

Numerical Study of Deposition of Aerosol Particles of Sulfur Dioxide and Water in the Flow Inside the Channel in the Presence of two Circular Obstacles Using the Lattice Boltzmann Method

Babak Roshani¹, Ahmad Reza Rahmati^{2*} 

¹PhD Student, Department of Mechanical Engineering, University of Kashan, Kashan, Iran. Email Address: babikhoram.roshan@gmail.com

²AssociateProfessor, Kashan University, Kashan, Iran. Correspondence: Email Address: ar_rahmati@kashanu.ac.ir

ARTICLE INFO

Article history:

Article Type: Research Paper

Received: 05 October 2025

Received in revised form: 22 November 2025

Accepted: 09 December 2025

Available online: 22 December 2025

Keywords:

Lattice Boltzmann Method

Curved Obstacle

Particle Tracking

Deposition Mechanism

ABSTRACT

In the present study, the deposition of airborne sulfur dioxide and water particles in a channel flow with two consecutive circular obstacles was numerically investigated using the lattice Boltzmann method. The main objective was to examine the variation in the number of deposited particles under one- and two-obstacle conditions for two different particle types at various Reynolds numbers. The numerical simulation was performed using the Lattice Boltzmann D2Q9 model implemented in C++. The released particles in the channel were water and SO₂ with diameters of 100 nm, 1 μm, and 10 μm. Reynolds numbers ranged from 50 to 800. The results showed that particle type, particle size, Reynolds number, and the number of obstacles significantly influenced the deposition process. For Reynolds numbers higher than 200, the number of deposited particles on the obstacles was nearly the same. At Reynolds number 50, due to the heavier nature of SO₂ particles, only 3 particles were deposited on the obstacles, which was much fewer than the 17 deposited water particles under the same condition. This number remained unchanged for both one- and two-obstacle cases. At Reynolds number 200, the number of deposited particles on the obstacles in the two-obstacle case was almost twice that of the one-obstacle case.

Cite this article: Roshani B, Rahmati A.R. Numerical Study of Deposition of Aerosol Particles of Sulfur Dioxide and Water in the Flow Inside the Channel in the Presence of two Circular Obstacles Using the Lattice Boltzmann Method. Journal of Fluid Mechanics and Aerodynamics Year; 14(2):167-182.

Dor: <https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.23223278.1405.15.1.1.1>



© Author(s) retain the copyright and full publishing rights



Publisher: Imam Hossein University

بررسی عددی رسوب ذرات هوا پخش دی اکسید گوگرد و آب در جریان داخل کانال در حضور دو مانع دایره شکل با استفاده از روش شبکه بولتزمن

بابک روشنی^۱، احمد رضا رحمتی^{۲*}

^۱ دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه کاشان، کاشان، ایران. babikhoram.roshan@gmail.com

^۲ دانشیار، دانشکده مهندسی مکانیک دانشگاه کاشان، کاشان، ایران (نویسنده مسئول). ar_rahmati@kashanu.ac.ir

چکیده	تاریخچه مقاله:
در کار حاضر، رسوب گذاری ذرات هوا پخش دی اکسید گوگرد و آب در جریان داخل کانال شامل دو مانع دایره ای پشت سرهم با استفاده از روش شبکه بولتزمن به صورت عددی بررسی شده است. هدف اصلی، مطالعه ی تغییر تعداد ذرات رسوب کرده در شرایط یک مانع و دو مانع برای دو نوع ذره ی متفاوت در اعداد رینولدز مختلف است. شبیه سازی عددی با استفاده از مدل شبکه بولتزمن D2Q9 و به زبان برنامه نویسی C++ انجام شده است. ذرات رها شده در کانال شامل آب و دی اکسید گوگرد با قطرهای ۱۰۰ نانومتر، ۱ و ۱۰ میکرومتر بوده اند. عدد رینولدز در بازه ی ۵۰ تا ۸۰۰ تغییر کرده است. نتایج نشان داد که نوع ذره، اندازه ذره، عدد رینولدز و تعداد موانع بر فرایند رسوب گذاری تأثیر گذار هستند. برای اعداد رینولدز بالاتر از ۲۰۰، تعداد ذرات رسوب کرده بر روی موانع مشابه است. در عدد رینولدز ۵۰، به دلیل سنگین بودن ذرات دی اکسید گوگرد، تعداد رسوب بر روی موانع تنها ۳ عدد بود که بسیار کمتر از ۱۷ ذره ی آب در شرایط مشابه است. این تعداد در هر دو حالت تک مانع و دو مانع یکسان باقی ماند. در عدد رینولدز ۲۰۰، تعداد ذرات رسوب شده بر روی موانع در حالت دو مانع تقریباً دوبرابر حالت تک مانع به دست آمد.	نوع مقاله: علمی پژوهشی دریافت: ۱۴۰۴/۰۷/۱۳ بازنگری: ۱۴۰۴/۰۹/۰۱ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۹/۱۸ ارائه آنلاین: ۱۴۰۴/۱۰/۰۱
	کلیدواژه ها: روش شبکه بولتزمن مانع منحنی الشکل مسیریابی ذرات سازوکار رسوب

استناد: روشنی بابک، رحمتی احمد رضا. بررسی عددی رسوب ذرات هوا پخش دی اکسید گوگرد و آب در جریان داخل کانال در حضور دو مانع دایره شکل با استفاده از روش شبکه بولتزمن (۱۴۰۴)؛ ۱۴ (۲): ۱۸۲-۱۶۷.

Dor: <https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.23223278.1405.15.1.1.1>

© نویسنده (گان) حق نشر و حقوق کامل انتشار را برای خود محفوظ می دارند.

ناشر: دانشگاه جام امام حسین (ع).



۱- مقدمه

انواع مختلفی از ذرات معلق در هوا وجود دارد که علاوه بر تأثیر بر وضعیت آب و هوا، می‌توانند کیفیت زندگی و سلامت انسان را تحت تأثیر قرار دهند. ذرات معلق، نمونه‌هایی از هوا پخش‌ها هستند که به صورت ذرات مایع یا جامد معلق در هوا تعریف می‌شوند و یک سیستم دوفازی شامل ذرات معلق و هوای اطرافشان را تشکیل می‌دهند. هوا پخش‌ها دامنه گسترده‌ای از پدیده‌ها مانند گردوغبار، بخار، دود، مه و ابر را شامل می‌شوند. مطالعات مربوط به آلودگی هوا، کنترل نشست ذرات روی میکرو تراشه‌ها، طراحی اتاق‌های تمیز، دارورسانی هدفمند، بررسی ذرات استنشاقی، روکش کردن سطوح و فیلتراسیون همگی بخشی از پژوهش‌های مرتبط با انتقال و جذب ذرات هستند [۱].

مطالعات وینگ و همکاران نشان داده است که شناخت هوا پخش‌ها و اثر آن‌ها بر سلامت انسان یکی از مهم‌ترین زمینه‌های تحقیق است و مطالعه رفتار و جداسازی ذرات مورد توجه قرار گرفته است. اختلالات ریوی در بزرگسالان از شایع‌ترین بیماری‌ها هستند و حداقل ۴ مورد از ۱۰ علت مرگ و میر ناشی از بیماری‌های طی در ایالات متحده به نوعی با عملکرد ریه مرتبط است [۲]. مانوی و همکاران اثر آلودگی هوا بر سلامت انسان را بررسی کرده و آلودگی‌ها را به دو دسته‌ی اولیه و ثانویه تقسیم می‌کنند. آلودگی اولیه مستقیماً وارد جَوّ می‌شود، در حالی که آلودگی ثانویه نتیجه تغییرات شیمیایی ذرات موجود است. بیشترین آسیب شامل افراد مسن، نوزادان و زنان باردار می‌شود و تخمین‌ها نشان می‌دهد که ۴۳ درصد از بیماری‌های ریوی و ۲۴ درصد از سکته‌ها ناشی از آلودگی هوا هستند [۳]. بر اساس گزارش سازمان بهداشت جهانی، سالانه ۷ میلیون مرگ ناشی از آلودگی هوا رخ می‌دهد و از هر ۱۰ تنفس در محیط‌های آلوده ۹ تن باعث رسیدن مواد مضر به بافت‌های شش و سیستم قلبی - عروقی می‌شود [۴]. مطالعات دیگر نشان می‌دهند که سالانه حدود ۲/۴ میلیون نفر بر اثر بیماری‌های ناشی از آلودگی هوا می‌میرند و این موضوع در آینده به یکی از مهم‌ترین علل مرگ و میر تبدیل خواهد شد [۵]. وانگ و همکاران با بررسی مصرف سالانه ۸۰۲ میلیارد تن زغال سنگ در چین، میزان انتشار ذرات سرب را محاسبه کرده و ساختار و انتقال آن را مورد مطالعه قرار داده‌اند [۶].

در سال‌های اخیر، پاندمی کرونا توجه به هوا پخش‌ها را افزایش داده است. لی و همکاران احتمال انتقال هوا پخش‌های عفونی کرونا در سوپرمارکت‌ها و اماکن کوچک را بررسی کردند. پنج سوپرمارکت بزرگ و ۲۱ مغازه کوچک مورد مطالعه قرار گرفتند و عوامل اثرگذار به دودسته داخلی و خارجی تقسیم شدند. متغیرها شامل مساحت مغازه‌ها، تعداد مشتریان، مدت زمان حضور و قطر ذرات معلق بود. نتایج نشان داد که غلظت ویروس در مغازه‌های کوچک پایدارتر است و احتمال ابتلا در این مکان‌ها بالاتر است [۷]. شینده و همکاران نیز تأثیر انواع ماسک‌ها بر جلوگیری از ابتلا را بررسی کردند و نشان دادند که در اماکن پرخطر ماسک N95 مؤثرترین گزینه است، در حالی که ماسک‌های جراحی و پارچه‌ای در شرایط کم‌خطر یا عمومی کاربرد دارند [۸].

