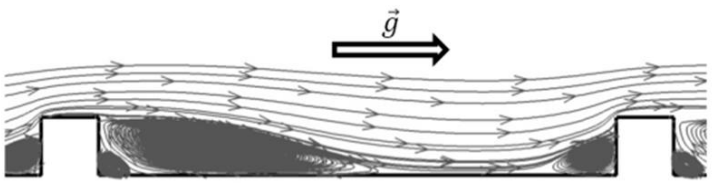
شکل 6 هندسه کانال دوبعدی متقارن



شکل 7 بخشی از شبکه تولید شده کانال متقارن با حالت ابعادی $w = h = 1\text{mm}$ با 360600 سلول محاسباتی



شکل 8 خطوط جریان کانال زبر مستطیلی افقی با عرض و ارتفاع $w = h = 1\text{mm}$

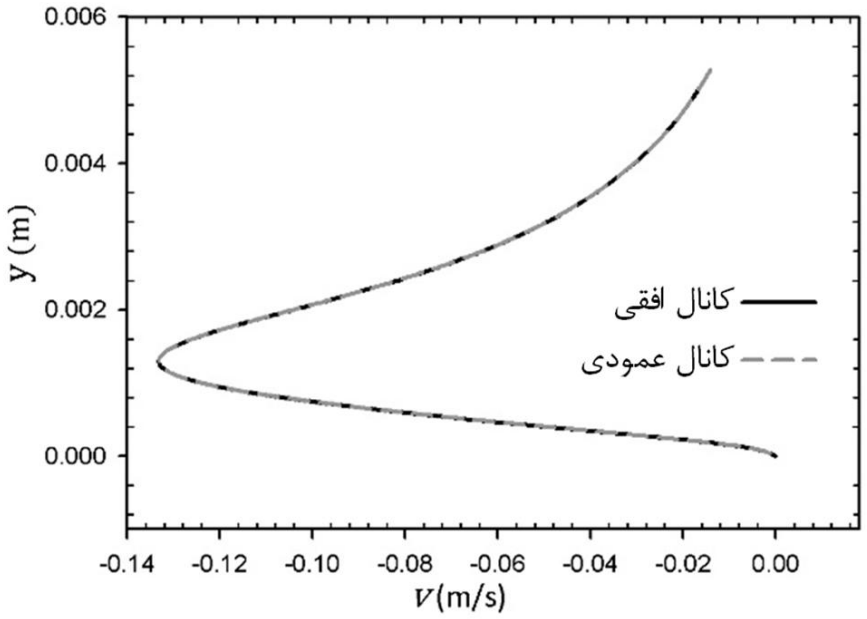


شکل 9 خطوط جریان کانال زبر مستطیلی عمودی با عرض و ارتفاع $w = h = 1\text{mm}$

با توجه به شکل 9، الگوی جریان در کانال افقی با گرانش عمود بر جهت جریان و کانال عمودی با گرانش در جهت جریان شبیه به هم می‌باشند. همچنین با توجه به مهم بودن سرعت عمود بر دیواره (v) در پیش‌بینی مقادیر رسوب، پروفیل سرعت عمود بر دیواره در ناحیه بین دو زبری ($x = 0.9945\text{mm}$) در دو حالت کانال افقی با گرانش عمود بر جهت جریان و کانال عمودی با گرانش در جهت جریان در شکل 10 نشان داده شده است.

شکل 10 نیز، یکسان بودن الگوی جریان در دو حالت کانال افقی و عمودی را تأیید می‌نماید.

پس از حل جریان گاز، ذرات در ناحیه توسعه یافته تزریق و سپس هر یک از خطوط جریان تزریق شده برای هر اندازه ردیابی می‌شوند.



