

بررسی اثرات زبری جدار بر ته نشینی و پخش ذرات جامد کروی درون کانال با جریان آشفته

مهرزاد شمس، احسان کارآمد، حسن رحیم زاده و گودرز احمدی

چکیده: اثرات زبری بر ته نشینی و پخش ذرات جامد کروی داخل یک کانال با جریان مغشوش مطالعه شده است. در روشهای سنتی موجود برای بررسی اثرات زبری از مدلسازی استفاده می کنند، ولی در پژوهش حاضر از شبیه سازی مستقیم زبری استفاده شده است. برای مدل کردن جریان مغشوش از روش انتقال تنشهای رینولدزی (RSTM) استفاده شده است. حل عددی معادلات میدان جریان با استفاده از روش SIMPLE و به کمک نرم افزار FLUENT صورت گرفته است. با استفاده از تنشهای رینولدزی بدست آمده توسط نرم افزار مذکور، یک نرم افزار جهت بدست آوردن مولفه های نوسانی سرعت و حرکت ذرات تعمیم داده شده است. برای مدل کردن مولفه نوسانی سرعت از روش اغتشاش سفید فیلتری پیوسته (CFWN) استفاده شده است. جهت محاسبه دقیق تر مولفه های نوسانی سرعت، ضرایب مورد استفاده در مدل انتقال تنشهای رینولدز اصلاح شده اند. با مقایسه کار انجام شده با کارهای دیگران، تطابق خوبی بین نتایج حاصل از این پژوهش و کارهای انجام شده قبلی دیده می شود.

واژه های کلیدی: جریان دو فاز گاز جامد، سطح زبر، شبیه سازی مستقیم

۱. مقدمه

ته نشینی و پخش ذرات جامد یا مایع آيروسول^۲ داخل گاز نقش مهمی را در بسیاری از پدیده های طبیعی ایفا می کند، همچنانکه دارای کاربردهای صنعتی بسیاری نیز می باشد. ذرات طبیعی و مصنوعی (ساخته بشر) دارای اندازه و شکل های متفاوتی هستند. قطر ذرات معمولی بین ۰/۰۱ تا ۱۰۰ میکرون متغیر است. گرد و غبار، دود، مه و آلودگی هوا اشکال متفاوتی از ذرات هستند. آشنایی با دینامیک ذرات یک عامل اساسی در تشخیص مکانیزم ته نشینی و پخش آنها می باشد.

این مقاله در تاریخ ۸۳/۶/۲۸ دریافت و در تاریخ ۸۳/۱۲/۹ به تصویب رسیده است.

دکتر مهرزاد شمس، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، shams@kntu.ac.ir
احسان کارآمد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، kasanic2001@yahoo.com
دکتر حسن رحیم زاده، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، rahimzadeh@cic.aut.ac.ir
دکتر گودرز احمدی، دانشکده مهندسی مکانیک و هوافضا، دانشگاه کلارکسون آمریکا. ahmadi@clarkson.edu

². Aerosol

رسوب و جدا کردن ذرات در بسیاری از کاربردهای مهندسی و علمی دارای اهمیت می باشد. به عنوان مثال از پاک کردن قطعات در صنایع نیمه رساناها و تمیز کردن، فیلتراسیون و انتقال زغال سنگ می توان نام برد. مثلاً انباشته شدن آلاینده های اتمسفریک بر روی سطوح دستگاه های جذب انرژی خورشیدی مانند کلکتورها باعث کاهش جذب انرژی خورشیدی و کاهش راندمان می شود.

بیشتر کارهایی که در زمینه بررسی ته نشینی و پخش ذرات تاکنون انجام شده است مربوط به سطوح صاف می باشد.

مشخص شده است که زبری تأثیر زیادی بر نرخ ته نشینی ذرات روی دیوار دارد. برونه [۱] دیدگاه عمومی داویس [۲] را دنبال کرد با این تفاوت که اثرات زبری سطوح را نیز لحاظ کرد. وود [۳] یک روش تحلیلی ساده برای محاسبه ته نشینی ذرات بر روی سطوح صاف و زبر ارائه کرد. هان و همکاران [۴] از یک رابطه که توسط کادر و یانگوم [۵] توسعه داده شد، برای بیان نشست ذرات ریز روی دیوار استفاده کردند. شک و همکاران [۶] داده های آزمایشگاهی موجود برای نفوذ مغشوش ذرات بر روی سطوح کاملاً زبر را جمع بندی کردند.

شیمادا و همکاران [۷] یک مدل برای بیان اثر زبری بر روی رسوب مغشوش و براونی ذرات ارائه کردند. همچنین آنها یک رابطه که

$$\overline{u_j} \frac{\partial \overline{u_i}}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \overline{p}}{\partial x_i} + \nu \frac{\partial^2 \overline{u_i}}{\partial x_j \partial x_j} - \frac{\partial}{\partial x_j} R_{ij} \quad (2)$$

که در آن $\overline{u_i}$ سرعت متوسط، x_i مکان، \overline{p} فشار متوسط، ρ چگالی (ثابت)، ν لزجت سینماتیک و $R_{ij} = \overline{u'_i u'_j}$ تانسور تنشهای رینولدز می‌باشند.

در اینجا $u'_i = u_i - \overline{u_i}$ ، مولفه نوسانی سرعت در جهت i و u_i سرعت لحظه‌ای می‌باشند.

جهت حل دستگاه معادلات (۱) و (۲) از مدل انتقال تنشهای رینولدزی^۶ استفاده شده است.

۳. معادله انتقال تنشهای رینولدز

شکل دقیق معادله انتقال تنشهای رینولدز، $\rho \overline{u'_i u'_j}$ ممکن است به صورت زیر نوشته شود: (رودی [۱۴])

$$\begin{aligned} \overline{u_k} \frac{\partial}{\partial x_k} R_{ij} &= \frac{\partial}{\partial x_k} \left(\frac{\nu_t}{\sigma^k} \frac{\partial}{\partial x_k} R_{ij} \right) - \\ &\left[\overline{u'_i u'_k} \frac{\partial \overline{u_j}}{\partial x_k} + \overline{u'_j u'_k} \frac{\partial \overline{u_i}}{\partial x_k} \right] - C_1 \frac{\varepsilon}{k} \left[R_{ij} - \frac{2}{3} \delta_{ij} k \right] \quad (3) \\ &- C_2 \left[P_{ij} - \frac{2}{3} \delta_{ij} P \right] - \frac{2}{3} \delta_{ij} \varepsilon \end{aligned}$$

که جمله تولید به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$P_{ij} = -\overline{u'_i u'_k} \frac{\partial \overline{u_j}}{\partial x_k} - \overline{u'_j u'_k} \frac{\partial \overline{u_i}}{\partial x_k}, P = \frac{1}{2} P_{ii} \quad (4)$$

در رابطه (۳)، ν_t ویسکوزیته اغتشاش، $\sigma^k = 1.0$ ، $C_1 = 1.8$ و $C_2 = 0.6$ ضرایب تجربی هستند.