مطالعات موریارتی و همکاران نشان داده‌اند که دی اکسید گوگرد و ذرات حاصل از احتراق سوخت‌های فسیلی از مهم‌ترین عوامل آلودگی هوا هستند. جذب دی اکسید گوگرد در مجاری تنفسی عمدتاً در بینی و مجاری بالایی به دلیل وجود غشای مخاطی صورت می‌گیرد و میزان حل شدن آن در آب بالا است؛ برای حیوانات در معرض ۲۸/۶ میلی گرم بر مترمکعب موجب تخریب سلول‌های اپیتلیوم تنفسی می‌شود و در انسان‌ها منجر به برونشیت مزمن می‌گردد [۹]. رال و همکاران نیز نشان دادند که ترکیبات گوگرددار در جَوّ، شامل دی اکسید گوگرد، اسیدسولفوریک و سولفات‌های معدنی، بین ۱ تا ۷ روز در هوا باقی می‌مانند و به دلیل حلالیت بالا در لایه‌های پوستی آبدار، سریعاً جذب مجاری بالایی تنفسی می‌شوند.

مطالعات آزمایشگاهی و عددی زیادی به بررسی انتقال و رسوب هوا پخش‌ها در کانال با موانع مختلف مانند استوانه، کره، مربع و بیضی پرداخته‌اند [۱۰]. کانگ و همکاران جریان سیال اطراف موانع دایره‌ای را با آرایش‌های مختلف و به روش شبکه بولتزمن شبیه‌سازی کردند و الگوهای گردابه، توزیع فشار و نیروهای وارده را تحلیل نمودند [۱۱]. می و همکاران رسوب ذرات ۲۰، ۳۰ و ۴۰ میکرومتری بر روی موانع مختلف را در تونل باد بررسی کردند [۱۲]. وانگ و همکاران نیز شبیه‌سازی موانع بیضی را با روش فاز گسسته در فلوئنت انجام دادند و توجه ویژه‌ای به نیروهای وارد بر ذرات داشتند [۱۳].

مطالعات براندون و آگراوال انتقال و رسوب ذرات بر روی مانع مربع با نسبت عرض ۰/۲ برای اعداد رینولدز ۵۰ تا ۱۰۰ را

پرداخته شود تا بتوان با تفسیر رفتار آنها در حالت یک مانع و یا بیشتر به دنبال روش‌های مناسب برای جلوگیری از مضرات بهداشتی زیست‌محیطی بود.

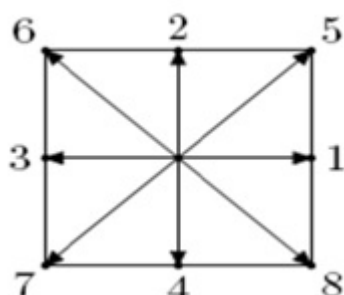
۲- روش مسئله

۲-۱- شبیه‌سازی جریان سیال با روش شبکه بولتزمن

روش شبکه بولتزمن دوبعدی برای شبیه‌سازی جریان سیال استفاده شده است. در این روش جریان سیال با تابع $f_i(\mathbf{x}, t)$ که تابع توزیع چگالی ذرات در مکان، $\mathbf{x}$ ، و زمان، t ، است تفسیر می‌شود:

$$f_i = f_i(\mathbf{x}, t) \quad i = 0, 1, \dots, M \quad (1)$$

M نشان‌دهنده تعداد جهات گسسته‌سازی شده سرعت در شبکه است. در کار حاضر مدل D2Q9 مورد استفاده قرار گرفته است که نشان‌دهنده مدل دوبعدی با ۹ سرعت گسسته شده است که $M=8$ است (شکل ۱).



شکل (۱): شبکه D2Q9 نشان‌دهنده بردارهای سرعت گسته

سازی شده

معادله شبکه بولتزمن از گسسته‌سازی معادله بولتزمن به وجود آمده که ترم برخورد در آن با روش‌های مختلفی تخمین زده می‌شود. در میان این روش‌ها تقریب بی - جی - کی بسیار مورد استفاده قرار می‌گیرد [۲۰].

$$f_i(\mathbf{x} + \mathbf{c}_i \Delta t, t + \Delta t) = f_i(\mathbf{x}, t) - [f_i(\mathbf{x}, t) - f_i^{eq}(\mathbf{x}, t)] / \tau + F_i \quad (2)$$

τ زمان آسایش بی‌بعد است که نرخ تعادلی موضعی (f_i) را کنترل می‌کند. زمان آسایش بیان‌کننده گرانروی سیال است. ارتباط

$$\nu = C_s^2 \left(\tau - \frac{1}{2} \right)$$

زمان آسایش و گرانروی با معادله‌ی

تعریف شده است. با قراردادن معادل سرعت صوت به صورت

$$C_s = 1/\sqrt{3}$$

به معادله زیر تبدیل می‌شود.

بررسی کردند و تأثیر نیروی براونی نیز در نظر گرفته شد [۱۴]. تحقیقات پرژکوپ و گاردو به رسوب و فیلتراسیون نانوذرات در فیلترهای دولایه پرداختند و راندمان فیلتراسیون و افت فشار را در بازه وسیعی از اعداد نادسن و پکلت اندازه‌گیری کردند [۱۵]. جعفری و همکاران تأثیر گردابه در پایین‌دست مانع مربع بر رسوب ذرات را بررسی کردند [۱۶]. حسینی و تفرشی نیز با استفاده از فلوئنت، رسوب میکروذرات بر روی موانع مختلف را در اعداد رینولدز پایین مورد مطالعه قرار دادند [۱۷].

در سال‌های اخیر، روش شبکه بولتزمن به عنوان جایگزینی کارآمد برای روش‌های مرسوم دینامیک سیالات محاسباتی توسعه یافته است. همیکا و همکاران با این روش جریان سیال و انتقال حرارت در بیمارستان را شبیه‌سازی کردند و مزایای آن شامل سهولت اعمال شرایط مرزی، محاسبات ساده‌تر و قابلیت موازی‌سازی است [۱۸، ۱۹].

با شبیه‌سازی عددی جریان سیال می‌توان رفتار ذرات را به خوبی شناخت. اطلاعات حاصل از مسیریابی و رسوب ذرات می‌تواند در تحلیل مسائل زیستی؛ مانند ریه انسان، رسوب‌دهنده‌ها و فیلترها کاربرد داشته باشد. با توجه به گستردگی استفاده از روش شبکه بولتزمن در جریان‌های آرام و مغشوش، غیرنیوتنی و مقیاس میکرو و نانومتر، این پژوهش از این روش بهره برده است تا دقت بالایی در مسیریابی و رسوب ذرات حاصل شود.

تمامی مطالعات ذکر شده شامل آلودگی هوا، کرونا و شبیه‌سازی‌ها به سلامت انسان مرتبط هستند و بررسی آن‌ها می‌تواند به حل مسائل بهداشتی کمک کند. دی‌اکسید گوگرد به دلیل خطرات سلامت شهری و ترکیب با سایر ذرات معلق، یکی از مهم‌ترین ذرات در هواپخش‌هاست.

کار حاضر به دلیل اهمیت تأثیر ذرات دی‌اکسید گوگرد در آلودگی هوای شهری و تأثیر بر سلامت شهروندان به دنبال بررسی موردی رفتار ذرات دی‌اکسید گوگرد در جریان داخل کانال و مقایسه آن با ذرات آب است. به همین دلیل خواص سیال و ذرات رها شده از جمله عدد رینولدز، قطر و نوع ذرات به همراه تغییر در تعداد مانع بر روی رسوب و پخش ذرات برای جریان داخل کانال مورد مطالعه قرار گرفته است. علاوه بر این پیاده‌سازی شرایط مرزی منحنی‌شکل نیز بهبود یافته است. حساسیت وجود این ذرات باعث شده که به بررسی رسوب آن‌ها در حضور دو مانع

کانال در نظر گرفته شده است. شرایط مرزی به صورت زیر می‌شود.

$$\begin{cases} u = \frac{6Uy(H-y)}{H^2} \\ v = 0 \end{cases} \quad (7)$$

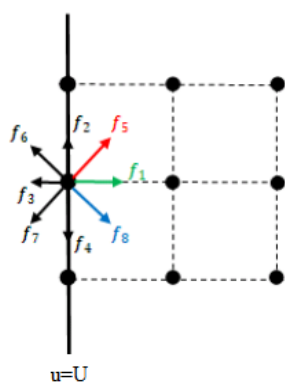
$$\begin{cases} f_5 = f_7 - \frac{1}{2}(f_2 - f_4) + \frac{1}{6}\rho u \\ f_1 = f_3 + \frac{2}{3}\rho u \\ f_8 = f_6 + \frac{1}{2}(f_2 - f_4) + \frac{1}{6}\rho u \end{cases} \quad (8)$$

$$\begin{cases} f_7 = f_5 + \frac{1}{2}(f_2 - f_4) - \frac{1}{6}\rho u \\ f_3 = f_1 - \frac{2}{3}\rho u \\ f_6 = f_8 - \frac{1}{2}(f_2 - f_4) - \frac{1}{6}\rho u \end{cases} \quad (9)$$

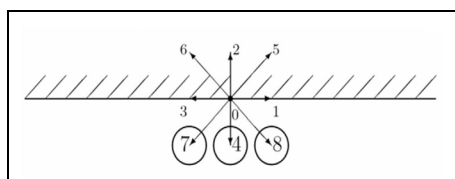
شرط مرزی کمانه کردن برای دیواره‌ها در نظر گرفته شده است.