شکل 10 پروفیل سرعت عمود بر دیواره در ناحیه توسعه یافته کانال زبر مستطیلی با حالت ابعادی $w = h = 1\text{mm}$ در دو حالت کانال افقی و عمودی

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-03-28]

[DOR: 20.1001.1.10275940.1394.15.8.48.8]

در این مقاله، طول موج زبری مصنوعی ثابت و برابر λ = 10mm در نظر گرفته می‌شود. عرض بی‌بعد زبری مصنوعی با رابطه (53) و ارتفاع بی‌بعد زبری مصنوعی با رابطه (54)، بیان می‌شوند.

$$w^+ = \frac{w}{\lambda} \quad (53)$$

$$h^+ = \frac{h}{\lambda} \quad (54)$$

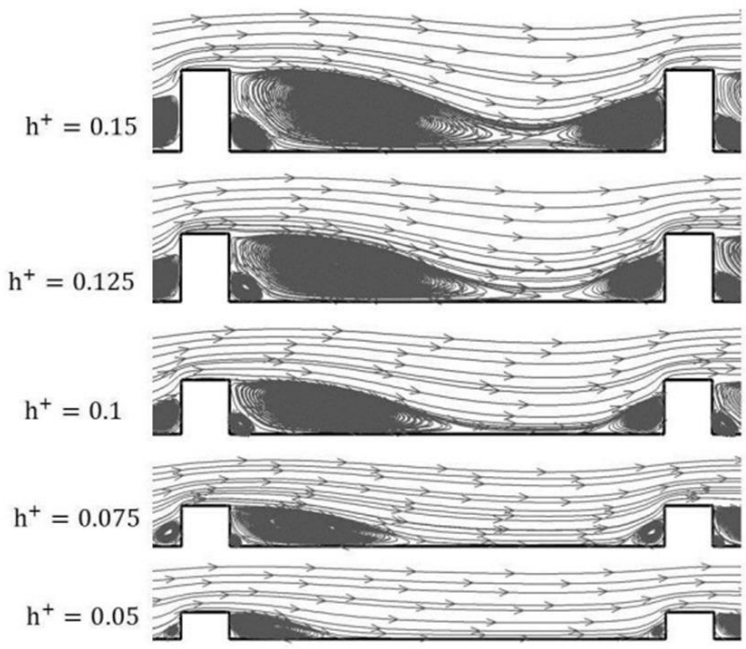
در ادامه برای هر یک از حالت‌های زبری مصنوعی، الگوی جریان در فضای بین دو زبری و سپس نمودارهای سرعت رسوب بی‌بعد (u_d^+) بر حسب زمان استراحت بی‌بعد ذره (τ^+) در دو کانال افقی و عمودی برای حالت‌های مختلف زبری مصنوعی نمایش داده شده است.

در شکل 11، خطوط جریان در کانال زبر مستطیلی با عرض بی‌بعد ثابت $w^+ = 0.1$ برای ارتفاع‌های مختلف بی‌بعد زبری نشان داده شده است.

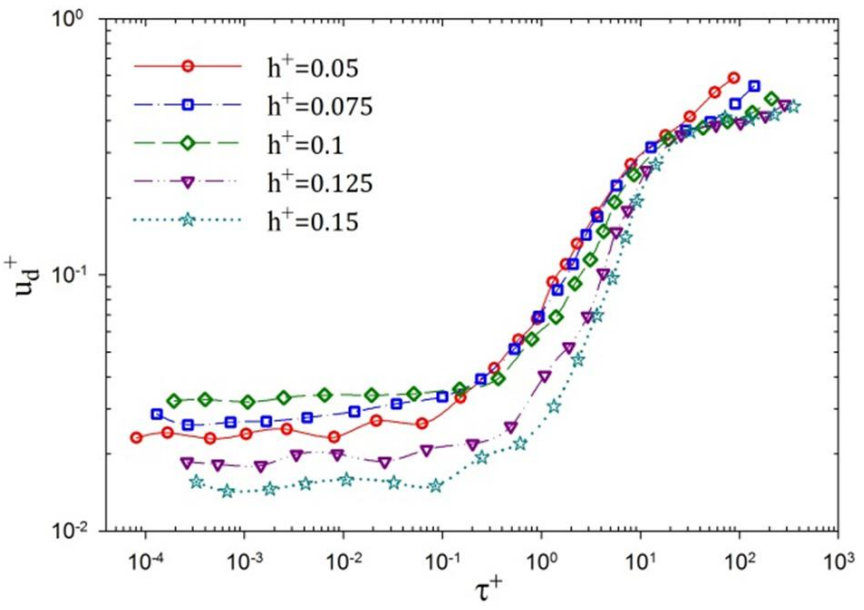
با توجه به شکل 11، در فضای بین دو زبری دو گردابه ایجاد می‌شود که با افزایش ارتفاع بی‌بعد زبری، گردابه‌های ایجاد شده بزرگتر می‌شود.