(لاندر و همکاران، [۱۵])، $k = \frac{1}{2} \overline{u'_i u'_i}$ انرژی جنبشی نوسانی و ε نرخ استهلاک اغتشاش است که معادله حاکم بر آن به شرح زیر است:

$$\begin{aligned} \overline{u_j} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} &= \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\nu + \frac{\nu_t}{\sigma^\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] \\ &- C^{\varepsilon 1} \frac{\varepsilon}{k} R_{ij} \frac{\partial \overline{u_i}}{\partial x_j} - C^{\varepsilon 2} \frac{\varepsilon^2}{k} \end{aligned} \quad (5)$$

مقادیر ثابتهای معادله (۵) به شرح زیر هستند (رودی، [۱۴])

$$\sigma^\varepsilon = 1.3, C^{\varepsilon 1} = 1.44, C^{\varepsilon 2} = 1.92 \quad (6)$$

سرعت ته نشینی را به پارامترهای زبری ارتباط می‌داد، توسعه دادند. فن^۳ و احمدی [۸] از یک مدل زیر لایه برای محاسبه ته نشینی ذرات در کانالهای عمودی با جدار صاف و زبر استفاده کردند. فرمولاسیون آنها بر مبنای ساختارهای گردابی ناشی از اغتشاش در نزدیک دیوار و سپس تعقیب ذرات در میدان جریان استوار است. احمدی [۹] از شبیه سازی کامپیوتری برای بررسی ته نشینی ذرات در یک کانال مغشوش با دیوارهای زبر استفاده کردند. آنها از سرعت لحظه ای سیال داخل کانال به عنوان مجموع سرعت متوسط و مولفه نوسانی سرعت برای شبیه سازی استفاده نمودند. در معادله حرکت ذرات نیروهای براونی، برآ و جاذبه را لحاظ کردند. شمس و همکاران [۱۰] یک مدل ریاضی برای ته نشینی ذرات نانو بدست آوردند.

همچنین در پژوهش دیگری شمس و همکاران [۱۱] ته نشینی ذرات آبروسول را به صورت آزمایشگاهی بررسی کردند. سامرفلد [۱۲]، سامرفلد و کاسین [۱۳] اثرات زبری جدار کانال بر حرکت ذرات جامد در یک جریان آشفته گاز-جامد داخل کانال افقی را مطالعه کردند. بر طبق مدل آنها زاویه برخورد ذره به جدار کانال تشکیل شده است از زاویه حرکت ذره و یک زاویه با توزیع نرمال که ناشی از زبری می‌باشد.

در این پژوهش، مطالعه ته نشینی و پخش ذرات جامد در داخل یک کانال با جدارهای زبر بررسی شده است. بر خلاف روشهای سنتی موجود از روش شبیه سازی مستقیم زبری^۴ استفاده شده است. در روشهای سنتی موجود، برای مطالعه زبری، فقط توابع دیوار^۵ با توجه به میزان زبری اصلاح می‌شود.

علاوه بر سرعتهای متوسط جریان، مولفه‌های نوسانی سرعت ناشی از اغتشاش نیز مطالعه شده‌اند.

با توجه به اینکه مولفه‌های نوسانی سرعت جریان عمود بر دیوار نقش مهمی در رسوب ذرات داخل جریان روی دیوار دارند، لذا در مدل مورد استفاده باید قابلیت محاسبه دقیق نوسانات سرعت نزدیک دیوار را داشته باشد. برای رسیدن به این منظور ضرایب ثابت مورد استفاده در مدل انتقال تنشهای رینولدز اصلاح شده اند.

۲. معادلات حاکم بر جریان سیال

در یک سیال تراکم ناپذیر، معادله پیوستگی و معادله ممنتوم در حالت پایدار به شرح زیر است:

$$\frac{\partial \overline{u_i}}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

³ Fan

⁴ Direct Roughness Simulation

⁵ Wall Functions

⁶ RSTM

می‌باشد. روش فوق دارای چندین مزیت نسبت به سایر روشها می‌باشد (هی و احمدی، [۱۶]). اول اینکه باعث تولید شدت اغتشاش صحیح می‌شود. ثانیاً این مدل منجر به بدست آمدن مقادیر صحیح برای نفوذ اغتشاش می‌شود. ثالثاً از نظر محاسباتی مقرون به صرفه می‌باشد.

۴. معادلات حاکم بر حرکت ذره

معادله حرکت یک ذره درون جریان سیال به صورت زیر در نظر گرفته شده است:

$$\frac{du_i^p}{dt} = \frac{18v}{d^2 SC_c} (1 + 0.15 \text{Re}_p^{0.687}) (u_i - u_i^p) + n_i(t) + g_i \quad (14)$$

$$\frac{dx_i}{dt} = u_i^p \quad (15)$$

که در آن، u_i^p سرعت ذره، u_i سرعت لحظه‌ای سیال، x_i مکان ذره، t زمان، d قطر ذره، $S = \frac{\rho^p}{\rho^f}$ نسبت چگالی ذره به چگالی

سیال، $n_i(t)$ نیروی کائینگهام^{۱۱} می‌باشد که طبق رابطه زیر تعریف می‌شوند: رینولدز ذره بر مبنای سرعت آن نسبت به سیال، v لزجت سینماتیکی سیال، g_i شتاب جاذبه و C_c ضریب تصحیح لغزش استوکس-کائینگهام^{۱۱} می‌باشد که طبق رابطه زیر تعریف می‌شوند:

$$C_c = 1 + \frac{2\lambda}{d} (1.257 + 0.4e^{-1.1d/2\lambda}) \quad (16)$$

که در آن، λ پویش آزاد میانگین مولکولی^{۱۲} گاز می‌باشد. جمله اول سمت راست معادله (۱۴) نیروی پسا^{۱۳} است که در اثر اختلاف سرعت ذره و سیال بر ذره وارد می‌شود.

در این پژوهش برای به حساب آوردن تغییرات غیر خطی نیروی پسا از یک فرمول تجربی که توسط کلیفت و همکاران [۱۷] پیشنهاد شده، استفاده شده است. جمله دوم سمت راست معادله (۱۴) نیروی براونی است که در اثر تحریک مولکولی ایجاد می‌شود. /ونیس و احمدی [۱۸] نشان داده‌اند که نیروی جرم مجازی^{۱۴}، تصحیح فکسن^{۱۵}، نیروی بست^{۱۶} و نیروهای فشاری تاثیر چندانی بر پخش ذرات کوچک که در این پژوهش مطالعه می‌شوند، ندارند. لذا این نیروها در معادله حرکت ذره در نظر گرفته نشده‌اند.

۴. شبیه سازی مؤلفه های نوسانی سرعت

نوسانات سرعت در جریان مغشوش توابع تصادفی از مکان و زمان هستند. در این مطالعه، مدل اغتشاش سفید فیلتری پیوسته^۷ که توسط تامسون (۱۹۸۷) بیان شد، برای تولید مؤلفه‌های نوسانی سرعت سیال استفاده شده است. برطبق این مدل i-امین مؤلفه سرعت نوسانی سیال در رابطه زیر صادق است:

$$\frac{du_i}{dt} = -\frac{u_i - \bar{u}_i}{T_I} + \left(\frac{2\bar{u}_i^2}{T_I} \right)^{1/2} \zeta_i(t) \quad (7)$$

\bar{u}_i^2 میانگین مربعات i-امین مؤلفه سرعت نوسانی می‌باشد و قرارداد جمع اندیسی برای اندیسی که زیر آن خط کشیده شده است، بکار برده نمی‌شود. در معادله (۷) T_I زمان انتگرالی ذره می‌باشد که متوسط زمان سپری شده توسط ذره در گردابه‌های اغتشاش در طول مسیر حرکت ذره است.