$$\begin{cases} f_7 = f_5 \\ f_4 = f_2 \\ f_8 = f_6 \end{cases} \quad (10)$$

$$\begin{cases} f_5 = f_7 \\ f_2 = f_4 \\ f_6 = f_8 \end{cases} \quad (11)$$



شکل (۲): شرط مرزی ورودی



شکل (۳): شرط مرزی دیواره شمالی

$$v = (2\tau - 1)/6 \quad (3)$$

$$f_i^{(eq)} = \rho \omega_i \left[1 + 3(\mathbf{e}_i \cdot \mathbf{u}) + \frac{9}{2}(\mathbf{e}_i \cdot \mathbf{u})^2 - \frac{3}{2}u^2 \right] \quad (4)$$

$$w_0 = \frac{4}{9}, w_1 = w_3 = w_5 = w_7 = \frac{1}{9} \quad (5)$$

$$w_2 = w_4 = w_6 = w_8 = \frac{1}{36}$$

$\mathbf{e}_i$ سرعت موضعی ذرات را تعریف می‌کند (شکل ۱).

$$\begin{cases} \mathbf{e}_i = \begin{bmatrix} \cos\left(\frac{\pi}{4}(i-1)\right) \\ \sin\left(\frac{\pi}{4}(i-1)\right) \end{bmatrix} & \text{for } i = 1, 2, 3, 4 \\ \mathbf{e}_i = \sqrt{2} \begin{bmatrix} \cos\left((i-1)\frac{\pi}{4}\right) \\ \sin\left((i-1)\frac{\pi}{4}\right) \end{bmatrix} & \text{for } i = 5, 6, 7, 8 \\ \mathbf{e}_0 = 0 \end{cases} \quad (6)$$

برای شبیه‌سازی موانع منحنی‌شکل در کار حاضر از مانع دایره‌شکل استفاده شده است. با قراردادن دو مانع پشت‌سرهم به تفاوت قرارگرفتن یک مانع با دو مانع نیز پرداخته شده است. باتوجه به متغیرهای مسئله که شامل نوع زره، اندازه قطر ذره و عدد رینولدز است به تفسیر تغییر در این متغیرها پرداخته شده است.

در این شبیه‌سازی از ۱۰۰۰ گره در طول و ۲۰۰ گره در عرض کانال استفاده شده است. طول کانال موردنظر ۰.۵ و عرض آن ۰.۱ است. همچنین حل مسئله به صورت یکنواخت با Δx و Δy برابر و سرعت شبکه‌ی ۱ در نظر گرفته شده است که باعث می‌شود شرط پایداری نیز برابر با ۱ باشد.

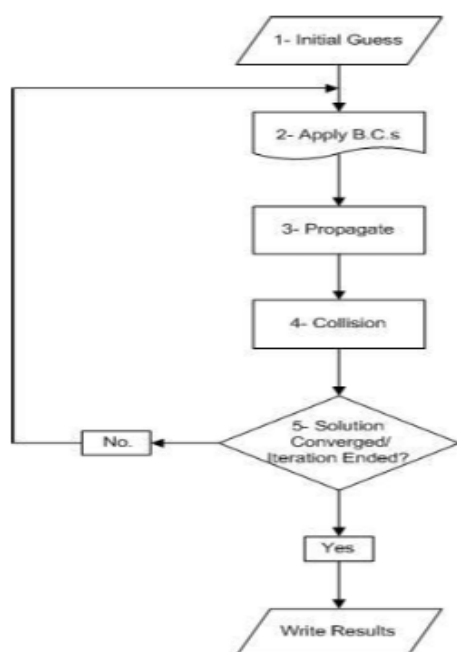
۲-۲- شرایط مرزی

شرایط مرزی ورودی (شکل ۲) و خروجی (شکل ۳) را با استفاده از روش ارائه شده در مطالعات زو و همکاران [۲۱] در نظر گرفته شده‌اند و سرعت ورودی با توزیع سهموی برای ورودی

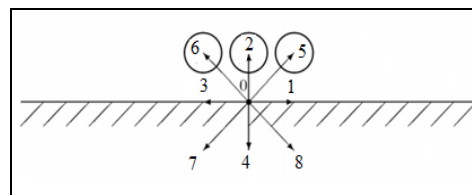
تمامی فرمول‌های استفاده شده در بالا و اثبات روابط فوق در مراجع [۲۳-۲۵] به صورت مفصل شرح داده شده است.

۳-۲- الگوریتم حل در روش شبکه بولتزمن

فرایندهای اصلی محاسبات در روش شبکه بولتزمن شامل دو مرحله‌ی انتشار و برخورد هستند. این مطالعه یک شبکه دوبعدی نه‌جهته است. مرحله‌ی اول تعیین مقادیر اولیه توابع توزیع است. مرحله‌ی دوم اعمال شرایط مرزی در مرزهای ورودی خروجی و دیواره‌ها است. مرحله‌ی سوم مرحله‌ی انتشار یا انتقال مقادیر تابع توزیع هر گره در جهت‌های نه‌گانه است. در گام چهارم که مرحله برخورد است، محاسبات کاملاً به صورت موضعی و در هر گره انجام شده است. بررسی شرط پایان محاسبات در مرحله پنجم انجام شده است که در صورت عدم تحقق شرط همگرایی برطبق الگوریتم به مرحله‌ی دوم برگشت داده می‌شود و حلقه تکرار تا زمان برقراری شرط همگرایی تکرار می‌شود. در صورت تحقق شرط همگرایی به مرحله ششم انتقال داده می‌شود. در این مرحله ثبت نتایج حل مسئله به صورت عامل‌های فیزیکی مانند سرعت، فشار و دما انجام شده است. الگوریتم حل در شکل (۶) مشاهده می‌شود.



شکل (۶): الگوریتم حل مسئله به روش شبکه بولتزمن



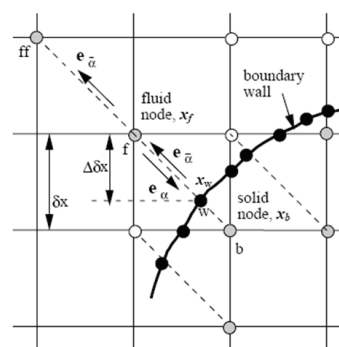
شکل (۴): شرط مرزی دیواره جنوبی

شرط مرزی برای مانع مسئله با استفاده از مطالعات قبلی [۲۱-۲۴] که برای خطوط منحنی است در نظر گرفته شده است. فاصله‌ی بی بعد شده بین نقاط سیال و مرز جامد با Δ معرفی شده است:

$$\Delta = \frac{|x_f - x_w|}{|x_f - x_b|} \quad (12)$$

x_b ، x_w و x_f به ترتیب شامل نقاط میدان سیال، مرز منحنی و نقاط جامد مانع هستند (شکل ۵). در نتیجه‌ی آن تابع توزیع به صورت زیر تعریف شده است.

$$f_i(x_b + c_i \Delta t, t + \Delta t) = (1 - \chi) f_i(x_f + c_i \Delta t, t + \Delta t) + \chi f^*(x_b, t) \quad (13)$$



شکل (۵): شرط مرزی دیواره منحنی شکل مانع

$$f^*(x_b, t) = f_i^{eq}(x_f, t) + \omega_i \rho(x_f, t) \frac{3}{c^2} e_i (u_{bf} - u_f) \quad (14)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} u_{bf} = \left[1 - \frac{3}{2\Delta} \right] u_f + \frac{3}{2\Delta} \\ \text{and } \chi = \frac{2\Delta - 1}{\tau + \frac{1}{2}} \text{ for } \Delta \geq 1/2 \\ u_{bf} = u_{ff} \text{ and } \chi = \frac{2\Delta - 1}{\tau - 2} \\ \text{for } \Delta < 1/2 \end{array} \right. \quad (15)$$

۴-۲- انتقال و جذب ذرات

۴-۲-۱- معادله حرکت ذرات

ذرات تزریق شده در سیال ذرات استاندارد با شکل کره و چگالی آب مایع و دی‌اکسید گوگرد هستند که تحت تأثیر ۴ نیروی دراگ، گرانش، براونی و سافمن قرار گرفته‌اند. مهم‌ترین این نیروها نیروی دراگ است که باعث پیروی ذرات از جریان سیال می‌شود [۲۶ و ۲۷]. معادله حرکت ذرات به صورت زیر است:

$$\frac{du_i}{dt} = \frac{F_D}{m} + g_i + \frac{F_{saffman}}{m} + \frac{F_B}{m} \quad (16)$$

u نشان‌دهنده سرعت ذره، t نماینده زمان، m بیان‌کننده جرم ذرات، g_i شتاب گرانشی در جهت i ام، F_D نیروی دراگ، $F_{saffman}$ و F_B نشان‌دهنده نیروی سافمن و براونی است. نیروی دراگ و سافمن به ترتیب به صورت زیر است:

$$F_d = \frac{(u^f - u^p)}{\tau} \quad (17)$$

$$f_{saff} = 3.084 \frac{\rho_f}{\rho_p} v_f^{\frac{1}{2}} d_p^{-1} \quad (18)$$

$$(u_f - u_p) \left| \frac{du_f}{dy} \right|^{\frac{1}{2}} \operatorname{sgn} \left(\frac{du_f}{dy} \right)$$

u_f سرعت سیال، u_p سرعت ذرات سیال، ρ و ν نشان‌دهنده چگالی و گرانیوی و τ بیان‌کننده زمان آسایش است.

$$\tau = C_c \frac{\rho_p d_p^2}{18\mu} \quad (19)$$

C_c

$$= \begin{cases} 1 + 2.52 \frac{\lambda}{d_p} & d \gg 0.1 \mu m \\ 1 + \frac{\lambda}{d} [2.34 + 1.05 \exp(-0.39 \frac{d}{\lambda})] & d < 0.1 \mu m \end{cases} \quad (20)$$

d_p قطر ذره، λ مسیر آزاد متوسط مولکول گاز و C_c ضریب تصحیح استوکس کانینگهام است [۱ و ۲۸]. شبیه‌سازی نیروی براونی به وسیله فرایند احتمالی اختلال گوسی انجام شده که

توضیحات دقیق آن در مطالعات لی و احمدی [۲۹ و ۳۰] آمده است.