در شکل‌های 12 و 13 سرعت رسوب ذرات در کانال مستطیلی افقی و عمودی با عرض بی‌بعد ثابت $w^+ = 0.1$ برای ارتفاع‌های مختلف زبری ارائه شده است. همانطور که دیده می‌شود، برای زمان‌های استراحت بی‌بعد ذره کمتر از 0/1، با افزایش ارتفاع بی‌بعد زبری تا $h^+ = 0.1$ مقادیر سرعت رسوب افزایش می‌یابد. افزایش بیشتر h^+ سبب کاهش سرعت رسوب گذاری می‌شود. برای زمان‌های استراحت بی‌بعد ذره بین 0/1 تا 10، مقادیر سرعت رسوب با افزایش h^+ ثابت بوده و سپس کاهش می‌یابد. برای زمان‌های استراحت بی‌بعد ذره بزرگتر از 10، برای کانال افقی با افزایش ارتفاع بی‌بعد زبری تا $h^+ = 0.1$ مقادیر سرعت رسوب کاهش و سپس تقریباً ثابت می‌شود و برای کانال عمودی با افزایش ارتفاع بی‌بعد زبری تا $h^+ = 0.1$ مقادیر سرعت رسوب افزایش می‌یابد. در این حالت، افزایش بیشتر ارتفاع زبری تأثیری بر منحنی سرعت رسوب ندارد.

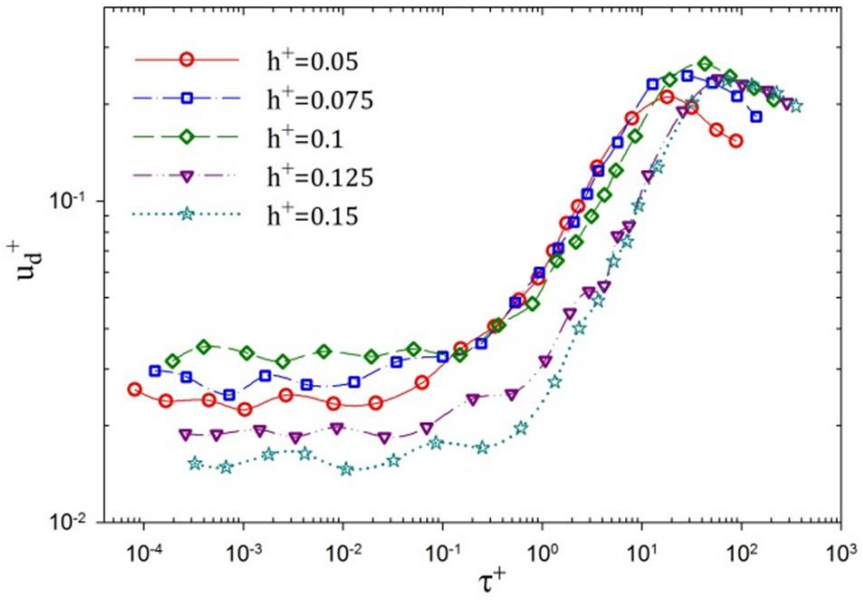
با توجه به الگوی جریان نشان داده شده در شکل 11، می‌توان نتیجه گرفت که الگوی جریان به شدت بر مقادیر رسوب ذرات سبک (ذرات با زمان‌های استراحت بی‌بعد ذره کمتر از 0/1) تأثیر می‌گذارد. در مورد ذرات نیمه‌سنگین (ذرات با زمان‌های استراحت بی‌بعد ذره بین 0/1 تا 10)، این اثر کمتر است. بدین صورت که برای ذرات سبک و نیمه‌سنگین، افزایش سطح تماس جریان اصلی با دیواره موجب افزایش مقادیر رسوب خواهد شد.