$$T_I = \int_0^\infty \frac{u_p'(t)u_q'(t+s)}{u_q'u_q'} ds \quad (8)$$

برای ذرات کوچک که توسط سیال حرکت می‌کنند، زمان انتگرالی ذره می‌تواند با زمان انتگرالی لاگرانژی نقطه سیال^۸، T_L تقریب زده شود. زمان انتگرالی لاگرانژی توسط رابطه زیر به انرژی جنبش اغتشاش و نرخ استهلاک مرتبط می‌شود:

$$T_I = C_L \frac{k}{\varepsilon} \quad (9)$$

که مقدار ثابت $C_L \approx 0.3$ (دالی و هارلو ۱۹۷۰) می‌باشد. بنابر این:

$$T_I \approx T_L \approx 0.30 \frac{k}{\varepsilon} \quad (10)$$

در معادله (۷)، $\zeta_i(t)$ یک فرآیند تصادفی اغتشاش سفید گوسی باشدت طیفی^۹، S_{ij}^n می‌باشد:

$$S_{ij}^n = S_0 \delta_{ij} \quad (11)$$

و

$$S_0 = \frac{1}{\pi} \quad (12)$$

در شبیه سازی عددی، دامنه $\zeta_i(t)$ در هرگام زمانی توسط رابطه زیر بدست می‌آید:

$$\zeta_i(t) = \frac{G_i}{\sqrt{\Delta t}} \quad (13)$$

که، G_i یک عدد تصادفی گوسی مستقل با میانگین صفر و انحراف معیار واحد می‌باشد و Δt گام زمانی مورد استفاده برای شبیه سازی

¹⁰ Brownian Force

¹¹ Stokes-Cunningham

¹² Molecular Mean Free Path

¹³ Drag Force

¹⁴ Virtual mass

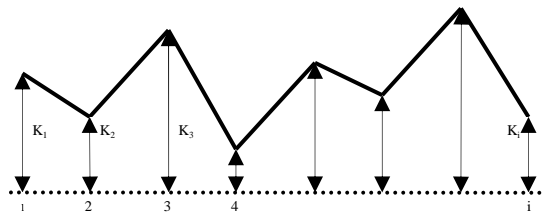
¹⁵ Faxen

¹⁶ Basset Force

⁷ Continuous Filter White-Noise; CFWN

⁸ Fluid Point Lagrangian Integral Time

⁹ Spectral Intensity

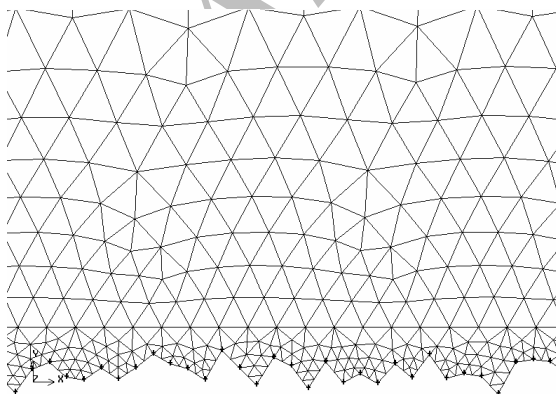


شکل ۱. شکل شماتیک سطح زبر مورد استفاده

اعداد k_1, k_2, \dots, k_i و دارای توزیع نرمال با میانگین k ، (اندازه متوسط زبری سطح) و انحراف معیار $\sigma_k = 0.5k$ می‌باشند. البته برونه [۱] پیشنهاد استفاده از $\sigma_k = 0.17k$ را نموده است. استفاده از $\sigma_k = 0.17k$ باعث تولید یک سطح بسیار مشابه با سطح صاف می‌گردد لذا در این مطالعه از $\sigma_k = 0.5k$ استفاده شده است.

۶. نتایج در بخش میدان سرعت

میدان سرعت برای یک کانال به عرض 0.02 متر و طول 0.4 متر تحلیل شده است. جریان داخل کانال متقارن می‌باشد، لذا محاسبه تنها در نیمی از عرض کانال انجام شده است. هوا در دمای 288 K و لزجت $1.84 \times 10^{-5} \text{ Nsm}^{-2}$ و چگالی $1/125 \text{ kgm}^{-3}$ می‌باشد. سرعت متوسط در درون کانال 5 m/s و عدد رینولدز 6657 می‌باشد، لذا حالت جریان آشفته می‌باشد. شرط مرزی ورودی جریان، سرعت یکنواخت $u = 5 \text{ m/s}$ با شدت اغتشاش دو درصد در نظر گرفته شده است. شرط مرزی جریان در خروجی از کانال، جریان کاملاً توسعه یافته می‌باشد. از مدل انتقال تنشهای رینولدز با ضرایب تصحیح شده، برای حل جریان استفاده می‌شود. در این بخش نتایج حاصل برای میدان جریان در کانال با جداره‌های زبر ارائه خواهد شد. دو سطح زبر با زبری‌های متوسط $k = 0.1 \text{ mm}$ و $k = 0.04 \text{ mm}$ مطالعه شده‌اند. شبکه محاسباتی مورد استفاده به دلیل نامتقارن بودن سطح زبر، مثلی در نظر گرفته شده است. شکل ۲ بخشی از شبکه محاسباتی جریان را نشان می‌دهد.



شکل ۲. شمای شبکه محاسباتی در بخشی از میدان جریان در کانال با جداره‌های زبر و در نزدیک دیوار

۵. تصحیح ضرایب ثابت مورد استفاده در مدل تنشهای

رینولدز

مقادیر پیش فرض مورد استفاده C_1 و C_2 در معادله (۳) با انطباق میانگین مربعات مولفه نوسانی سرعت محوری $\overline{u'^2}$ با داده‌های آزمایشگاهی به دست آمده‌اند. در زیر لایه لزج نزدیک دیوار مدل تنشهای رینولدز که توسط معادله (۳) بیان شده است، منجر به $\overline{v'^2} = \frac{1}{2} \overline{u'^2}$ خواهد شد که بیش از مقادیر تخمینی برای نوسانات سرعت عمود بر دیوار می‌باشد. برای بیان مناسب‌تر تغییرات $\overline{v'^2}$ می و احمدی [۱۶] مقادیر ثابت‌های C_1 و C_2 را با انطباق معادله (۳) و میانگین داده‌های آزمایشگاهی برای $\overline{v'^2}$ در زیر لایه لزج مجدداً بدست آورده‌اند. در این روش مقادیر $C_1 = 1.5$ و $C_2 = 0.1$ کاهش یافته است که در این پژوهش از این مقادیر برای محاسبات استفاده شده است. لازم به ذکر است که مولفه‌های نوسانی سرعت به صورت زیر بی بعد شده‌اند:

$$u^+ = \frac{\sqrt{\overline{u'^2}}}{u^*}, v^+ = \frac{\sqrt{\overline{v'^2}}}{u^*} \quad (17)$$

در رابطه (۱۷)، $u^* = \sqrt{\tau_w / \rho}$ سرعت برشی^{۱۷} می‌باشد که در آن ρ ، چگالی سیال و τ_w تنش برشی بر روی دیوار است که با توجه به رابطه زیر به ضریب اصطکاک f مربوط می‌شود:

$$f = \frac{4\tau_w}{\rho u^2} = \frac{8u^{*2}}{u^2} \quad (18)$$

برای محاسبه ضریب اصطکاک یک فرمول تجربی توسط وایت [۱۹] به صورت زیر ارائه شده است:

$$\frac{1}{f^{1/2}} = -1.8 \log \left[\frac{6.9}{2\text{Re}} + \left(\frac{k/h}{14.8} \right)^{1.11} \right] \quad (19)$$

که در آن k ارتفاع متوسط زبری، h نصف عرض کانال و Re عدد رینولدز جریان بر مبنای h می‌باشد.