۴-۲-۲- روش عددی رهگیری ذرات

رابطه (۱۶) به منظور تعیین مسیر حرکت ذره مورد استفاده قرار گرفته است. حل عددی این رابطه به بیان ساده عبارت است از این که در هر گام زمانی نیروهای وارد بر هر ذره باتوجه به موقعیت و سرعت آن تعیین شده است. پس از تعیین نیروها در یک موقعیت خاص برای ذره با استفاده از یکی از روش‌های انتگرال‌گیری عددی، سرعت جدید پس از یک گام زمانی محاسبه شده است. در نهایت با استفاده از سرعت‌های قدیم و جدید ذره، جابه‌جایی آن در طول گام زمانی محاسبه شده و موقعیت جدید آن تعیین گردیده است. حل معادله‌های مسیر حرکت ذره به صورت عددی انجام گرفته است. در این مطالعه از روش انتگرال‌گیری ورله برای حل عددی معادله‌های مسیر حرکت استفاده شده است. این روش عددی نخستین بار به منظور حل عددی معادله‌های مسیره‌های حرکت ذرات در شبیه‌سازی‌های پویایی مولکولی مورد استفاده قرار گرفته است [۳۱]. ویژگی اساسی این روش‌ها پایداری مطلوب و دقت مناسب آن است. دو روش انتگرال‌گیری ورله وجود دارد که روش اول، ورله پایه و روش دوم ورله سرعت است. مزیت اساسی روش دوم به روش اول این است که فرایند محاسباتی آن به اطلاعات تنها یک گام زمانی نیاز دارد. دقت این روش‌های انتگرال‌گیری از مرتبه ۲ است که از ۴ مرحله زیر تشکیل شده است [۳۱]:

$$\begin{cases} 1. x(t + \Delta t) = x(t) + u(t) \cdot \Delta t + \frac{1}{2} a_x(t) \cdot \Delta t^2 \\ \quad x\left(t + \frac{\Delta t}{2}\right) = \frac{1}{2} (x(t) + x(t + \Delta t)) \\ 2. u(t + \Delta t) = u(t) + a_x(t) \cdot \Delta t \\ \quad u\left(t + \frac{\Delta t}{2}\right) = \frac{1}{2} (u(t) + u(t + \Delta t)) \\ 3. \text{with known } x\left(t + \frac{\Delta t}{2}\right) \text{ and } u\left(t + \frac{\Delta t}{2}\right): \\ \quad a_x = \frac{1}{\tau} (u^f(y) - u) \Rightarrow a_x\left(t + \frac{\Delta t}{2}\right) \\ 4. u(t + \Delta t) = u\left(t + \frac{\Delta t}{2}\right) + \frac{1}{2} a_x\left(t + \frac{\Delta t}{2}\right) \cdot \Delta t \end{cases} \quad (21)$$

۵-۲- سازوکارهای رسوب

باتوجه به نیروهای وارد شده و سایر عوامل محیطی رسوب ذرات بر طبق ۴ مکانیزم اینرسیال، گرانشی، براونی و مماسی انجام می‌شود.

۲-۵-۱- رسوب اینرسیال

رسوب اینرسیال یا برخوردی اغلب برای ذرات با لختی زیاد یعنی ذرات با اندازه بزرگ اتفاق می‌افتد. این سازوکار زمانی که در خطوط جریان تغییر جهت زیاد و ناگهانی اتفاق بیفتد خود را در حرکت ذرات بزرگ نشان می‌دهد. این اثر بدین صورت است که ذرات به علت لختی زیاد توانایی دنبال کردن خطوط جریان را ندارند و امکان انحراف آن‌ها از خط جریان و برخورد آن‌ها با موانع و دیواره وجود دارد.

۲-۵-۲- رسوب گرانشی

این رسوب واضح است که در اثر نیروی وزن ذرات به وجود می‌آید. عامل وزن فاکتور تأثیرگذار بر رسوب گرانشی است که باعث می‌شود اندازه‌ی ذرات عامل تأثیرگذار بر سازوکار رسوب گرانشی باشد.

۲-۵-۳- رسوب براونی

رسوب براونی نتیجه‌ی حاصل شده از حرکت براونی است. حرکت براونی در واقع حاصل برخورد ذرات سیال با ذره‌ی در حال حرکت است. در زمان عبور ذرات کوچک از نزدیکی دیواره به دلیل حرکات تصادفی ناشی از حرکت براونی احتمال حرکت در خلاف جهت خطوط جریان وجود دارد که باعث برخورد ذرات به دیواره و رسوب آن‌ها می‌شود که به آن رسوب براونی یا پخشی می‌گویند.

۲-۵-۴- رسوب مماسی

این رسوب زمانی رخ می‌دهد که خطوط جریان از نزدیکی دیواره عبور کنند. در واقع اگر فاصله‌ی بین خطوط جریان و دیواره موردنظر از اندازه‌ی ذرات کوچک‌تر شود امکان رسوب مماسی به وجود می‌آید.

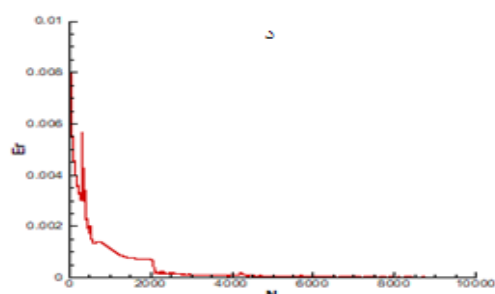
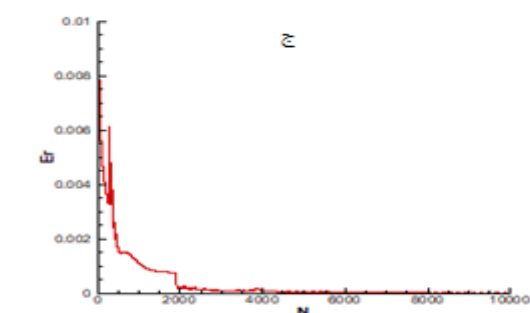
۳- عامل‌های شبیه‌سازی

شبیه‌سازی‌های موردنظر برای عدد رینولدزهای ۱۰، ۳۰، ۵۰، ۱۰۰، ۲۰۰، ۴۰۰ و ۸۰۰ انجام شده‌اند. سیال هوا به‌عنوان سیال در نظر گرفته شده است و با مشخصات استاندارد در نظر گرفته شده است. در اعداد رینولدز در نظر گرفته شده قطر دایره به‌عنوان طول مشخصه و سرعت ورودی به‌عنوان سرعت مشخصه در نظر گرفته می‌شود. برای هر اجرای برنامه تعداد ۱۰۰ ذره در ورودی کانال رها شده‌اند که در بعضی از اجراها برای بررسی یک متغیر خاص تعداد ذرات کم یا زیاد شده است. محل رهاشدن ذرات از گستره‌ی میانه‌ی کانال تا کل کانال تغییر می‌کند که این متغیر نیز برای بررسی‌های موردنظر به یک‌پنجم میانی یا یک‌سوم میانی تغییر می‌کند. تعداد بالای حالت‌های اجرایی و ظرفیت بالای عکس‌ها باعث شده است که اطلاعات به‌دست آمده و نتایج به‌صورت خلاصه و بر طبق توضیحات داده شده آورده شده‌اند.

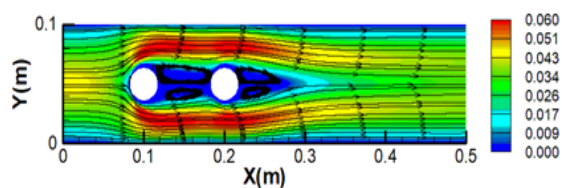
۴- صحت‌سنجی شبیه‌سازی و اعتبارسنجی مسئله

این بخش به دنبال تأیید مناسب بودن روش حل مسئله و تطابق نتایج به‌دست آمده با مطالعات قبلی است. به همین منظور به دنبال مستقل بودن مسئله از تعداد مش در نظر گرفته شده است. برای نشان دادن استقلال از تعداد مش برای ذرات ۱۰ میکرونی و در عدد رینولدز ۱۰۰ چهارترکیب مش متفاوت 140×70 ، 160×80 ، 220×110 و 240×120 استفاده شد که نتایج همه منطبق بر هم است. در شکل‌های شماره‌ی ۷ و ۸ مشاهده می‌شود که میدان سرعت و خطوط جریان و همچنین خطای اندازه‌گیری برای هر ۴ مش منطبق هستند. در شکل‌های موردنظر نمایه‌های الف، ب، ج و د به ترتیب از مش‌های پایین به سمت بالا هستند.

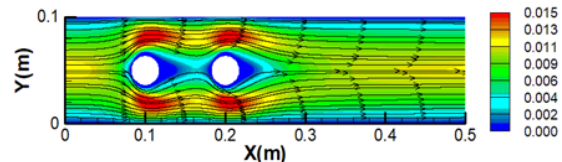
در مطالعات تریتون برای عدد رینولدز ۲۰۰ و بالاتر در پایین دست جریان گردابه‌ها شروع به شکل گرفتن می‌کنند [۳۲]. در صورتی که برای عدد رینولدزهای پایین‌تر این اتفاق نمی‌افتد. این نتایج را می‌توان در شکل‌های ۹ و ۱۰ مشاهده کرد. این نتیجه را می‌توان در مطالعات براندون و آگراوال [۱۴]، [تهرانی] [۳۳] و سلمان‌زاده [۳۴] نیز مشاهده کرد.