شکل 11 خطوط جریان کانال زبر مستطیلی با عرض بی‌بعد ثابت $w^+ = 0.1$ برای ارتفاع‌های مختلف بی‌بعد زبری



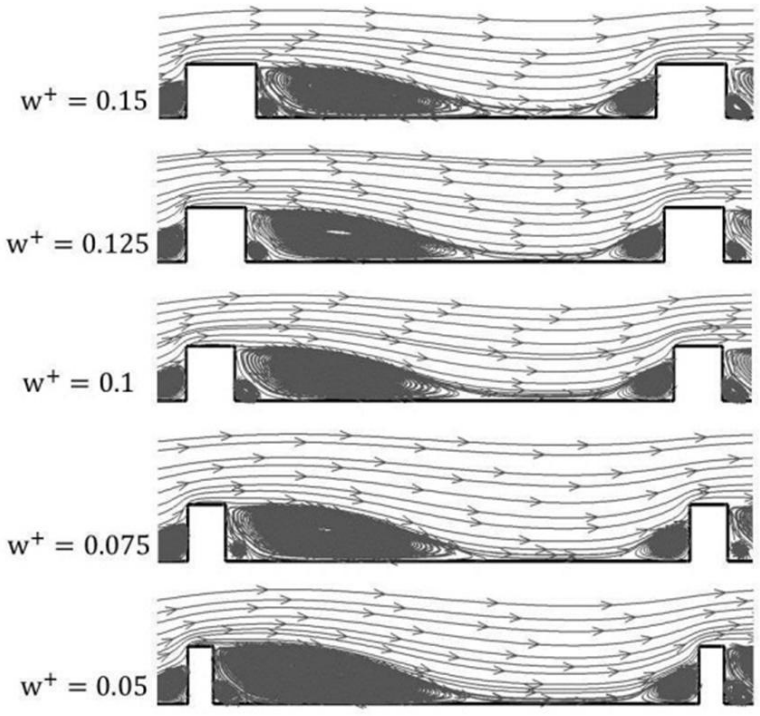
شکل 12 تغییرات سرعت رسوب بی‌بعد برای کانال زبر مستطیلی افقی با عرض بی‌بعد ثابت $w^+ = 0.1$ برای ارتفاع‌های بی‌بعد مختلف زبری با گرانش عمود بر جهت جریان



شکل 13 تغییرات سرعت رسوب بی‌بعد برای کانال زبر مستطیلی عمودی با عرض بی‌بعد ثابت $w^+ = 0.1$ برای ارتفاع‌های بی‌بعد مختلف زبری با گرانش در جهت جریان

برای ذرات سنگین (ذرات با زمان‌های استراحت بی‌بعد ذره بزرگتر از 10)، الگوی جریان اثر ناچیزی بر مقادیر رسوب ذرات دارد و عامل مهم برای این ذرات، نیروی گرانش و جهت این نیرو خواهد بود.

در شکل 14، خطوط جریان کانال زبر مستطیلی با ارتفاع بی‌بعد ثابت $h^+ = 0.1$ برای عرض‌های مختلف بی‌بعد زبری نشان داده شده است.



شکل 14 خطوط جریان کانال زبر مستطیلی با ارتفاع بی‌بعد ثابت $h^+ = 0.1$ برای عرض‌های مختلف بی‌بعد زبری

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-03-28]

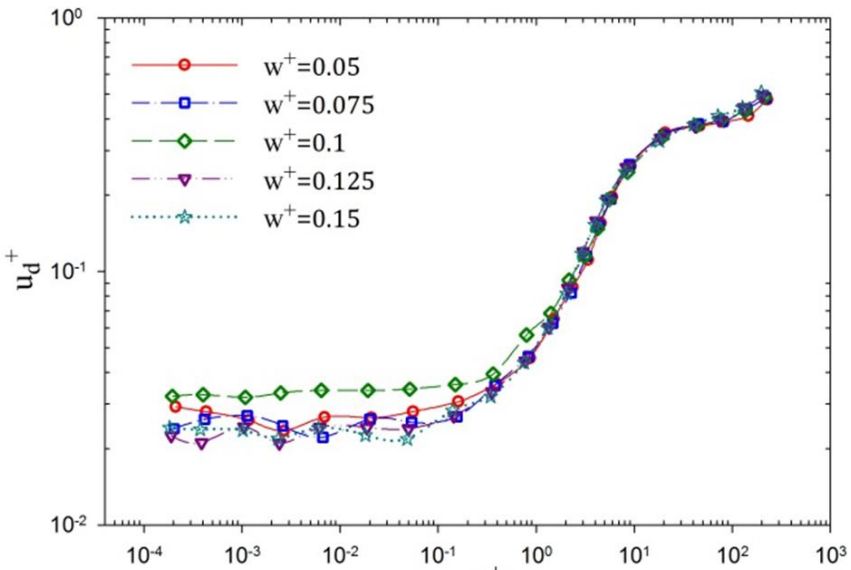
[DOR: 20.1001.1.10275940.1394.15.8.48.8]