۵. روش تولید سطح زبر

برای تولید هندسه سطح زبر، سطح کانال به بازه‌هایی که طول آنها در سرتاسر جدار کانال ثابت است، تقسیم شده است. این بازه‌ها در شکل ۱ به صورت ۱-۲، ۳-۲ و ... نشان داده شده‌اند. طول همه بازه‌ها با هم مساوی و برابر اندازه متوسط زبری سطح، k ، می‌باشد. برای هر بازه یک زبری متوسط تعریف شده است که نماینده متوسط زبری سطح در کل بازه می‌باشد. این زبری‌های متوسط در شکل ۱ با k_1, k_2, \dots, k_i نشان داده شده‌اند.

¹⁷ Shear Velocity

با توجه به شکل افزایش زبری جدار کانال باعث افزایش مولفه‌های نوسانی سرعت در جهت عمود بر جریان خواهد شد. نتایج حاصل نشان می‌دهد که تاثیر زبری بر مولفه‌های نوسانی سرعت عمود بر جریان بیش از مولفه‌های نوسانی سرعت در جهت جریان است. هر چند که برای نوسانات سرعت در جهت جریان نزدیک دیوار، زبری تاثیر کمتری دارد.

در شکل ۳ و ۴ نتایج آزمایشگاهی به دست آمده توسط کریپلین و اکلمان [۲۱] برای کانال با جدار صاف توسط مربعهای توخالی نمایش داده شده اند. مشاهده می شود که نتایج به دست آمده از پژوهش اخیر همخوانی خوبی با نتایج آزمایشگاهی دارند و تنها در ناحیه کوچکی در نزدیک دیوار، مولفه‌های نوسانی سرعت در جهت جریان در این پژوهش تفاوت قابل ملاحظه ای با نتایج آزمایشگاهی کریپلین و اکلمان دارند.

۶. نتایج در بخش حرکت ذرات

در این قسمت نتایج مربوط به ته نشینی و پخش ذرات جامد در داخل جریان که به صورت نقطه‌ای تزریق شده اند، آورده شده است. کانال مورد بحث مستطیلی شکل با عرض ۲ سانتی متر و طول ۴۰ سانتی متر می باشد.

سرعت متوسط جریان سیال در کانال $u=5$ m/s در نظر گرفته شده است. دمای 288 K و لزجت 2×10^{-5} Nsm⁻² و چگالی 1.84×10^{-3} kgm⁻³ $1/125$ برای هوا در نظر گرفته شده است.

عدد رینولدز بر مبنای عرض کانال 6657 است. بنابراین جریان مغشوش می‌باشد. زبریهای جدار مطالعه شده 0.1 میلی‌متر و 0.04 میلی‌متر می‌باشند.

سرعت برشی جریان، u^* ، واحد زمانی دیوار^{۱۹}، V/u^* ، واحد طولی دیوار^{۲۰}، V/u^* که از حل میدان جریان به دست آمده‌اند، به شرح جدول ۱ می‌باشند.

جدول ۱. سرعت برشی و واحدهای زمانی و طولی دیوار

برای زبریهای جدار مختلف به دست آمده از مطالعه حاضر

زبری دیوار k (mm)	سرعت برشی u^* (m/s)	یک واحد طولی دیوار (μ m)	یک واحد زمانی دیوار (ms)	زبری دیوار k (mm)
0	0.330	45	0.138	0
0.04	0.420	36	0.085	1.12
0.1	0.455	33	0.072	3.03

همانطوریکه در شکل ۲ نشان داده شده است، از المانهای مثلثی برای شبکه‌بندی ناحیه نزدیک دیوار استفاده شده است و علت این امر نامنظم بودن هندسه مساله در نزدیکی دیوار می‌باشد.

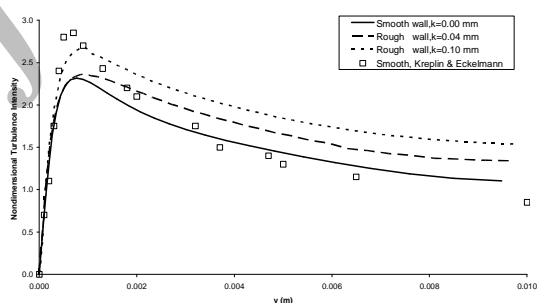
در این مطالعه ابعاد شبکه در نزدیک دیوار برای $k=0.04$ mm در حدود ۲۵ میکرون می‌باشد. هینز [۲۰] داده‌های آزمایشگاهی موجود برای جریانهای لایه مرزی مغشوش بر روی سطوح صاف و زبر را جمع بندی نموده است.

طبق نظر وی اگر چه زبری، سرعت برشی (تنش برش روی دیوار) را زیاد می‌کند ولی تاثیر زیادی بر روی پروفیل میانگین مربعات مولفه‌های نوسانی سرعت دور از دیوار ندارد.

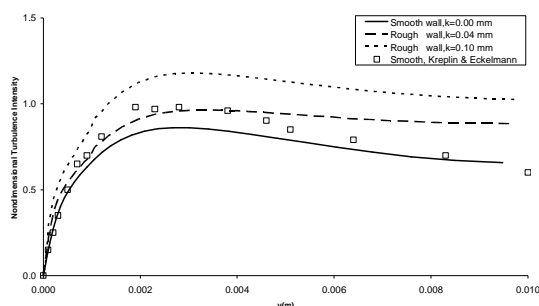
شکل ۳ نتایج حاصل از این پژوهش را برای مولفه نوسانی سرعت بی‌بعد^{۱۸} در جهت جریان در کانال با زبریهای جدار متفاوت نشان می‌دهد.

همانطور که از شکل مشخص است، زبری باعث افزایش مولفه نوسانی سرعت در جهت جریان می‌شود.

شکل ۴ نتایج حاصل برای مولفه نوسانی سرعت در جهت عمود بر جریان را نشان می‌دهد.



شکل ۳. مولفه نوسانی سرعت در جهت جریان برای کانال با زبریهای مختلف (در مقطع $x=0.4$ m)



شکل ۴. مولفه نوسانی سرعت عمود بر جهت جریان برای کانال با زبریهای مختلف (در مقطع $x=0.4$ m)

¹⁹ Time Wall Unit

²⁰ Length Wall Unit

¹⁸ Turbulence Intensity

شکل‌های (۶ الف-ج) مربوط به کانال با زبری جدار ۰/۱ میلی‌متر است و قطر ذرات در آنها نیز ترتیب ۱، ۰/۱ و ۵ میکرون می‌باشد. ذرات به صورت همزمان رها شده‌اند و در هر گام زمانی، متوسط، انحراف معیار، مینیمم و ماکزیمم مطلق موقعیت مکانی قائم کل ذرات محاسبه شده است. تعقیب ذرات تا $t^+ = 100$ ادامه پیدا کرده است.

لازم به ذکر است که مکان اولیه کلیه ذرات $x = 0.3$ m است و در نقطه اولیه، سرعت ذره برابر با سرعت سیال در مکان رها شدن در نظر گرفته شده است.

لی و احمدی [۲۳] ته نشینی و پخش ذرات را برای کانال با جدارهای صاف و سایر شرایط مشابه این مساله بررسی کرده‌اند. طبق نتایج آنها مسیر حرکت متوسط ذرات صرفنظر از قطر آنها در راستای یک خط مستقیم که فاصله آن از دیوار $y^+ = 10$ می‌باشد، باقی مانده و همه آنها در زمان $t^+ = 100$ در محدوده مکانی ± 6 واحد طولی دیوار نسبت به مسیر حرکت متوسط پخش شده‌اند.