شکل (۸): خطای اندازه‌گیری برای ۴ مش متفاوت از مش اصلی

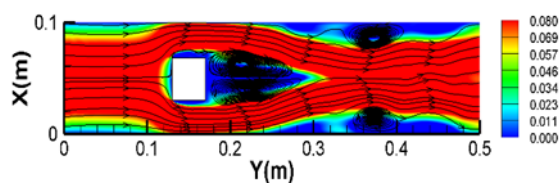


شکل (۹): میدان سرعت و خطوط جریان، برای عدد رینولدز ۲۰۰



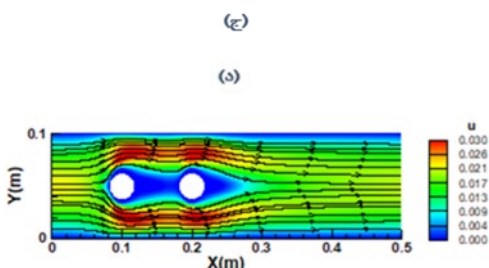
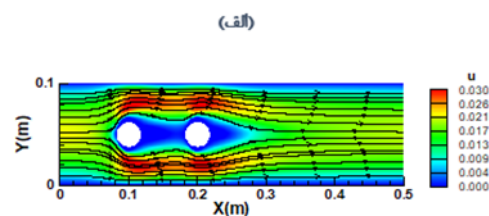
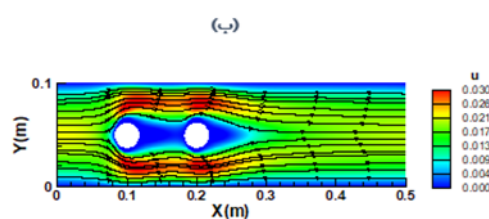
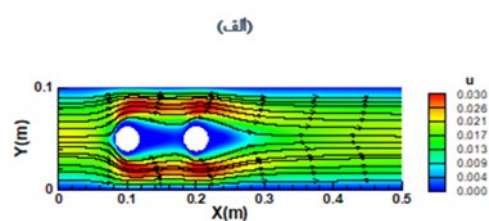
شکل (۱۰): میدان سرعت و خطوط جریان، برای عدد رینولدز ۵۰

برای نشان‌دادن تطابق میدان سرعت و خطوط جریان ذکر شده شبیه‌سازی عبور جریان در شکل (۱۱) مطابق مطالعات آگراوال و براندون (شکل ۱۲) برای مانع مربع‌شکل انجام داده شده است که نشان از تطابق مناسب روش حل مسئله با مطالعات ذکر شده دارد.

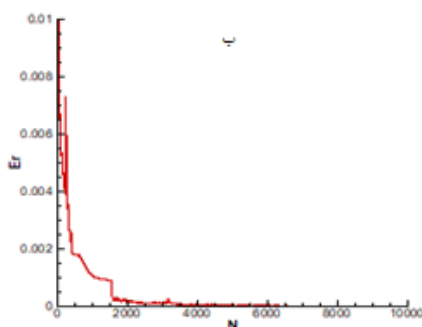
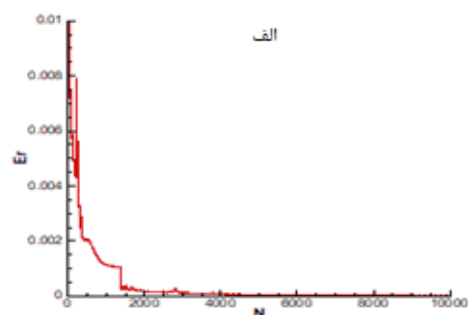


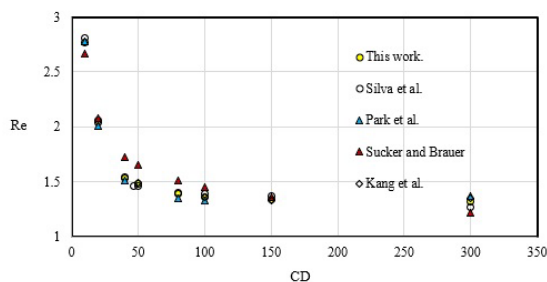
شکل (۱۱): میدان سرعت و خطوط جریان، ایجاد گردابه‌های نامتقارن

در پایین‌دست مانع در عدد رینولدز ۱۰۰۰

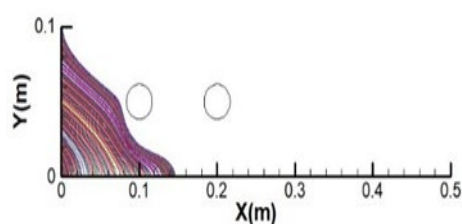


شکل (۷): میدان سرعت و خطوط جریان برای ۴ مش متفاوت از مش اصلی





شکل (۱۴): تغییرات CD بر حسب عدد Re، کار حاضر، سیلوا و همکاران، پارک و همکاران، ساکر و بروکر، کانگ و همکاران



شکل (۱۵): خطوط مسیر ذرات در عدد رینولدز ۳۰ برای ذرات ۱۰ میکرومتری آب

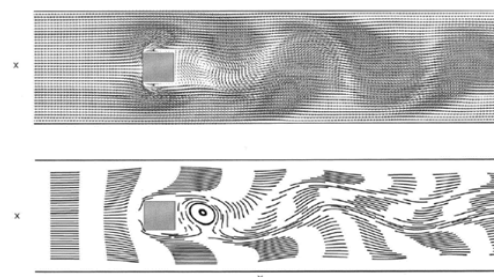
در این مطالعات تغییر در سطح مقطع مانع نیز به عنوان یک متغیر تأثیرگذار در تعداد ذرات رسوب شده در نظر گرفته شده است که در کار حاضر می توان آن را با افزایش مانع برابر دانست و تأثیر آن را بر روی افزایش تعداد ذرات رسوب کرده دید که این نتایج منطبق بر مطالعات سلمانزاده و همکاران [۳۴] و مطالعه تهرانی [۳۳] است. همان طور که افزایش سطح مقطع در اعداد رینولدز متوسط برای این مطالعات باعث افزایش رسوب بر روی موانع شده است در این مطالعه هم در زمان وجود دو مانع تعداد ذرات رسوب کرده بر روی موانع افزایش می یابد (جدول ۱).

۵- نتایج

۵-۱- تحلیل جریان

نتایج مربوط به تحلیل جریان به طور کلی تأثیرپذیر از عدد رینولدز است. در اعداد رینولدز پایین تا حدود عدد رینولدز ۲۰۰ جریان به صورت خطی و آرام است (شکل های ۹ و ۱۰). به دلیل شکل مقطع که دایره ای شکل است و سطح کوچکی از کانال را فرا گرفته فقط در اعداد رینولدز بالا یعنی اعداد رینولدز ۴۰۰ و ۸۰۰ در پایین دست جریان گردابه تشکیل می شود (شکل ۱۶).

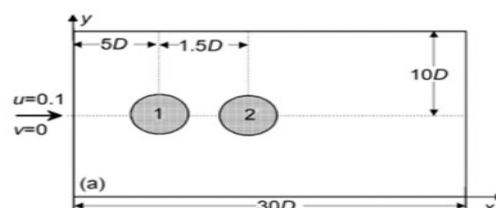
به دلیل وجود دو مانع در اعداد رینولدز متوسط گردابه های پایا در پشت و مابین موانع تشکیل می شود و سرعت جریان بالاتر



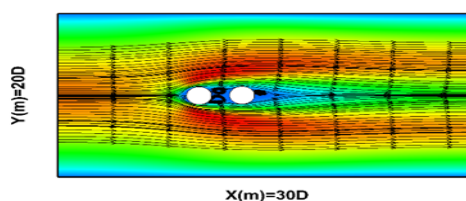
شکل (۱۶): میدان سرعت و خطوط جریان، ایجاد گردابه های نامتقارن در پایین دست مانع در عدد رینولدز ۱۰۰۰ [۱۴]

همچنین برای حالت دو مانع دایره ای شبیه سازی بر طبق مطالعه کانگ انجام شده است که هندسه ی مسئله و میدان سرعت و خطوط جریان در شکل ۱۳ نشان داده شده است. برای صحت سنجی مسئله به مقایسه ی ضریب درگ روی مانع با مطالعه کانگ و مراجع [۳۷-۳۵] که همگی به محاسبه ی ضریب درگ جریان حول دایره پرداخته اند مقایسه شده و نتایج در شکل شماره ۱۴ قابل مشاهده است.

باتوجه به جدول (۱) در عدد رینولدزهای پایین بسیاری از ذرات قبل از مانع رسوب می کنند و همان طور که در شکل ۱۵ مشاهده می شود نیروی گرانش تأثیر زیادی بر روی رسوب ذرات قبل از مانع دارد؛ یعنی در این منطقه رسوب گرانشی یکی از سازوکارهای غالب است. این نتایج را می توان در مطالعات سلمانزاده و همکاران [۳۴] و جعفری و همکاران [۱۶] مشاهده کرد. پس می توان بیان کرد که تأثیر نیروی گرانش بر روی رسوب ذرات تحت تأثیر عدد رینولدز است. تطابق این نتیجه را می توان در مطالعات تهرانی [۳۳] نیز مشاهده کرد.



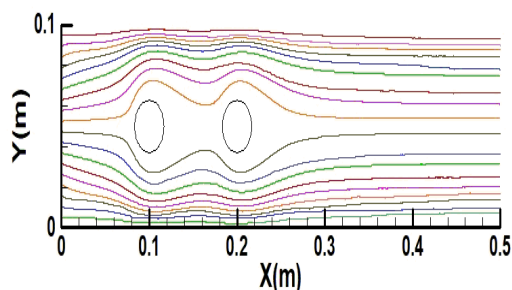
الف



ب

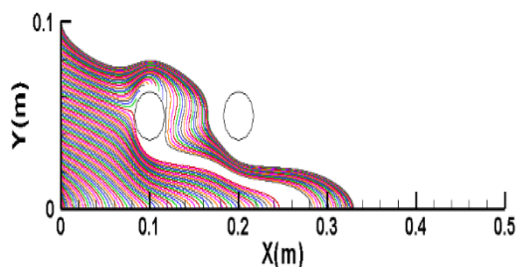
شکل (۱۳): الف) هندسه مسئله مطابق بر مطالعه کانگ ب) میدان سرعت و خطوط جریان شبه سازی شده

برای ذرات کوچک‌تر، یعنی ذرات ۱ میکرونی و ۱۰۰ نانومتری، در اعداد رینولدز پایین مشاهده می‌شود که ذرات خطوط جریان را دنبال کرده و در نهایت از کانال خارج می‌شوند (شکل ۱۸).