با توجه به شکل 14، با افزایش عرض بی‌بعد زبری، وسعت گردابه‌های ایجاد شده تقریباً ثابت می‌ماند. با توجه به شکل‌های 15 و 16 که به ترتیب مربوط به رسوب ذرات در کانال مستطیلی افقی و عمودی با ارتفاع بی‌بعد ثابت $h^+ = 0.1$ برای عرض‌های مختلف بی‌بعد زبری می‌باشد؛ با افزایش عرض بی‌بعد زبری، مقادیر رسوب به خصوص برای زمان‌های استراحت بی‌بعد ذره بزرگتر از 1، تقریباً ثابت می‌ماند. البته برای زمان‌های استراحت بی‌بعد ذره کمتر از 1، مقادیر رسوب برای کانال با عرض بی‌بعد زبری $w^+ = 0.1$ کمی بیش‌تر می‌باشد. دلیل این امر همانطور که در شکل 14 نشان داده شده است، ناشی از اختلاف ناچیز الگوی جریان گاز در این حالت با سایر حالت‌های دیگر است. در این حالت با اختلاف کمی نسبت به حالت‌های دیگر، جریان گاز در فضای بین دو زبری بیشتر با دیواره تماس پیدا می‌کند. برای ذرات بزرگتر با زمان استراحت بزرگتر از 1، اثر نیروی وزن ذرات بر اثر اختلاف ناچیز الگوی جریان گاز غلبه پیدا می‌کند.

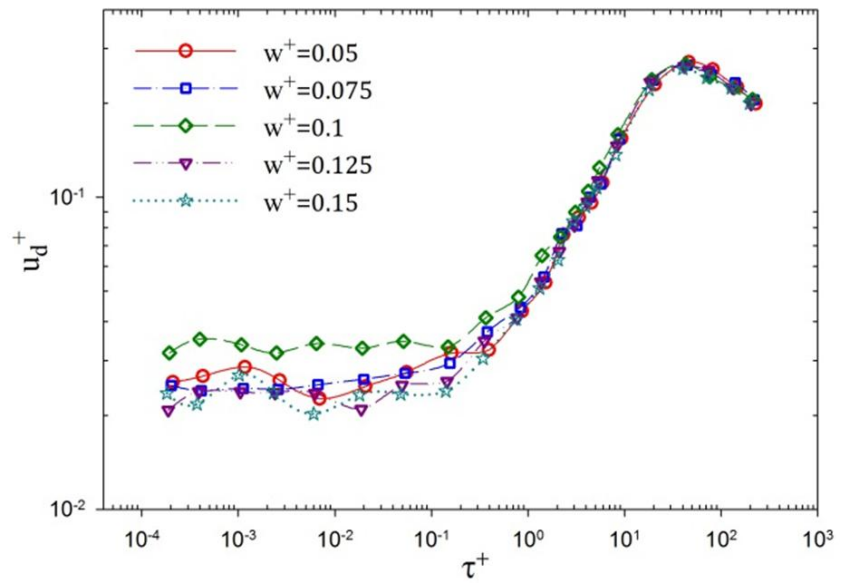
6- تحلیل نتایج و نتیجه‌گیری

با توجه به معادله فن و احمدی [4] (رابطه 44)، انتظار می‌رود که با افزایش ارتفاع زبری متوسط (ارتفاع بی‌بعد زبری مصنوعی)، مقادیر رسوب افزایش یابد؛ اما روند نتایج به دست آمده در کانال زبر از معادله تجربی فن و احمدی [4] (رابطه 44) تبعیت نمی‌کند. در مجموع می‌توان گفت رسوب ذرات تحت تأثیر عوامل ذیل می‌باشد:

- الگوی جریان
- وزن ذرات (نیروی گرانش)
- جهت نیروی گرانش



شکل 15 تغییرات سرعت رسوب بی‌بعد برای کانال زبر مستطیلی افقی با ارتفاع بی‌بعد ثابت $h^+ = 0.1$ برای عرض‌های بی‌بعد مختلف زبری با گرانش عمود بر جهت جریان



شکل 16 تغییرات سرعت رسوب بی‌بعد برای کانال زبر مستطیلی عمودی با ارتفاع بی‌بعد ثابت $h^+ = 0.1$ برای عرض‌های بی‌بعد مختلف زبری با گرانش در جهت جریان

با توجه به نتایج ذکر شده در بخش 5، می‌توان بدین صورت نتیجه گرفت:

1- برای ذرات سبک (ذرات با زمان‌های استراحت بی‌بعد ذره کمتر از 0/1)، اثر الگوی جریان گاز و نیروی درگ نسبت به دو عامل دیگر وزن ذرات و جهت نیروی گرانش غالب می‌باشد. بدین صورت که با افزایش ارتفاع بی‌بعد زبری تا زمانی که گردابه‌های تشکیل شده در فضای بین دو زبری به یکدیگر متصل شود؛ مقادیر رسوب افزایش و پس از متصل شدن دو گردابه، مقادیر رسوب کاهش می‌یابد. همچنین برای ذرات سبک، با افزایش سطح برخورد جریان با زبری‌های مصنوعی، مقادیر رسوب افزایش می‌یابد.

2- برای ذرات نیمه‌سنگین (ذرات با زمان‌های بی‌بعد بین 0/1 تا 10)، دو عامل الگوی جریان و نیروی گرانش در مقادیر رسوب مؤثر می‌باشد. بدین صورت که با افزایش ارتفاع بی‌بعد زبری تا زمانی که گردابه‌های تشکیل شده در فضای بین دو زبری به یکدیگر متصل شود، مقادیر رسوب تقریباً ثابت و پس از متصل شدن دو گردابه، مقادیر رسوب کاهش می‌یابد. برای ذرات نیمه‌سنگین نیز، افزایش سطح برخورد جریان با زبری‌های مصنوعی، باعث افزایش مقادیر رسوب خواهد شد.

3- برای ذرات سنگین (ذرات با زمان‌های بی‌بعد بزرگتر از 10)، اثر دو عامل وزن ذرات و جهت نیروی گرانش از اثر الگوی جریان بیشتر است. در این حالت با افزایش ارتفاع بی‌بعد زبری تا زمانی که گردابه‌های تشکیل شده در فضای بین دو زبری به یکدیگر متصل شود، مقادیر رسوب برای کانال‌های افقی کاهش و برای کانال‌های عمودی افزایش می‌یابد و پس از متصل شدن دو گردابه، مقادیر رسوب برای هر دو کانال تحت تأثیر ارتفاع زبری نخواهد بود.

در مجموع می‌توان چنین نتیجه گرفت که میزان رسوب برای ذرات سبک، بیش‌تر تحت تأثیر الگوی جریان بوده و با بزرگتر شدن و در نتیجه افزایش وزن ذرات، اثر دو عامل وزن ذرات و جهت نیروی گرانش بیش‌تر می‌شود. در ضمن معادله ارائه شده توسط فن و احمدی [4] (رابطه 44)، نمی‌تواند مقادیر سرعت رسوب بی‌بعد را برای کانال‌های زبر مصنوعی به‌درستی پیش‌بینی کند.

7- فهرست علایم

C_0	غلظت جرمی ذرات (kgm^{-3})
C_c	ضریب تصحیح لغزش استوکس- کانینگهام
C_D	ضریب درگ
C_L	ثابت مقیاس زمانی انتگرالی
D	ضریب پخش جرمی ذره (m^2s^{-1})
D_c	عرض کانال نامتقارن (m)
d^+	قطر بی‌بعد ذره
d_p	قطر ذره (m)
d_{ij}	تانسور نرخ تغییر شکل سیال (s^{-1})
E	ثابت تجربی برای قانون لگاریتمی
F_L	نیروی بالابر سافمن (ms^{-2})
H	ارتفاع زبری مصنوعی (m)
h^+	ارتفاع بی‌بعد زبری مصنوعی
J	شار جرمی ذرات به سمت دیواره در واحد زمان ($kgm^{-2}s^{-1}$)
K	زبری سطح (m)
K^+	زبری بی‌بعد سطح