در مطالعه حاضر نیز مسیر حرکت متوسط ذرات در راستای یک خط مستقیم باقی می‌ماند و ذرات در زمان $t^+ = 100$ در محدوده مکانی ± 8 واحد طولی دیوار نسبت به مسیر متوسط پخش شده‌اند. شکل‌های (۶ الف، ب، ج) نیز نتایج را برای همان مساله قبلی نشان می‌دهند با این تفاوت که زبری جدار کانال ۰/۱ میلی‌متر در نظر گرفته شده است.

شکل (۶-الف) مربوط به ذرات با قطر ۰/۱ میکرون، (۶-ب) مربوط به ذرات با قطر ۱ میکرون و (۶-ج) مربوط به ذرات با قطر ۵ میکرون می‌باشد.

شکل‌های ۶ نشان می‌دهند که مسیر حرکت متوسط ذرات ارتباطی به قطر ذرات ندارد و در راستای یک خط مستقیم باقی می‌ماند. در زمان $t^+ = 100$ ذرات در محدوده مکانی ± 9 واحد طولی دیوار نسبت به مسیر حرکت متوسط پخش می‌شوند. بنابراین زمانی که ذرات خیلی نزدیک به دیوار نباشند، اغتشاش مکانیزم اصلی در پخش ذرات می‌باشد و اثرات جاذبه و نیروی براونی قابل صرفنظر کردن است.

در نواحی دور از دیوار زبری تا حدودی به پخش ذرات کمک می‌کند و می‌تواند یکی از مکانیزم‌های پخش ذرات باشد ولی آنچه مشخص است اینکه زبری تاثیر زیادی بر ذراتی که دور از دیوار هستند، ندارد.

بنابراین در این پژوهش برای مطالعه اثرات زبری منبع تزریق ذرات به دیوار نزدیک تر شده و بررسی‌ها مجدداً صورت گرفته است. این بار ذرات در فاصله $y^+ = 1$ از دیوار رها شده‌اند.

شکل‌های (۷ الف، ب، ج) مسیر حرکت ذرات با توجه به قطر آنها را نشان می‌دهند. زبری جدار کانال در این مورد ۰/۰۴ میلی‌متر است.

لی و احمدی [۹] با استفاده از یک فرمول تجربی برای شبیه سازی میدان سرعت مغشوش که توسط احمدی و همکاران [۲۲] ارائه شده است و استفاده از روابط (۱۸) و (۱۹)

نتایج جدول ۲ را برای سرعت برشی و واحدهای زمانی و طولی دیوار را به دست آورده‌اند.

مقایسه نتایج جدول‌های ۱ و ۲ نشان می‌دهد که سرعت برشی که از شبیه سازی مستقیم زبری به دست می‌آید کمی بیشتر از سرعت برشی بدست آمده از طریق فرمول‌های تجربی ارائه شده است.

همچنین افزایش زبری باعث افزایش سرعت برشی می‌شود که این امر به دلیل افزایش تنش برش روی دیوار است.

جدول ۲. سرعت برشی و واحدهای زمانی و طولی دیوار برای زبریهای جدار مختلف بدست آمده توسط لی و احمدی

[۹]

زبری بی بعد k^+	یک واحد زمانی دیوار (ms)	یک واحد طولی دیوار (μm)	سرعت برشی u^* (m/s)	زبری دیوار k (mm)
0.000	0.169	50.2	0.229	0
0.816	0.160	49.0	0.307	0.04
2.119	0.148	47.2	0.318	0.1

ذرات مطالعه شده در این پژوهش دارای قطر بین ۰/۱ تا ۱۰ میکرون می‌باشند و نسبت چگالی ذره به سیال برای همه آنها ۲۰۰۰ در نظر گرفته شده است.

جدول ۳ برای زبریهای مختلف جدار کانال، قطر بی بعد ذره و زمان آسایش^{۲۱} بی بعد رانشان می‌دهد.

در بررسی‌های مربوط به ته نشینی و پخش ذرات از تعداد ۱۰۰۰ ذره استفاده شده است. سپس این ذرات از یک منبع تزریق نقطه-ای^{۲۲} به داخل جریان وارد شده‌اند و مسیر حرکت متوسط آنها بررسی شده و از نظر آماری تحلیل شده است.

با توجه به نتایج پخش میدان جریان، در ۲۰ سانتی متر انتهای کانال جریان به حالت توسعه یافتگی می‌رسد و بنابراین بررسی حرکت ذرات نیز در این ناحیه انجام شده است.

شکل‌های (۵ الف-ج) و (۶ الف-ج) نتایج بدست آمده برای حرکت ذرات از یک منبع تزریق نقطه‌ای که در فاصله $y^+ = 10$ از دیوار قرار دارد را نشان می‌دهند.

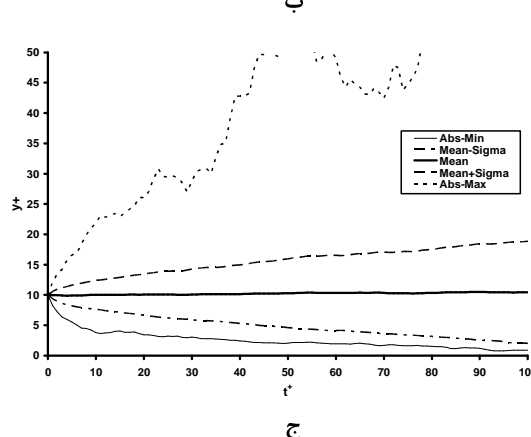
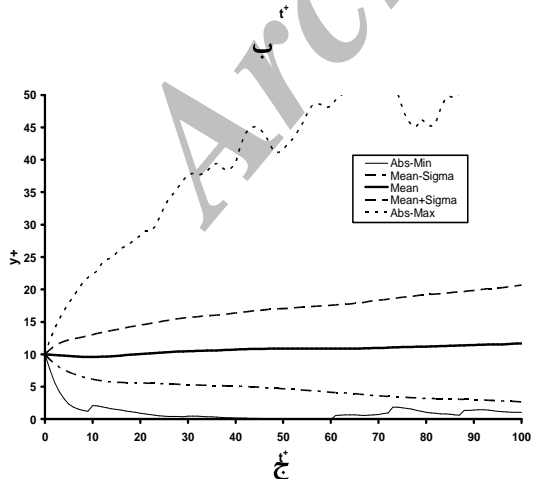
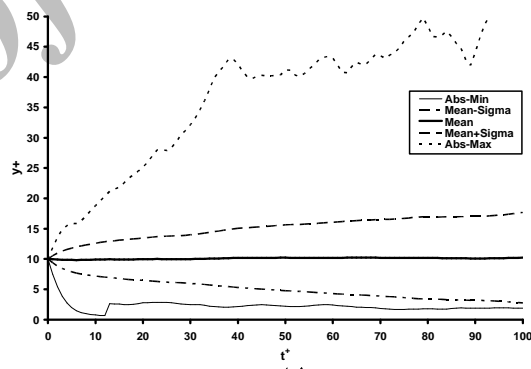
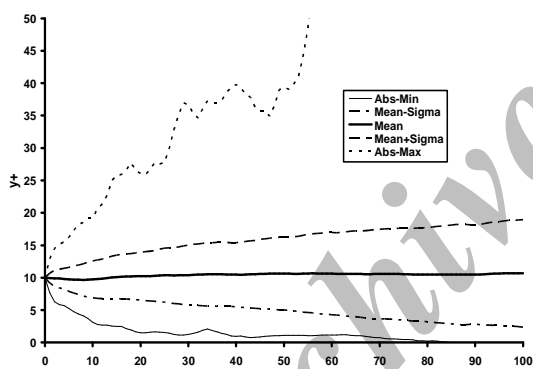
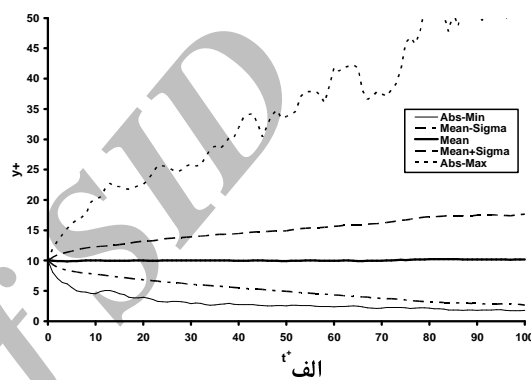
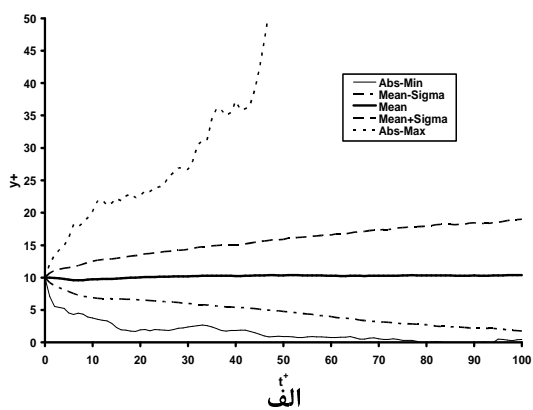
شکل‌های (۵ الف-ج) مربوط به کانال با زبری جدار ۰/۰۴ میلی‌متر می‌باشد و قطر ذرات در آنها به ترتیب ۰/۰۱، ۱ و ۵ میکرون می‌باشند.