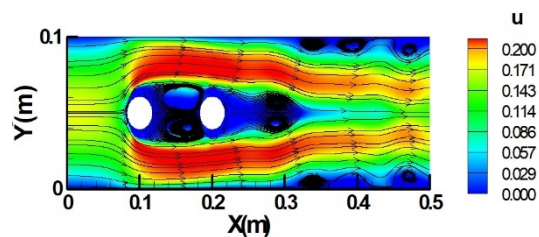
شکل (۱۸): خطوط مسیر ۲۰ ذره رها شده در عدد رینولدز ۵۰ برای ذرات ۱۰۰ نانومتری دی‌اکسید گوگرد

برای ذرات ۱۰ میکرونی در عدد رینولدز ۱۰۰ همچنان سازوکار غالب رسوب ذرات رسوب گرانشی است. هیچ ذره ایی از کانال عبور نکرده و تمامی ذرات بر روی مانع و سطح پایین کانال رسوب می‌کنند (شکل ۱۹). ضمناً بعضی از ذرات رسوب شده تحت تأثیر نیروی برگشتی گردابه‌های تشکیل شده در پایین دست مانع به آن برخورد می‌کنند. همین دلیلی برای غالب بودن مکانیزم رسوب گرانشی در مقایسه با مکانیزم جذب اینرسال برای این حالت است. در اعداد رینولدز ۲۰۰ و بالاتر مشاهده می‌شود که به علت سرعت بالای جریان در حرکت ذرات ۱۰ میکرونی رسوب گرانشی نمی‌تواند باعث رسوب ذرات شود (شکل ۲۰). به دلیل سرعت بالا تعدادی از ذرات ته‌نشین شده و برخی به انتهای کانال می‌رسند (برخی نیز وارد گردابه شده و مسیر آنها به شدت تغییر می‌کند). در حالتی که آشفتگی جریان بین موانع زیاد است نشست اینرسال مکانیزم غالب است. ذراتی که به‌صورت کاملاً آشفته در گردابه‌ها هستند با مکانیزم رسوب اینرسال از مسیر خود خارج شده و روی مانع دوم نشست می‌کنند.



شکل (۱۹): خطوط مسیر ذرات در عدد رینولدز ۱۰۰ برای ذرات ۱۰ میکرومتری دی‌اکسید گوگرد

می‌رود. برای اعداد رینولدز بالا به دلیل سرعت بالا پیچیدگی جریان بیشتر است و گردابه‌های ناپایا تشکیل می‌شوند.

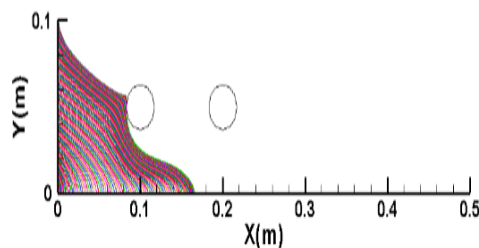


شکل (۱۶): میدان سرعت و خطوط جریان در عدد رینولدز ۸۰۰

۵-۲- رسوب ذرات

باتوجه به نتایج به‌دست‌آمده برای ذرات ۱۰ میکرونی با عدد رینولدزهای ۵۰ و کمتر از ۵۰ اکثر ذرات به دلیل کم بودن سرعت جریان و غالب بودن مکانیزم رسوب گرانشی قبل از رسیدن به مانع ته‌نشین شده و بر دیواره پایینی رسوب می‌کنند. این ذرات برای عدد رینولدزهای ۱۰ و ۳۰ قبل از رسیدن به مانع ته‌نشین می‌شوند (شکل ۱۵).

باتوجه به شکل (۱۷) برای عدد رینولدز ۵۰ از ذرات رها شده در کانال تعداد ۳ ذره به مانع اول می‌رسند. مسیر ذرات ۱۰ میکرونی عمدتاً تحت تأثیر جاذبه هستند و مکانیزم‌های گرانشی و اینرسال، مکانیزم‌های غالب در رسوب این ذرات هستند. این نتیجه برای هر دو نوع ذره یعنی ذرات آب و دی‌اکسید گوگرد مشابه است. در بین نتایج به‌دست‌آمده برای این دو ذره مشاهده می‌شود که تعداد ذراتی که برای هوا پخش آب به مانع رسیده و بر روی مانع رسوب می‌کنند نسبت به ذرات دی‌اکسید گوگرد بیشتر است. تفاوت تعداد ذرات رسوب شده بر روی مانع اول ناشی از اختلاف چگالی این دو ذره است (جدول ۱). تفاوت در رسوب ذرات با چگالی متفاوت و افزایش رسوب ذرات سبک‌تر بر روی مانع تأییدی بر اثرگذاری نیروی جاذبه و غالب بودن سازوکار گرانشی در حرکت این ذرات است.

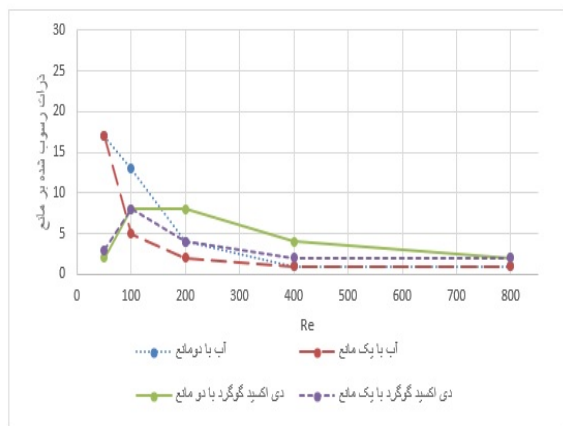


شکل (۱۷): خطوط مسیر ذرات در عدد رینولدز ۵۰ برای ذرات ۱۰ میکرومتری دی‌اکسید گوگرد

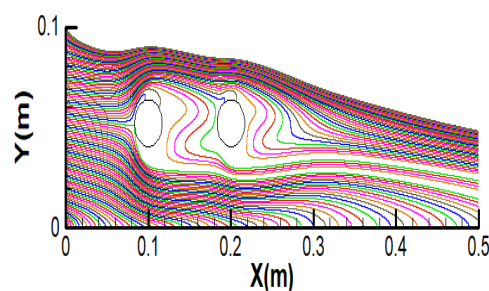
ناشی از هر چهار سازوکار رسوب موردنظر داشته باشد که باتوجه به عدد رینولدز و اندازه‌ی ذرات تأثیر هر سازوکار تغییر می‌کند. برای عدد رینولدزهای متوسط باتوجه به اینکه خطوط جریان منظم هستند ذرات زیر میکرون خطوط جریان را دنبال کرده و افتند. برای وضعیتی که اغتشاش بین موانع بیشتر بوده و ذرات زیر میکرون در حفاصل بین موانع سرگردان شده و برخی از آنها به دام می‌افتند. بیشتر مواقع به دلیل آنکه میزان اغتشاش کم است اختلاف چندانی در خطوط مسیر ذرات ۱ میکرون و ۱۰۰ نانومتر وجود ندارد. برای اعداد رینولدزی که شدت در مغشوش است مشاهده می‌شود که بسیاری از ذرات به شدت در گردابه‌ها به دام افتاده‌اند و برخی هم شدیداً منحرف می‌شوند (شکل ۲۳). در عدد رینولدزهای بالای ۲۰۰ باتوجه به سرعت بالای جریان رسوب گرانشی و اینرسیال بر روی ذرات ۱۰ میکرونی تأثیر آن‌چنانی ندارد و در نتیجه فرق زیادی بین ذرات ۱۰ میکرونی و زیر میکرونی دیده نمی‌شود. البته ذرات زیر میکرونی تحت تأثیر نیروی براونی بیشتر پخش می‌شوند.

جدول (۱): تعداد ذرات ۱۰ میکرومتری رسوب‌کرده‌ی دی‌اکسید گوگرد و آب برای حالات تک مانع و دو مانع در عدد رینولدزهای مختلف

عدد رینولدز					
۸۰۰	۴۰۰	۲۰۰	۱۰۰	۵۰	ذرات SO2
۱	۲	۴	۸	۳	
۲	۴	۸	۸	۳	ذرات H2O
۱	۱	۲	۵	۱۷	
۱	۱	۴	۱۳	۱۷	



شکل (۲۱): تغییرات تعداد ذرات رسوب‌شده‌ی آب و دی‌اکسید گوگرد بر روی موانع با افزایش عدد رینولدز

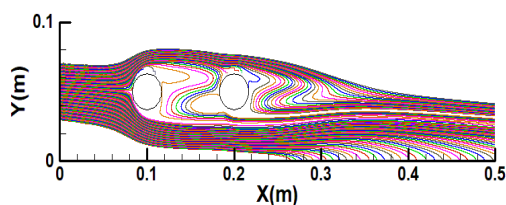


شکل (۲۰): خطوط مسیر ذرات در عدد رینولدز ۲۰۰ برای ذرات ۱۰ میکرومتری آب

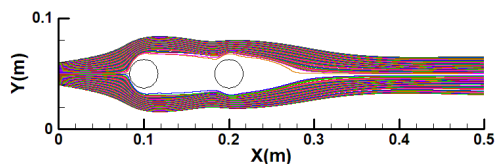
برای ذرات ۱۰ میکرومتری در اعداد رینولدز پایین‌تر از ۱۰۰ قابل‌پیش‌بینی است که وجود یک یا دو مانع تغییری در مقدار ذرات رسوب‌کرده ندارد. برای عدد رینولدز ۱۰۰ که ذرات از مانع اول عبور می‌کنند برای دی‌اکسید گوگرد هیچ ذره‌ای به مانع دوم نمی‌رسد؛ اما برای آب به دلیل پایین‌بودن چگالی، ذرات خود را به مانع دوم رسانده و بر روی آن رسوب می‌کنند. در اعداد رینولدز بالاتر از ۱۰۰ مشاهده می‌شود که تعداد کل ذرات رسوب‌کرده کاهش می‌یابد. در واقع در این حالات به نظر می‌رسد سازوکارهای رسوب اینرسیال و گرانشی دیگر سهمی در ذرات رسوب‌کرده ندارند و بیشتر ذرات همگام با خطوط جریان حرکت می‌کنند. برای ذرات دی‌اکسید گوگرد در عدد رینولدزهای بالای ۲۰۰ مقدار ذرات رسوب‌کرده بر روی مانع در حالت دو مانع باز هم متفاوت از حالت تک مانع است و دوبرابر آن است. به نظر می‌رسد باتوجه به کاهش تأثیر سازوکارهای گرانشی و اینرسیال در اعداد رینولدز بالا سازوکار رسوب مماسی باعث به‌وجودآمدن این تغییرات در حالت یک مانع با دو مانع می‌شود (جدول ۱).