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-03-28]

[DOR: 20.1001.1.10275940.1394.15.8.48.8]

K	انرژی جنبشی آشفتگی (m^2s^{-2})
k_b	ثابت بولتزمن (JK^{-1})
k_L	ضریب ثابت نیروی بالابر سافمن
L_e	مقیاس طولی گردابه (m)
N_0	تعداد اولیه ذرات
N_d	تعداد ذرات رسوبی
N	نیروی براونی (ms^{-2})
Re_p	عدد رینولدز ذره
S	نسبت چگالی ذره به سیال
S_c	عدد اشمیت
T	دمای مطلق (K)
T_L	مقیاس زمانی انتگرالی لاگرانژی ذره (s)
T	زمان (s)
t_{cross}	زمان عبور ذره از گردابه (s)
t_{cv}	زمان عبور ذره از یک سلول (s)
t_d	مدت زمان رسوب (s)
t_d^+	مدت زمان رسوب بی‌بعد
t_e	طول عمر گردابه (s)
t_{int}	مدت زمان برهم کنش ذره با گردابه (s)
u	سرعت لحظه‌ای جریان سیال (ms^{-1})
$\bar{u}$	سرعت متوسط جریان سیال (ms^{-1})
u'	سرعت نوسانی جریان سیال (ms^{-1})
u_m	سرعت بیشینه محوری در کانال نامتقارن (ms^{-1})
u_p	سرعت لحظه‌ای ذره (ms^{-1})
u^*	سرعت اصطکاکی (ms^{-1})
$u_{\tau r}$	سرعت اصطکاکی دیواره زبر (ms^{-1})
u_d^+	سرعت رسوب بی‌بعد ذره
$u^+_{laminar}$	پروفیل سرعت بی‌بعد در زیرلایه آرام
$u^+_{turbulent}$	پروفیل سرعت بی‌بعد در زیرلایه لگاریتمی
W	عرض زبری مصنوعی (m)
W^+	عرض بی‌بعد زبری مصنوعی
x_p	موقعیت ذره (m)
Y^+	فاصله بی‌بعد دیواره
y_c	فاصله تا دیواره زبر (m)
$\tilde{y}_0$	فاصله دیواره زبر تا سطح تنش برشی صفر (m)

علایم یونانی

β	نسبت بارگیری
Δt	گام زمانی (s)
ε	نرخ اضمحلال آشفتگی (m^2s^{-3})
Γ	تابع ترکیب کننده برای تابع بهبود یافته دیواره
κ	ثابت فون کارمن
λ	طول موج زبری مصنوعی (m)
λ_g	مسیر آزاد متوسط مولکولی گاز (m)
μ	لزجت دینامیکی ($kgm^{-1}s^{-1}$)
μ_t	لزجت آشفتگی ($kgm^{-1}s^{-1}$)
ν	لزجت سینماتیکی (m^2s^{-1})
ρ_f	چگالی سیال (kgm^{-3})
ρ_p	چگالی ذره (kgm^{-3})
ρ_{pp}	چگالی فاز ذرات (kgm^{-3})
τ	زمان استراحت ذره (s)
τ^+	زمان استراحت بی‌بعد ذره
ζ	عدد تصادفی یکنواخت بین صفر و یک
ξ	عدد تصادفی گوسی با متوسط صفر و انحراف استاندارد واحد

8- مراجع

[1] M. Di Giacinto, F. Sabetta, R. Piva, Two-way coupling effects in dilute gas-particle flow, *ASME Journal of Fluids Engineering,* Vol. 104, pp. 304-312, 1982.

[2] S.L. Soo, *Dynamic of charged suspension,* Oxford university, 1967.

[3] H. Ounis, G. Ahmadi, Analysis of dispersion of small spherical particles in a random velocity field, *Transactions of the ASME*, Vol. 112, pp. 114-120, 1990.