²¹ Particle Relaxation Time

²² Source Point

جدول ۳. قطر بی بعد و زمان آسایش بی بعد ذرات

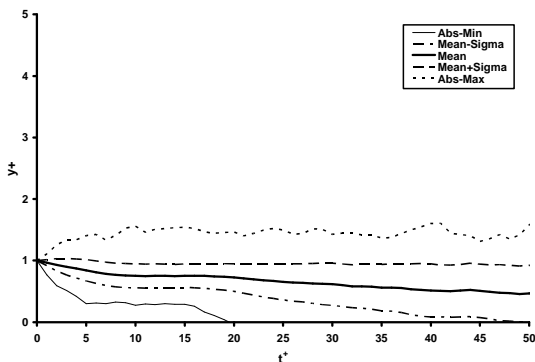
$k=0.1 \text{ mm}$		$k=0.04 \text{ mm}$		قطر ذره، d
τ_p^+	d^+	τ_p^+	d^+	(μm)
1.0×10^{-5}	3.0×10^{-4}	8.7×10^{-6}	2.8×10^{-4}	0.01
1.0×10^{-3}	3.0×10^{-3}	8.7×10^{-5}	2.8×10^{-3}	0.1
2.6×10^{-2}	1.5×10^{-2}	2.1×10^{-2}	1.4×10^{-2}	0.5
1.0×10^{-1}	3.0×10^{-2}	8.7×10^{-2}	2.8×10^{-2}	1
2.6×10^0	1.5×10^{-1}	2.2×10^0	1.4×10^{-1}	5
10.2×10^0	3.0×10^{-1}	8.7×10^0	2.8×10^{-1}	10



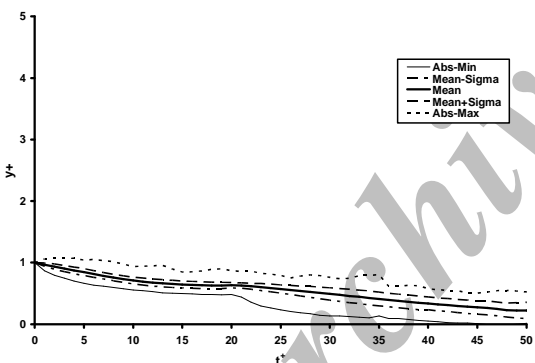
شکل ۶. مسیر حرکت ذرات برای $y+=10$ و $k=0.1 \text{ mm}$.
 (الف) $d=0.01 \mu\text{m}$; (ب) $d=1 \mu\text{m}$; (ج) $d=5 \mu\text{m}$

شکل ۵. مسیر حرکت ذرات برای $y+=10$ و $k=0.04 \text{ mm}$.
 (الف) $d=0.01 \mu\text{m}$; (ب) $d=1 \mu\text{m}$; (ج) $d=5 \mu\text{m}$

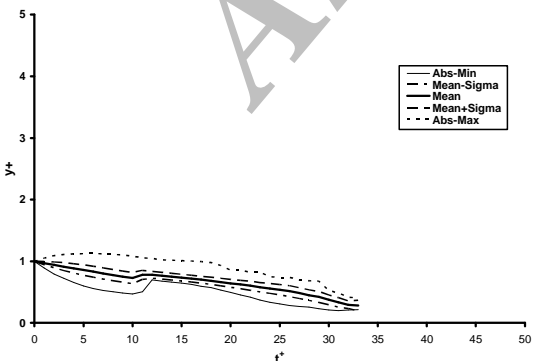
قابل صرفنظر کردن است [۲۳]. بنابراین ذرات بزرگ که به دیوار نزدیک می‌شوند، نمی‌توانند توسط نیروی براونی پخش شوند و تحت تاثیر نیروی جاذبه روی دیوار خواهند نشست. لی و احمدی [۲۳] همین مساله ولی با جدار کانال صاف را حل کرده‌اند. برای ذرات با قطر 0.1 میکرون در زمان $t^+ = 100$ در کانال صاف تنها ۲۶۵ ذره رسوب کرده‌اند ولی برای کانال زیر طبق نتایج این پژوهش ۴۲۲ ذره روی دیوار رسوب می‌کنند. بنابراین در نزدیک دیوار زبری یک عامل اصلی در نشست ذرات روی دیوار به شمار می‌آید. شکل‌های (۸ الف، ب، ج) نتایج بررسی آماری روی حرکت ذرات با قطرهای مختلف که در فاصله $y^+ = 1$ از دیوار توسط تزریق نقطه‌ای داخل جریان رها شده اند را نشان می‌دهد.