روند کلی رسوب ذرات برای ذرات ۱۰ میکرومتری به‌صورت کلی با افزایش عدد رینولدز به دلیل افزایش سرعت ذرات، تعداد ذرات رسوب‌کرده بر روی مانع کاهش (شکل ۲۲) و تعداد ذرات خروجی از کانال افزایش‌یافته است (شکل ۲۳). افزایش تعداد ذرات خروجی از کانال به دلیل افزایش سرعت ذرات است. باتوجه به کاهش زمان موردنیاز برای رسوب ذرات، کاهش تعداد ذرات رسوب‌شده بر روی مانع منطقی است. برای این ذرات سازوکارهای گرانش و اینرسیال سازوکارهای غالب رسوب هستند. برای دو حالت تک مانع و دو مانع برای اعداد رینولدز پایین در تعداد ذرات رسوب‌شده تغییری مشاهده نمی‌شود، اما برای اعداد رینولدز ۲۰۰ و بالاتر باعث افزایش دوبرابری تعداد ذرات رسوب‌شده می‌شود. این تغییرات باتوجه به متغیرهای موجود می‌تواند

پخشی ته‌نشین می‌شوند. در شکل (۲۵) یکی از ذرات مستقیماً به مانع برخورد کرده است. می‌توان دلیل این پدیده را انحراف بسیار کم خطوط جریان در تقابل بامانع دانست که باعث می‌شود ذرات از فواصل نزدیک مانع عبور کرده و در نتیجه احتمال رسوب از مکانیزم پخش براونی افزایش می‌یابد. برای عدد رینولدز بالا و از وسط کانال برای این ذرات ممکن است که ذرات در گردابه‌های پایین دست مانع گرفتار شوند و همان‌جا معلق بمانند. می‌توان حدس زد که انحراف ذرات مذکور از خطوط جریان و وارد شدن به گردابه‌ها، در اثر نیروی براونی اتفاق افتاده است. به نظر می‌رسد در اعداد رینولدز بالا تفاوت اساسی میان مسیر ذرات ۱۰ میکرونی و ۱۰۰ نانویی وجود ندارد.



شکل (۲۴): خطوط مسیر ذرات رها شده از یک سوم میانی کانال در عدد رینولدز ۴۰۰ برای ذرات ۱۰ میکرومتری دی‌اکسید گوگرد

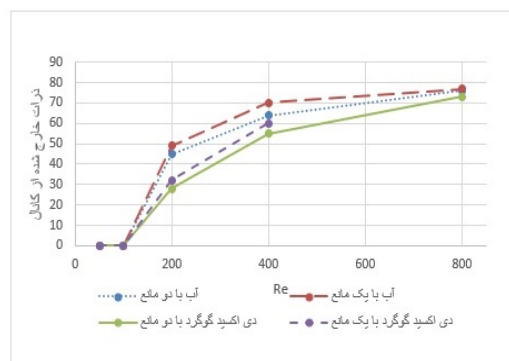


شکل (۲۵): خطوط مسیر ذرات رها شده از یک پنجم میانی کانال در عدد رینولدز ۲۰۰ برای ذرات ۱ میکرومتری دی‌اکسید گوگرد

۶- نتیجه‌گیری

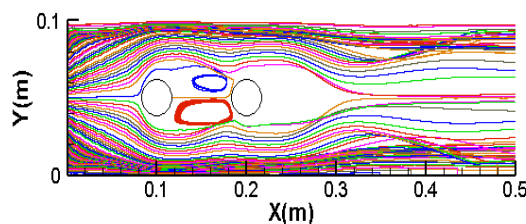
شبیه‌سازی جریان سیال به وسیله روش شبکه بولتزمن به همراه مسیریابی لاگرانژی ذرات انجام شده است. در این کار چندین متغیر تأثیرگذار وجود دارد که هر کدام می‌تواند تأثیر خود را بر جریان و رسوب ذرات رها شده در کانال بگذارد. این متغیرها که شامل نوع زره، اندازه زره، سرعت جریان و تعداد موانع هستند باعث به وجود آمدن نتایج زیر شده‌اند:

ذرات رها شده در کانال از دو نوع ذرات آب و دی‌اکسید گوگرد با اندازه قطرهای ۱۰۰ نانومتر، ۱۰ و ۱ میکرومتر هستند. اعداد رینولدز از عدد رینولدز ۵۰ تا ۸۰۰ متغیر هستند. روند کلی رسوب ذرات برای ذرات ۱۰ میکرومتری بر روی دیواره‌ها و موانع تحت تأثیر عدد رینولدز است. این روند بدین صورت است که با افزایش عدد رینولدز به دلیل افزایش سهم ذرات خروجی از



شکل (۲۲): تغییرات تعداد ذرات خارج شده آب و دی‌اکسید گوگرد از کانال با افزایش عدد رینولدز

سازوکار رسوب پخشی برای ذرات زیر میکرون غالب است. در حالت‌هایی که پیچیدگی جریان بالا بوده و در حدفاصل بین دو مانع گردابه‌های ناپایا شکل گرفته‌اند نشست ذرات بر روی مانع دوم بیشتر است و تعداد زیادی از ذرات در این گردابه‌ها سرگردان می‌شوند.



شکل (۲۳): خطوط مسیر ذرات در عدد رینولدز ۴۰۰ برای ذرات ۱۰۰ نانومتری دی‌اکسید گوگرد

زمانی که ذرات رها شده در تمامی عرض کانال نباشند و از میانه‌ی کانال رها شوند برای ذرات ۱۰ میکرومتری تقریباً همان نتایج به دست می‌آید. در عدد رینولدزهای پایین ذرات باز هم تحت تأثیر سازوکارهای گرانشی و اینرسیال در زمان کوتاهی بر روی سطح کانال ته‌نشین می‌شوند. با افزایش عدد رینولدز می‌توان شاهد کم شدن اثر این سازوکارها شد. برای این ذرات در عدد رینولدزهای بالا به دلیل آنکه ذرات به صورت مجتمع رها شده‌اند امکان به دام افتادن و تحت تأثیر قرار گرفتن ذرات در گردابه‌ها افزایش می‌یابد. همچنین امکان برخورد مستقیم ذرات به مانع افزایش می‌یابد (شکل ۲۴).

برای ذرات رها شده‌ی یک میکرونی و ۱۰۰ نانومتری از وسط کانال لختی این ذرات به قدری کم است که تأثیر نیروی جاذبه بر آنها به سختی دیده می‌شود. ذرات ته‌نشین شده بر روی مانع، به دلیل عبور از نزدیکی دیواره با مکانیزم رسوب مماسی یا رسوب

عدد رینولدز	Re
مؤلفه سرعت در جهت x	u
مؤلفه سرعت در جهت y	v
بردار سرعت	V
ضریب وزنی برای میدان جریان	w

علائم یونانی

چگالی	ρ
فاصله‌ی بی بعد شده	Δ
طول آزاد میانگین	λ
لزجت دینامیکی	μ
زمان آسایش	τ
لزجت سینماتیکی	ν
فرکانس برخورد	ω

زیرنویس

سیال	f
ذرات سیال	p
فرکانس برخورد	w
نقاط جامد مانع	b

۷- مراجع

1. Hinds, W. C., & Zhu, Y. (2022). Aerosol technology: properties, behavior, and measurement of airborne particles. John Wiley & Sons.
2. Wing, E. J., & Schiffman, F. J. (Eds.). (2021). Cecil Essentials of Medicine E-Book. Elsevier Health Sciences.
3. Mannucci, Pier Mannuccio, Sergio Harari, Ida Martinelli, and Massimo Franchini. "Effects on health of air pollution: a narrative review." *Internal and emergency medicine* 10 (2015): 657-662. DOI.org/10.1007/s11739-015-1276-7
4. Tiotiu, Angelica I., Plamena Novakova, Denislava Nedeva, Herberto Jose Chong-Neto, Silviya Novakova, Paschalis Steiropoulos, and Krzysztof Kowal. "Impact of air pollution on asthma outcomes." *International journal of environmental research and public health* 17, no. 17 (2020): 6212. DOI.org/10.3390/ijerph17176212
5. Ma, X., Zhang, T., Ji, C., Zhai, Y., Shen, X., & Hong, J. (2021). Threats to human health and ecosystem: Looking for air-pollution related damage since 1990. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 145, 111146... DOI.org/10.1016/j.rser.2021.111146Get rights and content

کانال سهم تعداد ذرات رسوب کرده بر روی سطوح و مانع کاهش می‌یابد. این کاهش به دلیل افزایش سرعت ذرات منطقی است. به صورت کلی برای ذرات سنگین تر که در این مطالعه منظور ذرات ۱۰ میکرومتری است، سازوکارهای گرانش و اینرسیال سازوکارهای غالب رسوب هستند. به طور مثال برای عدد رینولدز ۵۰ به دلیل سنگین بودن دی اکسید گوگرد تعداد ذرات رسوب کرده بر روی موانع ۳ عدد است که این تعداد بسیار کمتر از ۱۷ ذره رسوب شده آب در شرایط یکسان است. با بررسی در متغیر تعداد موانع برای حالت تک مانع و دو مانع مشاهده می‌شود که برای اعداد رینولدز پایین بدون تأثیر اما برای اعداد رینولدز متوسط و بالا که منظور اعداد رینولدز ۲۰۰ و بالاتر است، باعث افزایش دوبرابری تعداد ذرات رسوب کرده می‌شود. این تغییر می‌تواند ناشی از هر چهار سازوکار رسوب موردنظر داشته باشد که باتوجه به عدد رینولدز و اندازه‌ی ذرات تأثیر هر سازوکار تغییر می‌کند. در ذرات ریز که شامل ذرات ۱ میکرومتری و ۱۰۰ نانومتری هستند در اعداد رینولدز مختلف سازوکارهای گرانش و اینرسیال تأثیری در رسوب ذرات ندارند و ذرات موردنظر در عدد رینولدزهای مختلف خطوط جریان را دنبال می‌کنند. برای این ذرات دو سازوکار مماسی و پخشی سازوکارهای غالب هستند.