[4] F. Fan, G. Ahmadi, A sublayer model for turbulent deposition of particles in vertical ducts with smooth and rough surfaces, *Journal of Aerosol Science,* Vol. 24, pp. 45-64, 1993.

[5] E. A. Matida, K. Nishino, K. Torii, Statistical simulation of particle deposition on thewall from turbulent dispersed pipe flow, *International Journal of Heat and Flow,* Vol. 21, pp. 389-402, 2000.

[6] Y.Wang, P.W. James, On the effect of anisotropy on the turbulent dispersion and deposition of small particles, *International Journal of Multiphas Flow,* Vol. 25, pp. 551-558, 1999.

[7] A. Li, G. Ahmadi, Computer simulation of particle deposition in upper tracheobronchial tree, *Aerosol Science and Technology,* Vol. 23, pp. 201-223, 1995.

[8] Z. Zhang, C. Kleinstreuer, Flow structure and particle transport in a triple bifurcation airway model, *Transaction of ASME,* Vol. 123, pp. 320-330, 2001.

[9] K. D. Squires, O. Simonin, LES-DPS of the effect of wall roughness on dispersed-phase transport in particle-laden turbulent channel flow, *International Journal of Heat and Fluid Flow,* Vol. 27, pp. 619-626, 2006.

[10] C. Liu, G. Ahmadi, Transport and deposition of particles near a building model, *Journal of Building and Environment,* Vol. 41, pp. 828-836, 2006.

[11] L. Tian , G. Ahmadi, Particle deposition in turbulent duct flows-comparisons of different model predictions, *Journal of Aerosol Science,* Vol. 38, pp. 377-397, 2007.

[12] N. Gao, J. Niu, Q. He, T. Zhu, J. Wu, Using RANS turbulence models and Lagrangian approach to predict particle deposition in turbulent channel flows, *Journal of Building and Environment,* Vol. 48, pp. 206-214, 2012.

[13] A.C.K. Lai, M.A. Byrne, A.J.H. Goddard, Particle deposition on ventilation duct onto three dimensional roughness element, *Building and Environment,* Vol. 37, pp. 939-945, 2002.

[14] M. Shams, H. Rahimzadeh, G. Ahmadi, Deposition of various shapes particles on rough surface in turbulent flow, *IJE Transactions B: Applications,* Vol. 15, No. 3, pp. 299-310, 2002.

[15] T. Hussein , L. Kubincova, L. Dzumbova, A. Hruska, P. Dohanyosova, J. Hemerka, J. Smolik, Deposition of aerosol particles on rough surfaces inside a test chamber, *Building and Environment,* Vol.44, pp. 2056–2063, 2009.

[16] R. Rafee, H. Rahimzadeh, G. Ahmadi, Numerical simulations of airflow and droplet transport in a wave-plate mist eliminator, *Chemical Engineering Research and Design,* Vol. 88, pp. 1393-1404, 2010.

[17] B. Kader, Temperature and concentration profiles in fully turbulent boundary layers, *International Journal of Heat and Mass Transfer,* Vol. 24, pp. 1541-1544, 1981.

[18] W. C. Hinds, *Aerosol technology: Properties, behavior, and measurement of airborne Particles,* NewYork: Wiley, 1984.

[19] P. G. Saffman, The lift on a small sphere in a slow shear flow, *Journal of Fluid Mechanics,* Vol. 22, pp. 385-400, 1965.

[20] A. Li, G. Ahmadi, Dispersion and deposition of spherical particles form point sources in a turbulent channel flow, *Aerosol Science and Technology,* Vol. 16, pp. 209-226, 1992.

[21] A.D. Gosman, E. Ioannides, Aspects of computer simulation of liquid-fueled combustor, *AIAA Paper 81-0323 Journal of Energy,* Vol. 7, pp. 482-490, 1983.

[22] N.B. Wood, A simple method for the calculation of turbulent deposition to smooth and rough surfaces, *Journal of Aerosol Science,* Vol. 12, pp. 275-290, 1981.

[23] K. Hanjalic, B. E. Launder, Fully developed asymmetric flow in a plane channel, *Journal of Fluid Mechanics,* Vol. 51, pp. 301-335, 1972.

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-03-28]

[DOR: 20.1001.1.10275940.1394.15.8.48.8]