الف



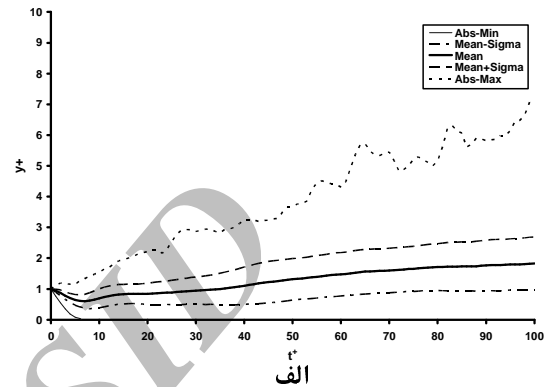
ب



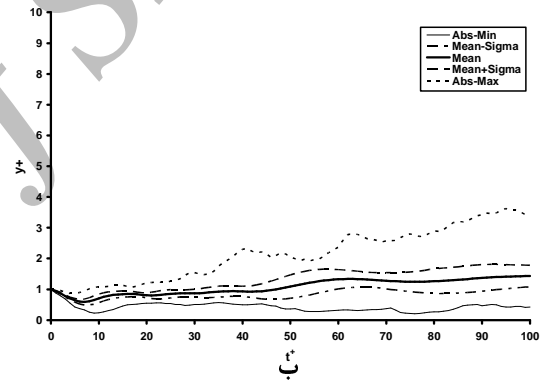
ج

شکل ۸. مسیر حرکت ذرات برای $y^+ = 1$ و $k = 0.1$ mm (الف) $d = 0.01$ μm (ب) $d = 1$ μm (ج) $d = 5$ μm

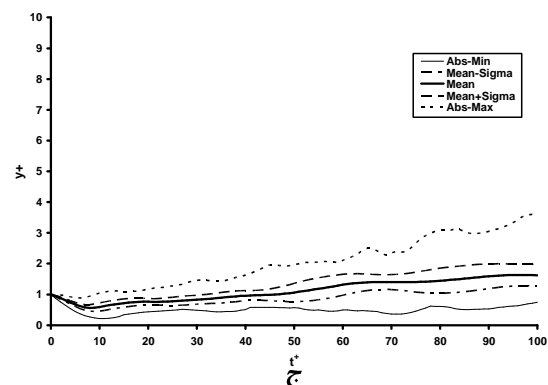
شکل‌های (۷ الف، ب، ج) نشان می‌دهند که مسیر حرکت متوسط برای ذرات ۱ و ۵ میکرون تقریباً در راستای یک خط مستقیم باقی می‌ماند و ذرات در زمان $t^+ = 100$ در محدوده مکانی ± 0.4 واحد طولی دیوار باقی می‌مانند. درحالی‌که مسیر حرکت متوسط ذرات با قطر ۱ از دیوار دور می‌شود و در زمان $t^+ = 100$ ذرات در محدوده مکانی ± 0.8 واحد طولی دیوار پخش می‌شوند.



الف



ب



ج

شکل ۷. مسیر حرکت ذرات برای $y^+ = 1$ و $k = 0.04$ mm (الف) $d = 5$ μm (ج) $d = 1$ μm (ب) $d = 0.01$ μm

خیلی نزدیک دیوار، مولفه‌های نوسانی سرعت ناشی از اغتشاش ضعیف می‌شوند و حرکت براونی مکانیزم اصلی پخش ذرات با قطر کم خواهد شد. اثر نیروی براونی برای ذرات بزرگتر از 0.15 میکرون

زبری ۰/۰۴ میلیمتر است و نمودار با ضریبدر نیز مربوط به سطح با زبری ۰/۱ میلیمتر است.

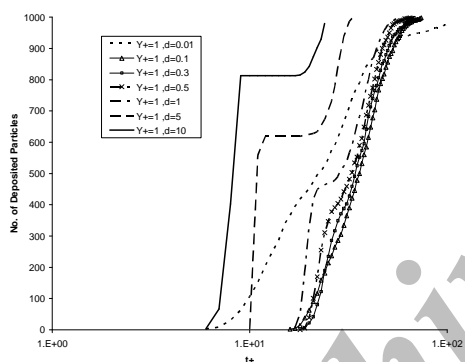
از دیگرام مشاهده می‌شود که نرخ ته‌نشینی برای سطح با زبری ۰/۱ میلیمتر بالاست و تا زمان $t^+ = 100$ تمام ذرات صرفنظر از قطر آنها رسوب می‌کنند.

در صورتیکه نمودار شکل ۱۱ برای بازه زمانی کوچکتری رسم شود، مشاهده می‌شود که منحنی وی-شکل^۱ در مورد سطح با زبری ۰/۱ میلیمتر نیز دیده می‌شود.

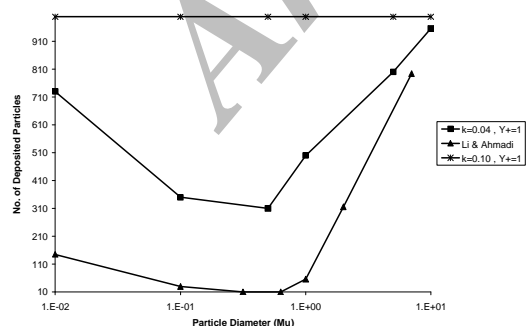
نرخ ته‌نشینی برای ذرات خیلی کوچک و خیلی بزرگ نسبتاً زیاد است.

حداقل نرخ ته‌نشینی برای ذرات با قطر ۰/۵ میکرون اتفاق می‌افتد. تغییرات وی-شکل ته‌نشینی ذرات با داده‌های آزمایشگاهی سهم^۲ (۱۹۷۳) همخوانی دارد.

در مورد ذرات کوچک، پخش براونی نرخ ته‌نشینی ذرات را افزایش می‌دهد. در حالیکه در ذرات بزرگ نیروی جاذبه و گردابه‌های اغتشاش مکانیزم‌های اصلی در کنترل رسوب ذرات هستند.



شکل ۱۰. تعداد ذرات رسوب کرده روی دیوار نسبت به زمان برای $k=0.1 \text{ mm}$



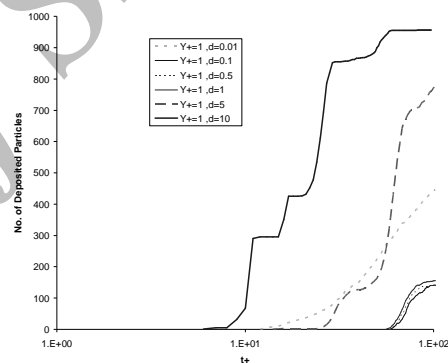
شکل ۱۱. تعداد ذرات رسوب کرده روی دیوار در فاصله ۱۰۰۰ واحد زمانی دیوار بر حسب قطر ذرات

زبری جدار کانال ۰/۱ میلیمتر در نظر گرفته شده است. با توجه به اینکه میزان نشست ذرات روی دیوار خیلی زیاد است، تعقیب ذرات تا زمان $t^+ = 50$ صورت گرفته است.

تا این زمان بیشتر ذرات روی دیوار رسوب خواهند کرد. شکل‌های (۸ الف، ب، ج) نشان می‌دهند که تنها در مورد ذرات با قطر ۰/۰۱ میکرون است که به دلیل نیروی براونی پخش ذرات تا حدودی صورت می‌گیرد.

ذرات با قطر ۱ و ۵ میکرون بلافاصله پس از رهاسازی جذب سطح می‌شوند. جذب ذرات ۵ میکرون توسط سطح بیشتر است. علت این امر این است که برای ذرات بزرگ نیروی وزن قابل ملاحظه است و به نشست ذرات کمک می‌نماید.