فهرست علائم

A	مساحت مانع
C _c	ضریب اصلاح لغزش کانینگهام
C _s	سرعت صوت
e _i	مؤلفه بردار سرعت در مقیاس شبکه در جهت i
F	ضریب شکل
F _d	نیروی دراگ
f _i	تابع توزیع چگالی در جهت i
f _i ^{eq}	تابع توزیع تعادلی در جهت i
f _{saff}	نیروی سافمن
g _i	شتاب گرانشی در جهت i
H	ارتفاع کانال
m	بیان کننده جرم ذرات
M	تعداد جهات گسسته سازی شده سرعت
n _i	نیروی براونی

17. Hosseini, S. A., and H. Vahedi Tafreshi. "On the importance of fibers' cross-sectional shape for air filters operating in the slip flow regime." *Powder technology* 212, no. 3 (2011): 425-431. DOI.org/10.1016/j.powtec.2011.06.025
18. Himika, Taasnim Ahmed, Md Farhad Hasan, and Md Mamun Molla. "Lattice Boltzmann simulation of airflow and mixed convection in a general ward of hospital." *Journal of Computational Engineering* 2016, no. 1 (2016): 5405939. DOI.org/10.1155/2016/5405939
19. Guo, Zhaoli, Chuguang Zheng, and Baochang Shi. "An extrapolation method for boundary conditions in lattice Boltzmann method." *Physics of fluids* 14, no. 6 (2002): 2007-2010.
20. Succi, Sauro. *The lattice Boltzmann equation: for fluid dynamics and beyond*. Oxford university press, 2001.
21. Zhou, Y., R. Zhang, I. Staroselsky, H. Chen, W. T. Kim, and M. S. Jhon. "Simulation of micro-and nano-scale flows via the lattice Boltzmann method." *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications* 362, no. 1 (2006): 68-77. DOI.org/10.1016/j.physa.2005.09.037
22. Bajalan, Sima, Ramin Kouhi Kamali, and Mohammad Hasan Rahimian. "Simulation of Two-Phase Flow and Heat Transfer in a Channel and around a Tube by Lattice-Boltzmann Method." *Amirkabir Journal of Mechanical Engineering* 53, no. 1 (Special Issue) (2021): 499-516. DOI. 10.22060/mej.2019.16044.6272
23. Filippova, Olga, and Dieter Hänel. "Grid refinement for lattice-BGK models." *Journal of Computational physics* 147, no. 1 (1998): 219-228. DOI.org/10.1006/jcph.1998.6089
24. Mei, Renwei, Li-Shi Luo, and Wei Shyy. "An accurate curved boundary treatment in the lattice Boltzmann method." *Journal of computational physics* 155, no. 2 (1999): 307-330. DOI.org/10.1006/jcph.1999.6334
25. Zou, Qisu, and Xiaoyi He. "On pressure and velocity boundary conditions for the lattice Boltzmann BGK model." *Physics of fluids* 9, no. 6 (1997): 1591-1598. DOI.org/10.1063/1.869307
26. Pan, Anjian, Rong-Rong Cai, and Li-Zhi Zhang. "Numerical methodology for simulating particle deposition on superhydrophobic surfaces with randomly distributed rough structures." *Applied Surface Science* 568 (2021): 150872. DOI.org/10.1016/j.apsusc.2021.150872
27. Chen, Chen, Yong Zhu, Mingxia Chen, and Wenfeng Shangguan. "A novel approach for investigation of collision mechanisms between fine particles in electrostatic precipitator under consideration of Brownian effect." *Chemical Engineering Research and Design* 168 (2021): 96-108. DOI.org/10.1016/j.cherd.2021.02.001
28. Bao, Fubing, Hanbo Hao, Zhaoqin Yin, and Chengxu Tu. "Numerical study of nanoparticle deposition in a
6. Wang, Yicheng, Hongyun Hu, Xinye Wang, Huimin Liu, Lu Dong, Guangqian Luo, Yongchun Zhao, and Hong Yao. "A critical review on lead migration, transformation and emission control in Chinese coal-fired power plants." *Journal of Environmental sciences* 124 (2023): 397-413.
7. Li, Chunying, and Haida Tang. "Comparison of COVID-19 infection risks through aerosol transmission in supermarkets and small shops." *Sustainable Cities and Society* 76 (2022): 103424. DOI.org/10.1016/j.scs.2021.103424
8. Shinde, Priyanka P., Varsha P. Desai, Smita V. Katkar, Kavita S. Oza, R. K. Kamat, and Chetan M. Thakar. "Big data analytics for mask prominence in COVID pandemic." *Materials Today: Proceedings* 51(2022):2471-2475. DOI.org/10.1016/j.matpr.2021.11.620
9. Moriarty, F. "Air quality guidelines for Europe: World Health Organization Regional Office for Europe, 1987." ISBN 92, no. 890 (1988): 1114.
10. Rall, David P. "Review of the health effects of sulfur oxides." *Environmental health perspectives* 8(1974):97121. DOI.org/10.1289/ehp.74897
11. . Kang, XiuYing, and YanPing Su. "Lattice Boltzmann simulation of flow around two, three and four circular cylinders in close proximity." *Science China Physics, Mechanics and Astronomy* 55 (2012): 1873-1885. DOI.org/10.1007/s11433-012-4876-5
12. May, K. R., and R. Clifford. "The impaction of aerosol particles on cylinders, spheres, ribbons and discs." *Annals of Occupational Hygiene* 10, no. 2 (1967): 83-95. DOI.org/10.1093/annhyg/10.2.83
13. Wang, Jing, and David YH Pui. "Filtration of aerosol particles by elliptical fibers: a numerical study." *Journal of Nanoparticle Research* 11 (2009): 185-196. DOI.org/10.1007/s11051-008-9422-z
14. Brandon, Daniel J., and S. K. Aggarwal. "A numerical investigation of particle deposition on a square cylinder placed in a channel flow." *Aerosol Science & Technology* 34, no. 4 (2001): 340-352. DOI.10.1080/02786820121279
15. Przekop, Rafał, and Leon Gradoń. "Deposition and filtration of nanoparticles in the composites of nano-and microsized fibers." *Aerosol Science and Technology* 42, no. 6 (2008): 483-493. DOI.org/10.1080/02786820802187077
16. Jafari, Saeed, Mazyar Salmanzadeh, Mohammad Rahnama, and Goodarz Ahmadi. "Investigation of particle dispersion and deposition in a channel with a square cylinder obstruction using the lattice Boltzmann method." *Journal of Aerosol Science* 41, no. 2 (2010): 198-206. DOI.org/10.1016/j.jaerosci.2009.10.005

gaseous microchannel under the influence of various forces." *Micromachines* 12, no. 1 (2021): 47. DOI.org/10.3390/mi12010047

29. Li, Amy, and Goodarz Ahmadi. "Dispersion and deposition of spherical particles from point sources in a turbulent channel flow." *Aerosol science and technology* 16, no. 4 (1992): 209-226. DOI.org/10.1080/02786829208959550

30. Li, Amy, and Goodarz Ahmadi. "Deposition of aerosols on surfaces in a turbulent channel flow." *International Journal of Engineering Science* 31, no. 3 (1993): 435-451. DOI.org/10.1016/0020-7225(93)90017-O

31. Verlet, Loup. "Computer" experiments" on classical fluids. I. Thermodynamical properties of Lennard-Jones molecules." *Physical review* 159, no. 1 (1967): 98. DOI.org/10.1103/PhysRev.159.98

32. Tritton, David J. "Experiments on the flow past a circular cylinder at low Reynolds numbers." *Journal of Fluid Mechanics* 6, no. 4 (1959): 547-567. DOI.org/10.1017/S0022112059000829

33. Tehrani, Ali, and Ali Moosavi. "Investigation of particle dispersion and deposition in a channel with elliptic obstructions using lattice Boltzmann method." In 2012 7th IEEE International Conference on Nano/Micro Engineered and Molecular Systems (NEMS), pp. 523-528. IEEE, 2012. DOI.10.1109/NEMS.2012.6196830

34. Salmanzadeh, M., M. Rahnama, and G. Ahmadi. "Particle transport and deposition in a duct flow with a rectangular obstruction." *Particulate Science and Technology* 25, no. 5 (2007): 401-412. DOI.org/10.1080/02726350701487181

35. Silva, ALF Lima E., A. Silveira-Neto, and J. J. R. Damasceno. "Numerical simulation of two-dimensional flows over a circular cylinder using the immersed boundary method." *Journal of Computational Physics* 189, no. 2 (2003): 351-370. DOI.org/10.1016/S0021-9991(03)00214-6

36. Park, Jeongyoung, Kiyoun Kwon, and Haecheon Choi. "Numerical solutions of flow past a circular cylinder at Reynolds numbers up to 160." *KSME international Journal* 12 (1998): 1200-1205. DOI.org/10.1007/BF0294259

37. Sucker, D., and H. Brauer. "Fluiddynamik bei quer angeströmten Zylindern." *Heat and Mass Transfer* 8, no. 3 (1975): 149-158. DOI.org/10.1007/BF01681556