شکل‌های ۹ و ۱۰ تعداد ذرات رسوب کرده روی دیوار نسبت به زمان را نشان می‌دهند. تعداد ۱۰۰۰ ذره از یک منبع تزریق نقطه‌ای در فاصله یک واحد دیوار از جدار رها شده‌اند و تا زمان $t^+ = 100$ تعقیب شده‌اند. در شکل ۹ زبری جدار ۰/۰۴ میلیمتر و در شکل ۱۰ زبری جدار ۰/۱ میلیمتر فرض شده است:



شکل ۹. تعداد ذرات رسوب کرده روی دیوار نسبت به زمان برای $k=0.04 \text{ mm}$

- تعداد ذرات رسوب کرده بر روی دیوار با افزایش قطر ذرات، افزایش می‌یابد. علت اصلی آن نیروی جاذبه است.
- برای ذرات خیلی ریز نیز تعداد ذرات رسوب کرده بر روی دیوار قابل ملاحظه است. چون در مورد ذرات خیلی ریز مقدار نیروی براونی قابل ملاحظه است.
- در نزدیک دیوار، زبری یک عامل اساسی در نشست ذرات بر روی دیوار به شمار می‌رود. از مقایسه شکل‌های ۹ و ۱۰ به آسانی این نکته قابل درک است. با افزایش زبری میزان نشست ذرات بر روی دیوار افزایش می‌یابد.

شکل ۱۱ نیز تعداد ذرات رسوب کرده را بر روی دیوار برای فاصله زمانی ۱۰۰۰ واحد زمانی دیوار نشان می‌دهد. ذرات در فاصله $y^+ = 1$ از دیوار رها شده‌اند و تعداد ذرات نیز ۱۰۰۰ می‌باشد.

نمودار با مثلث‌های توپر نتایج لی و احمدی [۲۳] است که برای سطح صاف بدست آمده است. نمودار با مربع‌های توپر مربوط به سطح با

¹ V-Shaped
² Semmel

[8] Fan F-G. and Ahmadi, G., "A sublayer model for turbulent deposition of particulates in vertical ducts with smooth and rough surfaces." J. Aerosol Sci., No. 24, 1993, pp.45-64.

[9] Li A. and Ahmadi, G., "Computer simulation of deposition of aerosols in a turbulent channel flow with rough walls.", Aerosol Sci. and Technology., Vol. 18, 1993b, pp.11-24.

[10] Shams, M., Ahmadi, G. and Rahimzadeh, H., "A Sublayer Model for Deposition of Nano- and Micro-particles in Turbulent Flows.", J. Chem. Engng. Sci., Vol. 55, 2000, pp. 6097-6107.

[11] Shams, M., Ahmadi, G. and Rahimzadeh, H., "Deposition of various shapes particles on a rough surface in turbulent flow." J. Engng., Vol. 15, 2002, pp. 299-310.

[12] Sommerfeld, M., "Analysis of Collision Effects for Turbulent Gas-particle Flow in a Horizontal Channel: Part I. Particle Transport.", Int. J. Multiphase Flow., Vol. 29, 2003, pp. 675-699.

[13] Sommerfeld, M., Kussin, J., "Analysis of Collision Effects for Turbulent Gas-particle Flow in a Horizontal Channel: Part II. Integral Properties and Validation." Int. J. Multiphase Flow., Vol. 29, 2003, pp. 701-718.

[14] Rodi, W., *Turbulent models and their applications in hydraulics*, IAHR, Delft, The Netherlands, 1984.

[15] Launder, B.E., Reece, G.J. and Rodi, W., "Progress in the development of a Reynolds-stress turbulent closure." J. Fluid Mech., No. 68, part 3, 1975, pp. 537-566.

[16] He, Ch. and Ahmadi, G., "Particle deposition in a nearly developed turbulent duct flow with electroosmosis.", J. Aerosol Sci., No. 30, 1988, pp.739-758.

[17] Clift R., Grace, J. R. and Weber, M. E., *Bubbles, drops and particles*. Academic Press, New York, 1978.

[18] Ounis H. and Ahmadi, G., "Analysis of dispersion of small spherical particles in a random velocity field.", J. Fluid Engng Trans. ASME 112, 1990, pp. 114-120.

[19] White F. M., *Fluid Mechanics*. McGraw-Hill, New York, 1986.

[20] Hinze J. O., *Turbulence*, 2nd ed. McGraw-Hill, New York, 1975.

[21] Kreplin H. P. and Eckelmann, H., "Behavior of the three fluctuating velocity components in the wall region of a turbulent channel flow.", Phys. Fluids., Vol. 22, 1979, pp 1233-1239.

[22] Ahmadi G., Goldschmidt V. W., and Dean, B., "A Model of Incompressible Turbulent Shear Flow.", Iran. J. Sci. Technol., Vol. 5, 1976, pp.147-158.

[23] Li A. and Ahmadi, G., "Dispersion and Deposition of Spherical Particles from Point Sources in a Turbulent Channel Flow." Aerosol Sci. and Technology., Vol. 16, 1992, pp. 209-226.

۷. نتیجه گیری و جمع بندی

جریان دو بعدی سیال درون کانال با سطح زبر به روش شبیه سازی مستقیم زبری بررسی شد. با استفاده از مطالب شرح داده شده، نتیجه گیری و جمع بندیهای زیر را می توان اقتباس نمود:

- مولفه های نوسانی سرعت تابع میزان زبری سطح می باشد. بدین معنا که با افزایش زبری، دامنه مولفه های نوسانی سرعت در افزایش می یابند. تاثیر زبری بر روی مولفه های نوسانی سرعت در جهت عمود بر دیوار خیلی بیشتر از مولفه های نوسانی سرعت در جهت جریان می باشد.
- زبری باعث افزایش تنش برشی بر روی دیوار می شود و افت فشار در کانال با افزایش زبری، افزایش می یابد. مقدار سرعت برشی متوسط روی دیوار به دست آمده از این پژوهش کمی بیشتر از نتایج بدست آمده از طریق فرمول های تجربی می باشد.
- افزایش زبری سطح، نرخ ته نشینی ذرات و سرعت برشی را افزایش می دهد.
- زمانی که ذرات خیلی نزدیک به دیوار نباشند، اغتشاش جریان مکانیزم اصلی در پخش ذرات می باشد و اثرات جاذبه و نیروی براونی قابل صرف نظر کردن است. در نواحی دور از دیوار زبری تاثیر کمی بر روی ته نشینی و پخش ذرات دارد.
- زمانی که ذرات خیلی نزدیک به دیوار باشند، زبری تاثیر بسیار زیادی بر روی ته نشینی ذرات خواهد داشت.
- تاثیر نیروی جاذبه در نرخ ته نشینی ذرات بر روی دیوار برای ذرات با قطر بزرگتر از ۲ میکرون قابل ملاحظه است.

مراجع

- [1] Browne L.W.B., "Deposition of particles on rough surfaces during turbulent gas-flow in a pipe". Atmos. Envir., Vol. 8, 1974, pp. 801-816.
- [2] Davies C. N., *Aerosol Science*. Academic Press, London, 1966.
- [3] Wood N.B. "A simple method for the calculation of turbulent deposition to smooth and rough surfaces", J. Aerosol Sci., Vol. 12, 1981, pp. 275-290.
- [4] Hahn L.A., Stukel, J. J., "Turbulent deposition of submicron particles on rough walls" J. Aerosol Sci., Vol. 16, 1985, pp. 81-86.
- [5] Kader B.A. and Yaglom, A. M., Int. "Turbulent heat and mass transfer from a wall with parallel roughness ridges" J. Heat Mass Transfer, Vol. 20, 1977, p. 345.
- [6] Schack C. J., Pratsinis, S. E. and Friedlander, S.K., "A General Correlation for Deposition of Suspended Particles from Turbulent Gases to Completely Rough Surfaces." Atmos. Environ., Vol. 19, 1985, pp. 953-960.
- [7] Shimada M., Okuyama, K., "Deposition of submicron aerosol particles in turbulent and transitional flow" J. Colloid Interface Sci., No. 125, 1987, pp. 198-211.